

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



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*

(24) 4 / 2022

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

Scientific & Technical Journal

Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года

Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	PIETRO ZUNINO
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ИПК «БРИГ», г.Казань,
Адрес типографии:	420097, г. Казань, ул. Академическая, д.2, ОФИС 009

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2022
Т.24, № 4
Июль-Август

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 работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2022
Vol. 24, № 4
Jule-August

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

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

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

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

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS,
ARTICLES, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

Editorial board:

IGOR IVSHIN
VASIL KASIMOV
GOLENISHCHEV-KUTUZOV
ALEXANDER
DOVGUN VALERY
GRACHEVA ELENA
ILYUSHIN PAVEL
SAFIN ALFRED
MESHCHERYAKOV VIKTOR
STANIMIR VALTCHEV
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL
BOCHKAREV IGOR

BRIAKIN IVAN
SUSLOV KONSTANTIN
FEDOTOV ALEXANDER
ZVEREVA ELVIRA
SHCHINNIKOV PAVEL
MINGALEEVA GUZEL
VANKOV YURY
ARAKELYAN EDIK
PAVLOV GRIGORY
DMITRIEV ANDREY
BORUSH OLESYA
LAPTEV ANATOLY
YAKIMOV NIKOLAY

ILIYA K.ILIEV
VAFIN DANIL
ION V ION
NIKOLAEVA LARISA
KALAI DA MARINA
BORISOV ANDREY
ANDREEV VICTOR
KORNILOV VLADIMIR
KOZELKOV OLEG

Address

Tel./fax:

Email:

Site:

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

+7 (843) 527-92-76

problems_ener@mail.ru

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

© Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems, 2022.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., МУСТАФИНА Г.Р. Построение математической модели распространения волн лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием.	3
МАЗАНОВ С.В., ГУМЕРОВ Ф.М., УСМАНОВ Р.А, ГАБИТОВА А.Р., ЗАРИПОВ З.И., ВАРФОЛОМЕЕВ С.Д., ВОЛЬЕВА В.Б., ШАПОВАЛОВ Ю.А. Биодизельное топливо. Часть I. Способы получения.	16
МАНАХОВ В.А., ЦВЕТКОВ А.Н. Спектральный анализ механических дефектов по параметрам ваттметрограммы штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации.	50
БРЯКИН И.В., БОЧКАРЕВ И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередач.	63
ДОВГУН В.П., ЕГОРОВ Д.Э., НОВИКОВ В.В., СИНЯГОВСКИЙ А.Ф. Установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов в системах электроснабжения.	77

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЧЕРВОНЧЕНКО С.С., ФРОЛОВ В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания.	90
САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах.	105
МАЙОРОВ А.А., САФИН А.Р. Возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов.	116
РОМАНОВА В.В., ХРОМОВ С.В., БАТУХТИН А.Г., СУСЛОВ К.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей.	131
СОЛУЯНОВ Ю.И., ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТШИН А.Р. Расчет поправочного коэффициента к нормативным значениям удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов г. Москвы и Московской области.	142

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

ЯРОСЛАВСКИЙ Д.А. Аналитические модели движения проводов воздушных высоковольтных линий электропередачи.	154
ГАЛИЕВА Т.Г., ИВАНОВ Д.А., САДЫКОВ М.Ф., АНДРЕЕВ Н.К., ХАМИДУЛЛИН И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов.	165

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ЛУКАНИН П.В., КАЗАКОВ В.Г., ЗВЕРЕВ Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП.	178
---	-----

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

GAPONENKO SO., KONDRATIEV AE., MUSTAFINA GR. Construction of a mathematical model of lamb wave propagation in a steel pipeline with a protective outer coating. .	3
MAZANOV SV., GUMEROV FM., USMANOV RA., GABITOVA AR., ZARIPOV ZI., VARFOLOMEEV SD., VOL'EVA VB., SHAPOVALOV YUA. Biodiesel fuel. Part I. Methods of obtaining.	16
MANAKHOV VA. TSVETKOV AN. Spectral analysis of mechanical and chemical defects by the parameters of the wattmetrogram of drawer drive pumping unit in the process of operation.	50
BRYAKIN I.V., BOCHKAREV I.V. Vibration sensor for monitoring systems of construction elements of high-voltage power lines.	63
DOVGUN VP., EGOROV DE., NOVIKOV VV., SINJAGOVSKY AF. Shunt power factor correction devices for damping of harmonic resonance in industrial power systems.	77

ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

CHERVONCHENKO SS., FROLOV VYA. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources	90
SAVENKO AE., SAVENKO PS. Use and improvement of automatic systems for control of reduced electric power sources in local electric networks.	105
MAIOROV AA., SAFIN AR. The possibility of using permanent magnets without rare earth elements in electric motors.	116
ROMANOVA VV., KHROMOV SV., BATUKHTIN AG., SUSLOV KV. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors.	131
SOLUYANOV YUL., AI. FEDOTOV, AR. AKHMETSHIN. Calculation of the correction factor to the normative values of specific electric loads of multiple residential buildings Moscow and Moscow region.	142

METHODS AND DEVICES FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS,
PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

YAROSLAVSKY DA. Analytical models of movement of wires of air high-voltage power transmission lines.	154
GALIEVA TG., IVANOV DA., SADYKOV MF., ANDREEV NK., KHAMIDULLIN IN. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges.	165

TECHNOSPHERE SAFETY

LUKANIN PV., KAZAKOV VG., ZVEREV LO. Concept of PPI energy technology complex upgrading.	178
---	-----

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 539.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА В СТАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ С ЗАЩИТНЫМ НАРУЖНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Мустафина Г.Р.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
sogaponenko@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Провести адаптацию метода измерения распространения волн Лэмба в тонких двуслойных пластинах к исследованию зависимости фазовой скорости от технического состояния трубопроводов с защитным наружным покрытием. Выполнить модификацию численно-аналитического алгоритма измерения толщины покрытия и областей несцепления материалов в тонких двуслойных пластинах для виброакустической диагностики технических трубопроводов. Исследовать распространение симметричной волны Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием. МЕТОДЫ. Для решения задачи локализации повреждений технических трубопроводов рассмотрены традиционные методы неразрушающего контроля, основанные на виброакустической диагностике. РЕЗУЛЬТАТЫ. Построена математическая модель, описывающая зависимость распространения моды фазовой скорости волны Лэмба от толщины исследуемого объекта. Наличие изменений в толщине трубопровода принято как влияние дефектов материала на параметры распространения моды волны Лэмба. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлен численно-аналитический метод расчета распространения симметричной моды волны Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием. Представлена зависимость скорости распространения волн Лэмба от толщины исследуемого объекта. На основании описанной методики представляется возможным оценивать не только толщину сегмента и области несцепления слоев, но и суммарную площадь дефектной зоны. Это позволит в дальнейшем фиксировать относительные изменения в толщине стенок трубопроводов для определения изменений физических свойств материала или наличия дефекта.

Ключевые слова: дефект; виброакустический контроль; волна Лэмба; трубопровод.

Для цитирования: Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Мустафина Г.Р. Построение математической модели распространения волн Лэмба в стальном трубопроводе с защитным наружным покрытием // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15.

CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF LAMB WAVE PROPAGATION IN A STEEL PIPELINE WITH A PROTECTIVE OUTER COATING

SO. Gaponenko, AE. Kondratiev and GR. Mustafina

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sogaponenko@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Adapt the method of measuring the propagation of Lamb waves in thin two-layer plates to the study of the dependence of the phase velocity on the technical condition of pipelines with a protective outer coating. To perform a modification of the

numerical-analytical algorithm for measuring the thickness of the coating and areas of non-adhesion of materials in thin two-layer plates for vibroacoustic diagnostics of technical pipelines. To investigate the propagation of a symmetric Lamb wave in a steel pipeline with a protective outer coating. **METHODS.** To solve the problem of localizing damage to technical pipelines, traditional methods of non-destructive testing based on vibroacoustic diagnostics are considered. **RESULTS.** Work on the construction of a mathematical model of the dependence of the propagation of the phase velocity of the Lamb wave on the thickness of the object under study has been carried out. The numerical analysis of the measurements was carried out using the example of thin two-layer segments of pipelines. The presence of changes in the thickness of the pipeline is taken as the effect of material defects on the propagation parameters of the Lamb wave mode. **CONCLUSION.** A numerical-analytical method for calculating the propagation of a symmetric Lamb wave mode in a thin segment is presented. The dependence of the propagation velocity of Lamb waves on the segment thickness is demonstrated. Based on the described technique, it seems possible to estimate not only the thickness of the segment and the area of non-adhesion of the layers, but also the total area of the defective area. This will allow in the future to record the relative changes in the thickness of the walls of pipelines to determine changes in the physical properties of the material or the presence of a defect.

Keywords: defect; vibro-acoustic monitoring; Lamb waves; pipeline.

For citation: Gaponenko SO, Kondratiev AE. and Mustafina GR. Construction of a mathematical model of lamb wave propagation in a steel pipeline with a protective outer coating. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-3-15.

Введение

Применение современных методов неразрушающего контроля обусловлено необходимостью своевременного мониторинга состояния технических трубопроводов [1], которые под влиянием внешних и внутренних факторов эксплуатации подвергаются деградации материала. Слоистые трещины являются одними из трудно выявляемых и скрытных дефектов металлических трубопроводов и это требует принятия эффективных мер их оценки, начиная с их классификационного анализа и уменьшения риска их появления как при реализации технологии производства металлических трубопроводов, так и при анализе их состояния в процессе эксплуатации. Дефекты такого рода приводят к выходу из строя оборудования и потерям энергоносителя или иной подаваемой среды, что выражается в экономических затратах на его замену. Кроме того, замена оборудования требует временной приостановки подачи среды по данному трубопроводу, что также создает дополнительные финансовые расходы [2].

Для решения подобных задач актуальным вопросом остается проведение мониторинга состояния трубопроводов различными методами неразрушающего контроля, применение которых способствует уменьшению возникновения нежелательных последствий от развивающейся со временем деградации материалов трубопроводов. В статье для определения технического состояния трубопроводов ЖКХ, предлагается рассмотреть новый подход, основанный на распространении волн Лэмба в представленных сегментах трубопровода [3]. Сегмент в статье рассматривается как часть трубопровода в разрезе, представляющего собой круг, который ограничен дугой окружности и секущей.

Методы неразрушающего контроля трубопроводных систем, лежащие в основе технических решений задачи обнаружения заглубленных трубопроводов, а также выявления различных дефектов часто находят отражение в работах последних лет. Это связано с тем, что повышение безопасности использования и повышение энергоэффективности непосредственно зависит от мероприятий применения новейших приборов контроля.

Подобные мероприятия осуществления контроля необходимы при строительстве зданий и сооружений, подведении к ним различного рода коммуникаций, а также для достижения требуемых условий безопасности при дальнейшей эксплуатации [4].

На рисунке 1 приведено распределение количества зарегистрированных патентов по методам контроля трубопроводов за период с 2010 по 2020 годы. Одним из

важнейших направлений безопасности является повышение энергоэффективности и надежной эксплуатации различных коммуникаций, которое обеспечивается, в частности, разработкой и внедрением новых более современных способов и приборов контроля их технического состояния.

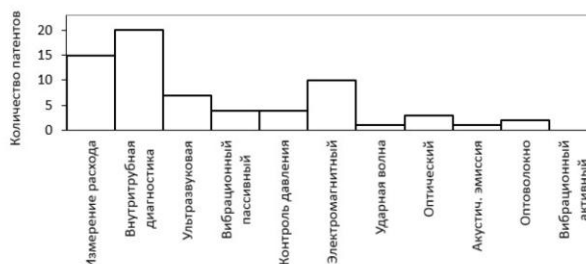


Рис. 1. Распределение количества зарегистрированных патентов по методам контроля трубопроводов за период с 2010 по 2020 годы.

Fig. 1. Distribution of the number of registered patents on pipeline control methods for the period from 2010 to 2020.

Современные методы мониторинга инженерных коммуникаций ограничены избирательной способностью и имеют небольшой спектр возможностей контроля, зависящий от материала исследуемого объекта.

Одним из примеров неразрушающего контроля трубопроводов, описанного в патенте на изобретение № 2734724, является виброакустический способ оценки технического состояния проводящих инженерных коммуникаций. Он представляет собой усовершенствованный акустический метод (рис. 2), суть которого заключается в генерировании волн Лэмба с резонансной частотой, находящейся в диапазоне от 250 до 15000 Гц, при этом регистрация колебаний осуществляется через одинаковые интервалы по всей длине диагностируемого объекта, далее по результатам измерений, регистрируемых чувствительным элементом, строят график распределения амплитуды колебания волны Лэмба по линии измерения [3].

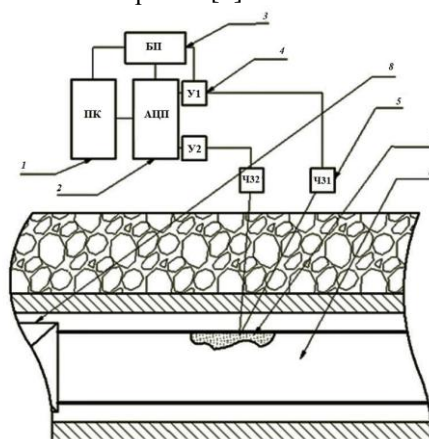


Рис. 2. Экспериментальная схема, состоящая из персонального компьютера (ПК) – 1; аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – 2; блока питания – 3; усилителей – 4; чувствительных элементов (микрофоны или пьезоэлектрические датчики) – 5; трубопровода – 6; искомого дефекта – 7; запорно-регулирующего устройства – 8.

Fig. 2. The experimental scheme consisting of a personal computer (PC) – 1; analog-to-digital converter (ADC) – 2; power supply unit – 3; amplifiers – 4; sensitive elements (microphones or piezoelectric sensors) – 5; pipeline – 6; desired defect – 7; shut-off and regulating device – 8.

Виброакустический метод неразрушающего контроля – это метод технической диагностики, позволяющий проводить оценку состояния исследуемого объекта путем анализа проходящих виброакустических сигналов, которые восприимчивы к дефектам и вариативности технического состояния поверхности объекта контроля [5].

Основой для анализа при виброакустическом методе выступают параметры виброакустического сигнала, которые выражены меняющимися во времени физическими величинами (перемещения волны, скорости, ускорения и частоты) [6]. Состояние исследуемого объекта составляется исходя из полученных характеристик виброакустического сигнала, который несет в себе необходимую информацию. Для взаимосвязи технического состояния исследуемого объекта и полученной информации виброакустического сигнала выстраивается аналитическая модель процессов диагностики [5].

Актуальность данного исследования заключается в определении зависимости

параметров волн Лэмба от технического состояния трубопровода.

Научная новизна заключается в проведении теоретических исследований, в построении математической модели, распространения волн Лэмба в двухслойных сегментах в условиях сложных динамических взаимодействий, проявление которых связано с наличием структурных или механических нарушениях в объекте контроля.

Практическая значимость заключается в получении зависимости отношения скоростей, распределения волн Лэмба, от толщины исследуемого двухслойного сегмента, который ляжет в основу разработки перспективных методик оценки технического состояния трубопровода.

Материалы и методы

Применение волн Лэмба в технической диагностике

Приводя в работе описание метода диагностики трубопроводов путем исследования зависимости скорости распространения волн необходимо разобраться с таким понятием как «волны Лэмба». Волны получили свое имя в честь английского ученого Горация Лэмба, описавшего их в своих работах в начале XX века. Данные волны относятся к нормальным волнам, чьи колебания протекают на внешней оболочке объекта вслед за распространением волны и отвесно ей. Волны Лэмба являются нормальными волнами в упругой пластине со свободными границами. Более сложным является случай распространения волн Лэмба в неоднородной нестационарной диспергирующей среде, который описывается математическим аппаратом удовлетворяющим уравнениям теории упругости с учетом граничных условий поверхности пластины.

Волны Лэмба имеют свойство распространяться как в твердых средах, так и в жидких. Однако дисперсия и мультимодальность в первом случае будет проявляться на порядок сильнее.

Описанные Лэмбом волны бывают двух типов: симметричные и асимметричные (рис. 3). Частицы в симметричных волнах распространяются симметрично от плоскости $Z = 0$, т.е. во всех точках пластины распространение по оси X имеют равные величины, а расположение по оси Z противоположно. В асимметричных волнах движение частиц антисимметрично от $Z = 0$ [7].

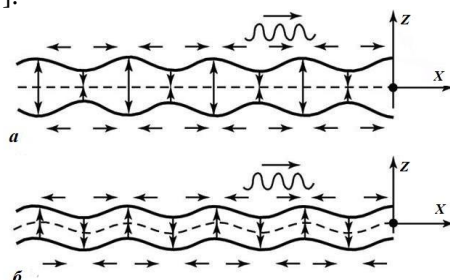


Рис. 3. Схема перемещения частиц на поверхности объекта при движении в них волн Лэмба. *а* - симметричная волна Лэмба, *б* - асимметричная волна Лэмба.

Fig. 3. Scheme of movement of particles on the surface of an object when Lamb waves move in them. *A* - symmetric Lamb wave, *B* - asymmetric Lamb wave

В объекте с определенной толщиной (δ) при неизменяемой частоте (ω) движущиеся симметричные и асимметричные волны Лэмба будут иметь конкретную величину. Каждая из этих волн будет отличаться друг от друга фазовыми и групповыми скоростями. Также в зависимости от изменения толщины пластины различным будет распределение смещения и напряжение. При теоретическом допущении, что исследуемый объект является пластиной малой толщины, волны Лэмба будут представлены продольной и изгибной волнами нулевого порядка [7].

Течение волны Лэмба осуществимо также в пластинах искривленного, неоднородного характера, а также в пластинах, вырезанных из кристаллов [8].

Волны Лэмба нашли широкое применение в методах неразрушающего контроля благодаря своему свойству сохранять скорость на больших протяженностях исследуемого объекта из твердых материалов.

В наше время физика распространения волн Лэмба отражена в методах дефектоскопии и контроля пластинчатых материалов и конструкций. Особенно широкое применение для выявления дефектов в материалах, несклеях многослойных объектов, при определении толщины. Имеет место быть применение волн Лэмба для диагностики в машиностроении и авиации [9], при диагностике ультразвуком, акустической диагностике, диагностике гладкости поверхности цилиндрических поверхностей

различных материалов. Одной из таких работ является исследование распространения волн Лэмба на поверхности стеклопластиковой трубы, состоящей из композитных материалов. Проведенные авторами эксперименты позволили построить зависимости амплитуды распространения волны от состояния трубопровода, имеющего как явные дефекты, так и неровности и шероховатости, которые имеют место быть для труб из композитных материалов такого рода [10].

В дефектоскопии, при диагностике волнами Лэмба при частоте до 10 МГц дополнительно используют волны на ультразвуковых частотах [11]. Это позволяет диагностировать объекты, имеющие большую толщину [12]. При исследовании же объектов малой толщины или при построении теоретических моделей распространения волн Лэмба для удобства расчета дисперсией волны возможно пренебречь. Однако, при увеличении толщины дисперсия волны будет сильно влиять на свойства распространения. К примеру, при сильной дисперсии в исследуемом объекте скорость волны будет гаснуть и расстояние распространения волны от источника будет уменьшаться.

Дисперсия волны Лэмба является полезным свойством для обработки сигналов при дефектоскопии [13], т.е. зависимость фазовой и групповой скоростей от частоты, позволяет построить дисперсионные линии задержки, где время задержки сигнала зависит от частоты. Такие линии задержки и фильтры существуют в частотном интервале 0,1 – 200 МГц [14].

Волны Лэмба являются эффективным инструментом для обнаружения и локализации повреждений в сегментах трубопроводов, поскольку они могут распространяться на относительно большие расстояния. Однако, поскольку расстояние распространения становится больше, временное разрешение сигналов волн Лэмба имеет тенденцию быть ниже из-за их дисперсии и мультимодальных характеристик. Чтобы преодолеть эту трудность, в исследованиях команды Гонконгского политехнического университета были предложены методы обработки сигналов, такие как компенсация дисперсии, двумерное преобразование Фурье и волновое преобразование [15]. Эти подходы эффективно работают для определения времени прихода мод дисперсионной волны или для разложения измеренного сигнала на различные моды, но требуют дополнительного изучения дисперсии и мультимодальных характеристик.

В последние годы временная фокусировка волн Лэмба находит применение при обнаружении повреждений пластинчатых структур. Теоретические исследования выявили, что дисперсионный эффект нулевой асимметричной моды компенсируется при обратном распространении. Также было показано, что сигнал основной моды, полученный посредством процесса обращения времени, сопровождается несколькими боковыми полосами из-за мультимодального эффекта волн Лэмба. Наличие возможного повреждения можно оценить по индексу повреждения, который основан на разнице между входным и восстановленным сигналами в процессе обращения времени. По сути, этот метод может непосредственно обнаруживать только повреждения, расположенные между излучателем и приемником, хотя алгоритм восстановления вероятности был включен в метод обращения времени для преодоления этой трудности [15-16].

В исследованиях д.т.н. Баева А.Р., а также академика, д.т.н. Прохоренко П.П., предложены методы обращения волн Лэмба для локализации повреждений в сегментах трубопроводов без использования базовых данных. Для этого преобразование мод, вызванное повреждением, включается в процесс обращения времени. Двойные преобразователи прикрепляются симметрично на обеих поверхностях трубопровода, чтобы избирательно излучать и принимать симметричные и асимметричные моды самого низкого порядка в низкочастотном диапазоне. Локализация повреждений выполняется путем численного моделирования с обратным временем рассеянной модой рассеянной волны Лэмба.

Сигналы волны Лэмба в сегменте трубопровода с дефектом численно моделируются методом эластодинамического конечного интегрирования, вместо фактического измерения. При этом мода Лэмба, которая соответствует моде испускаемой волны в поврежденном сегменте, не появляются в месте дефекта без извлечения сигналов рассеянной волны с использованием базовых данных для неповрежденной части сегмента трубопровода [16]. Однако предложенный метод, а именно обращение времени рассеянной волны с преобразованием мод, позволяет фокусироваться в месте повреждения без базовых данных. Выявлено, что предложенный способ создает сфокусированные пятна в дефектной зоне трубопровода, размеры которых связаны с размером дефекта и половиной длины волны моды обращения

времени волной. Данный способ имеет потенциал для достижения локализации повреждения в относительно сложной структуре трубопроводов, такой как часть сегмента с отверстиями сквозной толщины [15], но нуждается в экспериментальной проверке для обсуждения применимости предлагаемого метода к локализации повреждений для реальных конструкций трубопроводов.

Кроме того, остается вопрос об искажении результатов исследования распространения волн в объектах большой толщины, вызванного в связи с трансформацией волн Лэмба в поверхностные волны Рэлея.

Распространение волн Лэмба в сегменте

Для начала анализа примем толщину сегмента (δ) равной $2d$. Смещение по оси координаты Y равно нулю. При таком расположении частицы будут двигаться вдоль оси X , (рис. 4).

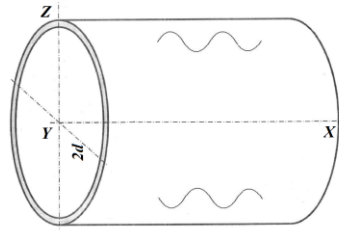


Рис. 4. Геометрия задачи.

Fig. 4. Geometry of the problem.

Вектор смещения частиц $\vec{V}$ представим в следующем виде, где $\vec{j}$ и ψ скалярный (продольных волн) и векторный потенциалы (сдвиговых волн) соответственно:

$$\vec{v} = \text{grad } j + \text{rot } \psi \quad (1)$$

Зависимость потенциалов от координаты Y :

$$\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} + k_l^2 j = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{d^2 \psi}{dz^2} + k_l^2 \psi = 0. \quad (3)$$

Отсюда выведем волновые числа:

$$k_l = 2\pi \bar{v} \sqrt{\frac{\rho}{\lambda_l + 2\mu}}; \quad (4)$$

$$k_t = 2\pi f \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \quad (5)$$

где k_l и k_t – волновые векторы продольной и сдвиговой волн; ρ – плотность среды; λ_l и 2μ – постоянные упругости.

Компоненты смещения частиц по осям X и Z обозначим как U и W соответственно. Компоненты смещения описывают волны, в которых движение происходит симметрично относительно плоскости $Z=0$, когда в верхней и нижней половинах пластины смещения U имеет одинаковые знаки, а W – противоположные или, во втором случае, когда движение происходит асимметрично относительно той же плоскости $Z=0$ (в верхней и нижней половинах пластины смещения U имеет противоположные знаки, а W – одинаковые).

Представим смещения U и W и напряжения σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xz} через потенциалы:

$$U = \frac{dj}{dx} - \frac{dj}{dz}, \quad W = \frac{dj}{dz} + \frac{d\psi}{dx}; \quad (6)$$

$$\sigma_{xx} = \lambda \left(\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2 j}{dx^2} - \frac{d^2 \psi}{dx dz} \right),$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{d^2 j}{dx^2} + \frac{d^2 j}{dz^2} \right) + 2\mu \left(\frac{d^2 j}{dz^2} + \frac{d^2 \psi}{dx dz} \right),$$

$$\sigma_{xz} = \mu \left(\frac{d^2 j}{dx dz} + \frac{d^2 \psi}{dx^2} - \frac{d^2 \psi}{dz^2} \right). \quad (7)$$

Численные исследования зависимости различных внешних факторов на виброакустические параметры энергетических трубопроводов, согласно [17] стоит начать с выражения для движения волн в сегментах через потенциалы:

$$\Delta j_{,L} + k_l^2 \cdot j_{,L} = 0; \quad (8)$$

$$\Delta \psi_{,L} + k_t^2 \psi_{,L} = 0. \quad (9)$$

Для волн Лэмба (Л) характерна геометрическая дисперсия [18]. Построение дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей дает возможность детального анализа движения в волнах разных номеров. Поскольку δ неизменна по всей протяженности исследуемого сегмента, а длина волны $\lambda = \frac{2\pi C}{\omega} = \frac{2\pi}{k}$, то становится очевидным, что соотношение между длиной волны и толщиной сегмента зависит от ω . Здесь ω – циклическая частота, а C – скорость акустической волны. Поэтому для всех волн в сегменте существует дисперсия [19]. Связь скалярных и векторных потенциалов с компонентами смещения по осям X и Z дается формулами (6) и (7). Компоненты тензора напряжений σ_{ij} на плоскостях сегмента $Z = \pm \delta/2$ должны стремиться к 0. Исходя из этого преобразуем формулы (8) и (9):

$$j = A_S \operatorname{ch} qz e^{ikx} + B_A \operatorname{sh} qz e^{ikx}, \quad (10)$$

$$\psi = D_S \operatorname{sh} qz e^{ikx} + C_A \operatorname{ch} qz e^{ikx}, \quad (11)$$

$$\text{где } q = \sqrt{k^2 - k_l^2}; \quad s = \sqrt{k^2 - k_t^2};$$

A_S, B_A, C_A, D_S – произвольные постоянные;
 k – волновое число волн Лэмба.

Подставляя выражения (10) и (11) в формулы (7) и приравнивая напряжения к нулю, выразим систему линейных однородных уравнений для нахождения максимально и минимально возможных значений A_S, B_A, C_A, D_S :

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S + (k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A + 2iksshd C_A + 2ikschsd D_S = 0;$$

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A - 2iksshd C_A + 2ikschsd D_S = 0;$$

$$2iksshqd A_S + 2ikschqd B_A - (k^2 + s^2) \operatorname{ch} sd C_A - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0;$$

$$-2iksshqd A_S + 2ikschqd B_A - (k^2 + s^2) \operatorname{ch} sd C_A + (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0. \quad (12)$$

Данная система удовлетворяется, если удовлетворяются две подсистемы:

$$(k^2 + s^2) \operatorname{ch} qd A_S + 2ikschsd D_S = 0,$$

$$2iksshqd A_S - (k^2 + s^2) \operatorname{sh} sd D_S = 0; \quad (13)$$

$$(k^2 + s^2) \operatorname{sh} qd B_A + 2iksshd C_A = 0,$$

$$2ikqchqdB_A - (k^2 + s^2)chsdC_A = 0. \quad (14)$$

При этом волновое число k :

$$(k^2 + s^2)^2 chqdshsd - 4k^2 qsshqdchsd = 0, \quad (15)$$

$$(k^2 + s^2)^2 shqdchsd - 4k^2 qschqdshsd = 0. \quad (16)$$

Зная дисперсионные кривые фазовых скоростей волн Лэмба, можно вычислить смещения и напряжения в волне [17]. Продольные U_{S_0} и поперечные W_{S_0} смещения волны в сегменте имеют вид:

$$U_{S_0} = Ak_t \frac{k_S^2 - s_S^2}{k_S^2 + s_S^2} \times \frac{1}{k_t d} \sin(k_S x - \omega t), \quad (17)$$

$$W_{S_0} = Ak_t \frac{q_S (k_S^2 - s_S^2)}{k_t (k_S^2 + s_S^2)} \times \frac{z}{d} \cos(k_S x - \omega t), \quad (18)$$

$$W_{S_0} = U_{S_0} q_S zctg(k_S x - \omega t). \quad (19)$$

Волнам Лэмба характерна дисперсия скоростей, зависящая от толщины сегмента, параметров упругости материала и частоты волны ω . Из этого можно сделать вывод, что при толщине сегмента (δ), скорость распространения самой быстрой симметричной моды S_0 будет выглядеть как:

$$C_{S_0} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (20)$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона, для металлов располагается в диапазоне 0,26-0,35; ρ – плотность материала.

Исходя из выведенных выражений в продольных волнах чаще встречаются смещения по оси X с неизменной по длине амплитудой. Продольное смещение при этом значительно больше смещения в поперечном направлении, вызванного за счет эффекта Пуассона [20].

Теоретический анализ

Рассмотрим ситуацию распространения волны Лэмба в трубопроводе с защитным наружным покрытием из ГОСТ 31448-2012 ¹[21]. Настоящий стандарт распространяется на стальные бесшовные, сварные прямошовные и спирально-шовные трубы диаметром от 114 до 1420 мм с наружными защитными покрытиями, нанесенными в заводских условиях.

В качестве объектов исследования были взяты несколько стальных электросварных прямошовных трубопроводов из ГОСТ 10704-91 ²[22] с толщиной стенок (δ) 2,2; 3,5; 4,5; 5 мм и с нанесенными на нее защитным (полиэтиленовым) покрытием с толщиной 2; 2,2; 2,5 и 3 мм. Трубопроводы выполнены из стали со свойствами материала: $\mu = 0,28$; $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа и $\rho = 7,85 \cdot 10^4$ кг/м³, а наружное защитное (полиэтиленовое) покрытие со свойствами: $\mu = 0,42$, $E = 770$ МПа и $\rho = 9,65 \cdot 10^2$ кг/м³.

Основные характеристики материалов рассматриваемых трубопроводов с защитными наружными покрытиями приведены в табл.1.

Таблица 1

Основные характеристики материалов трубопроводов с защитными наружными покрытиями

Материал	E	μ	ρ	Толщина, δ			
	МПа		кг/м ³	мм			
Монослойное полиэтиленовое покрытие, δ_1	770	0,42	$9,65 \cdot 10^2$	1	2	3	3,5

¹ ГОСТ 31448-2012 «Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия» от 05 июня 2013 г. // М.: Стандартинформ, 2013 год.

² ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2, 3)» от 15 ноября 1991 г. // М.: Стандартинформ, 2007 год.

Сталь, δ_2	$2,2 \cdot 10^5$	0,28	$7,85 \cdot 10^4$	2,2	3,5	4,5	5
-------------------	------------------	------	-------------------	-----	-----	-----	---

Размеры для обоих слоев приняты исходя из используемого в ТЭК и ЖКХ трубопровода из легированной стали с монослойным полиэтиленовым антикоррозионным покрытием «МЕТАЛЕН ПЭ-21». Подобные размеры приняты только в целях удобства расчета с учетом сохранения условия возникновения волн Лэмба: соизмеримость толщины слоя с длиной объемной волны в слое.

Материалы отличаются упругими свойствами друг от друга, поэтому выполняется условие:

$$\{(k_t)_1 \delta_1, (k_t)_2 \delta_2\} = 1, \quad (21)$$

При удовлетворении условия (21) и наличии дефекта, к примеру отсутствия сцепления между слоями, в стальной основе сегмента и в покрытии по-отдельности будет распространяться S_0 -мода со скоростями $(C_{S_0})_1$ и $(C_{S_0})_2$, определяемыми формулой (20), для основного и наружного слоя соответственно.

Также примем выполнение условия жесткого сцепления поверхностей контактов материалов сегмента, а именно:

$$\begin{aligned} (\sigma_{ij})_1 &= (\sigma_{ij})_2; \\ (U_{S_0})_1 &= (U_{S_0})_2; \\ (W_{S_0})_1 &= (W_{S_0})_2 \text{ при } z=0 \end{aligned} \quad (22)$$

Обобщим параметры для обоих слоев:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{E_1^{-1} \delta_1 + E_2^{-1} \delta_2}; \\ \mu &= \mu_1 \delta_1 + \mu_2 \delta_2; \\ \rho &= \rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{где } \delta_1 = \frac{\delta_1}{\delta}, \delta_2 = \frac{\delta_2}{\delta}.$$

Так как $\delta_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$ соответствует промежутку от 0 до 1, то формула (20) имеет вид:

$$C_{S_0} \approx \sqrt{\frac{E_2}{\rho_2} \left[1 - \frac{\delta_1}{2} (E_{21} + \rho_{12}^{-2}) \right] \left(1 + \frac{\mu_2^2}{2} \right)}. \quad (24)$$

Результаты

В целях анализа изменения толщины сегмента решим задачу, где допустим, что на торце трубопровода расположен излучатель. На поверхности трубопровода, на постоянной длине между ними $L=80$ мм расположены два пьезоэлектрических датчика, которые регистрируют проходящий сигнал от излучателя. При известном значении времени между двумя датчиками $t_{12}=0,1$ с найдем скорость исследуемой моды из $C_{S_0}^* = \frac{L}{t_{12}}$.

Выразим из формулы (24) δ_1 , которая будет равна:

$$\delta_1 \approx \left(\frac{C_{S0}^*}{(1 + \frac{\mu_2^2}{2}) \sqrt{E_2}} + 1 \right) \frac{1}{(E_{21} + \rho_{12}^{-2})}, \quad (25)$$

Полученные расчетным путем данные распространения волны Лэмба в стальном сегменте с монослойным полиэтиленовым покрытием, представляют собой монотонно убывающую кривую, где $\Delta C_{S0} = C_{S0} - C_{S0}^*$, представленную на рис. 5.

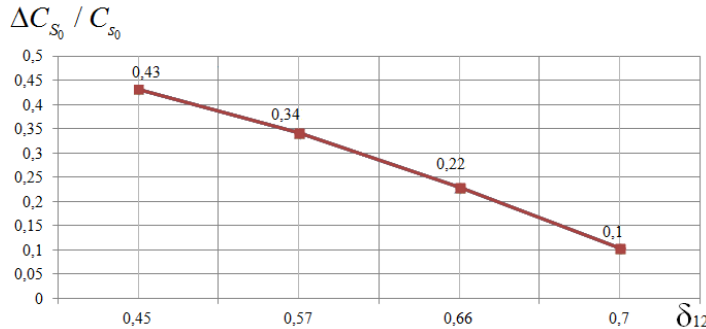


Рис. 5. Отношение скоростей распространения волны от толщины сегмента.

Fig. 5. Speed ratio of the wave propagation velocity on the segment thickness

Применив описанную выше методику становится возможным не только определять изменения в геометрической толщине объекта, но и контролировать изменения в структуре многослойных объектов при несцеплении и определять общую площадь зоны дефекта.

Уравнение площади дефектной зоны будет представлять собой такое выражение:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^j \Delta S_j = j d \frac{\Delta C_{S0}}{C_{S0}^* (C_{S0})_2} t_2 \sum_{i=1}^{i_0} d \left(\frac{t_{nj}}{t_2} - 1 \right) \quad (26)$$

где d — ширина, i — численность зон, l_i — протяженность дефектной зоны, t_2 — время распространения волны, t_{nj} — время перемещения волны на поверхности объекта [30].

Обсуждение

Известны работы Отечественных и зарубежных авторов, посвященные исследованиям распространения волн Лэмба в пластинах различных конфигураций. Речь шла об однородных материалах переменной толщины и формы. В этих же работах рассмотрены вопросы влияния различных структурных и механических нарушений в виде областей несцепления материала на параметры волн Лэмба.

Проведена адаптация метода измерения распространения волн Лэмба в тонких пластинах. Определена зависимость фазовой скорости волны Лэмба от технического состояния трубопроводов с защитным наружным покрытием.

Приведенная математическая модель вычисления зависимости параметров волны Лэмба от толщины исследуемого трубопровода позволяет оценивать не только толщину сегмента и области несцепления слоев, но и суммарную площадь дефектной зоны. Это позволит в дальнейшем фиксировать относительные изменения в толщине стенок трубопроводов для определения изменений физических свойств материала или наличия дефекта. В дальнейшем планируется проведение эксперимента на стеклопластиковом трубопроводе путем измерения значений амплитуды смещения при заданной частоте волны по поверхности трубопровода. Используя формулу (26) представляется возможным определить конкретную площадь данной дефектной зоны.

Заключение

Таким образом, была определена зависимость параметров волн Лэмба от технического состояния трубопровода. С этой целью построена математическая модель распространения волн Лэмба в условиях сложных динамических взаимодействий, вызванных наличием структурных или механических нарушений в трубопроводах.

В итоге получена зависимость отношения скоростей распространения волн Лэмба от толщины исследуемого двухслойного сегмента объекта контроля.

Результаты выполненной работы позволяют применять математическую модель для вычисления зависимости параметров волны Лэмба от толщины исследуемого двухслойного объекта. В целях наглядности и упрощения задачи в качестве исследуемого трубопровода рассматривался тонкий сегмент, что позволило ограничиться в расчетах только самой быстрой нулевой симметричной модой скорости. Проведенный анализ позволил построить

график распространения волны, который демонстрирует, что с ростом отношения C_{s_0} к ΔC_{s_0} зависимость от толщины исследуемого объекта представляет собой монотонно убывающую кривую. Определяя отношение между $\rho_2 E_2$ и $\rho_1 E_1$, становится возможным делать вывод о наличии структурных и механических нарушений в трубопроводе. Развивая данную методику, можно контролировать изменения в толщине стенки трубопроводов для определения изменений физических свойств материала и наличия дефекта.

Литература

1. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. Методика проведения оперативного диагностирования трубопроводов энергетических систем и комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 188–201.
2. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Гапоненко С.О., и др. Повышение надежности транспортировки тепловой энергии до потребителей в условиях модернизации системы горячего водоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. № 4(48). С. 29–37.
3. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Шакурова Р.З. Виброакустический способ оценки технического состояния проводящих инженерных коммуникаций. Патент РФ на изобретение № 2734724 22.10.2020. Бюл. № 30. Доступно по: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=5a1be950e10cd875a3d6f811fa3b72a8> html. Ссылка активна на 12.05.2022.
4. Шакурова Р.З., Гапоненко С.О. Повышение надежности работы энергетических систем путем определения технического состояния трубопроводов // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2019. Т. 2 (2). С. 184-187.
5. Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT). Доступно по: <https://www.ndt.net/index.php>. Ссылка активна на 12.05.2022.
6. Генкина М.Д., Розенберг Г.Ш., Мадорский Е.З., и др. Вибродиагностика. М: Диагностика, 2003. 284 с.
7. Физическая энциклопедия academic.ru. Доступно по: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3739/%D0%9B%D0%AD%D0%9C%D0%91%D0%90. Ссылка активна на 12.05.2022.
8. Лэмба волны. Реальная Физика. Глоссарий по физике. Доступно по: <http://bourabai.ru/physics/2005.html> Ссылка активна на 12.05.2022.
9. Ангелов Г.С., Ермолов И.Н., Марков А.И. Применение ультразвука в промышленности, М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
10. Benmeddour F., Grondel S., Assaad J., et al. Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches // Ultrasonics. 2009. Vol.49. pp. 202–205.
11. De Cicco G., Morten B., New approach to the excitation of plate waves for piezoelectric thick-film devices, Ultrasonics. 2008. V.48. pp. 697–706.
12. De Cicco G., Morten B., Potel C., et al. Lamb wave attenuation in a rough plate // I. Analytical and experimental results in an anisotropic plate, J. Appl. Phys. 2008. V.104, №7. pp. 10.
13. Викторov И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
14. De Cicco G., Morten B., Potel C., et al. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003. V.50. pp.419–427.
15. Ибадов А.А., Кондратьев А.Е., Гапоненко С.О. Исследование зависимости фазовой скорости волн Лэмба от технического состояния трубопроводов ЖКХ // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. 2020. С. 283-287.
16. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., et al. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage. E3S Web of Conferences. 2019. pp. 124-129.
17. Викторov И.А., Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
18. Энциклопедия химии и физики. Дисперсия волн. Доступно по: https://femto.com.ua/articles/part_1/1047.html. html Ссылка активна на 08.11.2021.

19. Золотова О.П., Бурков С.И., Сорокин Б.П. Распространение волн Лэмба и SH-волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2010. Т. 2 №3, С. 185-204.

20. Баев А.Р., Прохоренко П.П. Особенности распространения волн Лэмба в тонких двухслойных материалах // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2008. № 4. С. 52-55.

21. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Kondratiev A.E., Dimova R. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes. E3S Web of Conferences : 2019. pp. 21.

Авторы публикации

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет.

Мустафина Гульфия Равиловна – студент Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Shakurova RZ, Gaponenko SO, Kondratiev AE. Technique for operational diagnosis of pipelines of energy systems and complexes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(6):188-201. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-188-201>.

2. Vankov YuV, Zapolskaya IN, Gaponenko SO, et al. Improving the reliability of transportation of heat energy to consumers in the context of modernization of the hot water supply system. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020;4(48):29–37.

3. Gaponenko SO, Kondratiev AE, Shakurova RZ. *Vibroacoustic method for assessing the technical condition of conducting engineering communications*. RF patent for invention No. 2734724 10/22/2020. Bull. No. 30. Available at: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=5a1be950e10cd875a3d6f811fa3b72a8>. Accessed: 12 May 2022.

4. Shakurova RZ, Gaponenko SO. Improving the reliability of energy systems by determining the technical condition of pipelines. Materials of the XIV International Youth Scientific Conference «Tinchurin Readings». Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2019;2 (2):184-187.

5. Open Access Portal of Nondestructive Testing (NDT). Available at: <https://www.ndt.net/index.php>. Link active on 11/08/2021. Accessed: 08.Nov.2021.

6. Genkina MD, Rosenberg GSh, Madorskiy EZ, et al. Vibration diagnostics. M: Diagnostics, 2003. 284 p.

7. Physical encyclopedia academic.ru. Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/3739/%D0%9B%D0%AD%D0%9C%D0%91%D0%90. Accessed: 11 Aug 2021.

8. Lamb waves. Real Physics. Glossary of Physics. Available at: <http://bourabai.ru/physics/2005>. Accessed: 11 Aug 2021.

9. Angels G.S., Ermolov I.N., Markov A.I. The use of ultrasound in industry, Moscow: Mashinostroenie, 1975. 240 p.

10. Benmeddour F, Grondel S, Assaad J, et al. Experimental study of the A0 and S0 Lamb waves interaction with symmetrical notches. *Ultrasonics*. 2009;49:202-205.

11. De Cicco G., Morten B., New approach to the excitation of plate waves for piezoelectric thick-film devices, *Ultrasonics*. 2008;48:697-706.

12. De Cicco G, Morten B, Potel C, et al. Lamb wave attenuation in a rough plate. I. Analytical and experimental results in an anisotropic plate, *J. Appl. Phys*. 2008;104(7).

13. Viktorov IA. *Physical foundations of the application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in technology*. Moscow: Nauka, 1966.169 p.

14. De Cicco G, Morten B, Potel C, et al. *A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2003;50:419-427.
15. Ibadov AA, Kondratiev AE, Gaponenko SO. *Investigation of the dependence of the phase velocity of Lamb waves on the technical state of pipelines of housing and communal services*. Methodological issues of research on the reliability of large energy systems: Proceedings of the 92nd meeting of the International Scientific Seminar. Yu.N. Rudenko. 2020. P. 283-287.
16. Gaponenko SO, Shakurova RZ. et al. *Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage*. E3S Web of Conferences. 2019. pp. 124-129.
17. Viktorov IA. *Sound surface waves in solids*. Moscow: Nauka, 1981. 287 p.
18. *Encyclopedia of Chemistry and Physics*. Dispersion of waves. Available at: https://femto.com.ua/articles/part_1/1047.html. Accessed: 11 Aug 2021.
19. Zolotova OP, Burkov SI, Sorokin BP. Propagation of Lamb and SH-waves in a piezoelectric cubic crystal plate. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics* 2010;2(3):185-204.
20. Baev AR, Prokhorenko PP. Features of the propagation of Lamb waves in thin two-layer materials. *Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal*. 2008;4:52-55.
21. Gaponenko SO, Shakurova RZ, Kondratiev AE, Dimova R. *Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes*. E3S Web of Conferences : 2019. pp. 21

Authors of the publication

Sergey O. Gaponenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr E. Kondratiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Gulfiya R. Mustafina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено	16.06.2022 г.
Отредактировано	17.06.2022 г.
Принято	22.06.2022 г.

БИОДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО. ЧАСТЬ I. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ

Мазанов¹ С.В., Гумеров¹ Ф.М., Усманов¹ Р.А., Габитова¹ А.Р.,
Зарипов¹ З.И., Варфоломеев² С.Д., Вольева² В.Б., Шаповалов³ Ю.А.

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

² Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

³ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы,
Республика Казахстан
serg989@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Представленная работа ставит перед собой цель анализа реалий и перспектив использования рабочих сред при получении биодизельного топлива, включающих в себя сверхкритическое флюидное состояние. МЕТОДЫ. Рассмотрены методы получения биодизельного топлива, включающие в себя метод переэтерификации, как наиболее распространенный, а также методы пиролиза и совместного процесса гидролиза и этерификации. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрены традиционные (промышленно используемые) способы получения биодизельного топлива, а также способы с участием сверхкритических флюидных сред в своей основе. Наряду с описанием состояния дел по обсуждаемой проблематике в мире приводятся и результаты собственных исследований, реализованных авторским коллективом настоящей статьи. Обращено внимание на перспективность ультразвукового эмульгирования реакционной смеси и использования гетерогенных катализаторов в целях смягчения сверхкритических флюидных условий осуществления процесса получения биодизельного топлива и энергосбережения. Обсуждены также условия получения биодизельного топлива без свободного глицерина и преобразования его в топливную составляющую. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Переэтерификация, осуществляемая в сверхкритических флюидных условиях, предоставляет значимые преимущества в сопоставлении с традиционным процессом и, особенно, в части возможности использования разнообразного и, в том числе, низкачественного сырья, облегчает процедуру выделения конечного продукта и, наконец, делает возможным переход от относительно маломасштабных реализаций с реакторами периодического действия к высокопроизводительным установкам с проточными реакторами.

Ключевые слова: биодизельное топливо; переэтерификация; сверхкритические флюиды; эфиры жирных кислот.

Для цитирования: Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Габитова А.Р., Зарипов З.И., Варфоломеев С.Д., Вольева В.Б., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. Часть I. Способы получения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

BIODIESEL FUEL. PART I. METHODS OF OBTAINING

SV. Mazanov¹, FM. Gumerov¹, RA. Usmanov¹, AR. Gabitova¹,
ZI. Zaripov¹, SD. Varfolomeev², VB. Vol'eva², YuA. Shapovalov³

¹ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

² Institute of Biochemical Physics N.M. Emanuel RAS, Moscow, Russia

³ Kazakh National University named al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan
serg989@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. The presented work aims to analyze the realities and prospects for the use of working media in the production of biodiesel fuel, including the supercritical fluid state. METHODS. Methods for obtaining biodiesel fuel are considered, including the method of transesterification, as the most common, as well as methods of pyrolysis and the combined process

of hydrolysis and esterification. **RESULTS.** Traditional (industrially used methods for producing biodiesel fuel), as well as methods involving supercritical fluid media at their core, are considered. Along with a description of the state of affairs on the issues under discussion in the world, the results of our own research carried out by the team of authors of this article are also presented. Attention is drawn to the prospects of ultrasonic emulsification of the reaction mixture and the use of heterogeneous catalysts in order to mitigate supercritical fluid conditions for the process of obtaining biodiesel fuel and save energy. The conditions for obtaining biodiesel fuel without free glycerol and converting it into a fuel component are also discussed. **CONCLUSION.** Transesterification carried out under supercritical fluid conditions provides significant advantages over the traditional process and, especially in terms of the possibility of using a variety of raw materials, including low-quality ones, facilitates the procedure for isolating the final product and, finally, makes it possible to switch from relatively small-scale implementations with batch reactors to high-performance plants with flow reactors.

Keywords: biodiesel fuel; interesterification; supercritical fluids; fatty acid esters.

For citation: Mazanov SV., Gumerov FM., Usmanov RA., Gabitova AR., Zaripov ZI., Varfolomeev SD., Vol'eva VB., Shapovalov YuA. Biodiesel fuel. Part I. Methods of obtaining. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

Введение

Резкий рост потребления углеводородного топлива на фоне высоких темпов снижения его запасов, ощутимых экологических последствий от использования этих сред, энергетической зависимости значительного количества стран, а также факта перепроизводства в сфере сельского хозяйства вызвали вполне обоснованную тенденцию в науке и технологии к поиску и освоению возобновляемых источников энергии на основе переработки биологического сырья [1, 2].

К сведению, количество потребляемой в мире энергии непрерывно растет (рис. 1) [3]. Если в 1980 г. доля электроэнергии, производимой на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире, составляла лишь 1 % от общего объема производства электроэнергии, то, согласно прогнозам, к 2020 г. она может достигнуть 13 %, а в 2060 г. – 33 %. По данным Министерства энергетики США, в этой отдельно взятой стране в 2020 г. объем производства электроэнергии на базе ВИЭ может достигнуть 22 % при 11 % в 2010 году. Подобное увеличение (для производства тепловой и электрической видов энергии) планируется и в странах Европейского Союза (с 11 % в 2010 г. до 23 % в 2020 г.). Также США имеют план [4] замены половины нефтяного дизельного топлива на биодизельное, ориентированный на 2022 год.

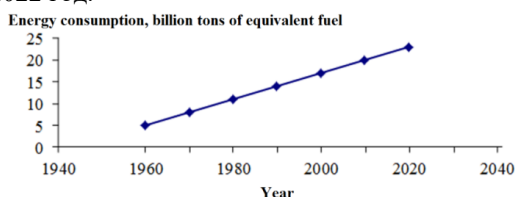


Рис. 1. Потребление энергии в мире [3].

Fig. 1. Energy consumption in the world [3].

До 90-х годов прошлого столетия биодизельное топливо, производимое в основном из рафинированных растительных масел и сравнительно дорогое, не могло конкурировать с традиционным дизельным топливом. Однако, в дальнейшем на фоне роста стоимости нефти, а соответственно и стоимости традиционного дизельного топлива, его возобновляемая альтернатива стала приобретать конкурентоспособность. Проблема глобального потепления делает использование биодизельного топлива еще более привлекательным, поскольку в этом случае согласно [5-7] выбросы CO_2 в атмосферу сокращаются на 78 %. Кроме того, при сжигании биодизельного топлива образуется меньшее количество CO , SO_x и несгоревших углеводородов; при сгорании выделение солей тяжелых металлов и сажи сокращается на 30 % и 50 %, соответственно; в случае протечек в почву быстро разлагается (3 недели) и не оказывает длительного негативного воздействия на окружающую среду, что в совокупности с потенциалом стабильного возобновляемого

источника энергии делает интерес к разработке эффективных технологий производства биодизельного топлива в мире исключительно высоким.

1. Традиционные методы получения биодизельного топлива и его модификации, проблемы и пути их решения

Биодизельное топливо – топливо, состоящее из моноалкильных эфиров длинноцепочных жирных кислот, получаемых преимущественно посредством реакции переэтерификации химически реагирующего растительного масла или животного жира в спиртовой среде (метанол, этанол и др.) [8]. Как правило, переэтерификация – обратимая реакция, состоящая из трех последовательных и обратимых реакций, где формируются диглицериды и моноглицериды жирных кислот в качестве промежуточных продуктов. Поскольку эти реакции обратимы, то большее количество спирта, чем требуется по стехиометрии уравнения, приводит к сдвигу равновесия реакции в сторону получения больших значений эфиров жирных кислот [9].

Традиционный промышленно реализованный метанолиз триглицеридов жирных кислот (ТЖК) с гидроксидом натрия или калия в качестве катализатора (рис. 2), как правило, осуществляется при атмосферном давлении, температуре 60 °С и мольном соотношении метанол/масло, равном 6:1 [10]. Последнее в два раза превосходит стехиометрическое значение.

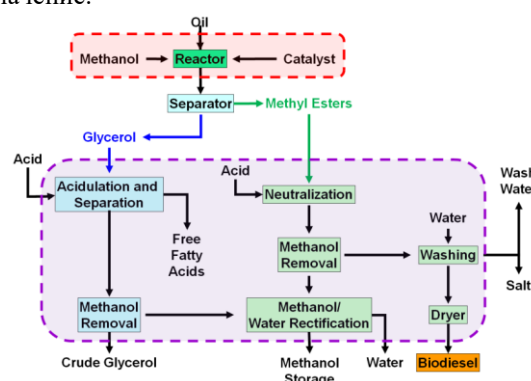


Рис. 2. Схема традиционного процесса получения биодизельного топлива [10].

Fig. 2. Scheme of the traditional process for obtaining biodiesel fuel [10].

Реакция осуществляется в двухфазной области «жидкость-жидкость». Для достижения 90-98 % конверсии ТЖК на установке периодического действия требуется не менее 1,5-4,0 ч [5,10], что связано с плохой смешиваемостью исходных реагентов, относительно малой площадью контакта фаз и, как следствие, низкой скоростью химической реакции. На этапах последующей нейтрализации щелочи и очистки продукта потребляется большое количество воды и, соответственно, формируются значительные объемы сточных вод, что требует существенных усилий в части удовлетворения экологическим требованиям и, как следствие, крайне негативно сказывается на энергетике процесса в целом. И наконец, как было отмечено выше, традиционный процесс высокочувствителен к качеству сырья и требует использования рафинированных, а соответственно, дорогостоящих растительных масел с влагосодержанием, не превышающим 0,06 % об и с содержанием свободных жирных кислот (СЖК) не более 0,5 % масс. [11]. В итоге, технология избыточно многостадийна, а себестоимость конечного продукта на 10-15 % превышает себестоимость нефтяного дизельного топлива [12]. Эту проблему во многих странах пока решают только одним способом – государственными дотациями того или иного вида. В результате чего, к примеру, на АЗС в Австрии, Германии и Чехии биодизельное топливо часто продается по той же цене, что и нефтяное дизельное топливо, а иногда и дешевле.

Приведенные недостатки традиционного метода явились причиной и основанием для широкомасштабных исследований в направлениях изучения новых подходов и разработки более эффективных технологий получения биодизельного топлива. К примеру, в работе [13] в рамках реакции переэтерификации, вместо гомогенного катализатора, являющегося причиной значительных энергозатрат на этапе его выделения из продукта реакции, использован гетерогенный катализатор, не формирующий подобных издержек. Речь идет о мезопористых мезофазных алюмосиликатных материалах. Исходное сырье (99,9 % этанол и растительное масло) при мольном соотношении 6:1 смешивали в аппарате с вихревым слоем ферромагнитных частиц. Нагрев производили путем воздействия на реагенты

электромагнитными волнами сверхвысокой частоты с частотой облучения 2,45 ГГц и мощностью магнетрона 600 Вт. Время реакции составило 6–8 мин., при этом смесь нагревалась до 60 – 73 °С. Конечный выход этиловых эфиров жирных кислот (ЭЭЖК) по этой методике составил 98 %.

В целом, исследования гетерогенного катализа при получении биодизельного топлива в температурных интервалах традиционного промышленно реализуемого процесса показали, что анион (ОН-) обменные смолы [14-16] и катион (-SO₃H) обменные смолы [17-19] являются перспективными катализаторами. Катализ периодической переэтерификации триолеина этанолом при молярном соотношении 20:1 и 50 °С с использованием 4 г ионообменных смол ОН (РА306) был использован для достижения более чем 98 % выхода этиловых эфиров жирных кислот через 5 ч реакции без дезактивации катализатора [14].

Другое исследование [15] также показало, что 70 % выход метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) был достигнут после 0,18 ч реакции для непрерывного метанолиза кокосового масла с использованием ОН-анионообменной смолы при мольном соотношении метанола к маслу 6:1 и 60 °С без дезактивации катализатора после 10 циклов. Не сообщалось о дезактивации катализатора при переэтерификации соевого масла метанолом с 3 г ОН-анионообменной смолы (BRI), где для достижения выхода МЭЖК в количестве 97,3 % потребовалось 4 часа при мольном соотношении метанола к соевому маслу 150:1 и 80 °С [16].

В работе [20] осуществлен иной способ получения эфиров жирных кислот (ЭЖК) - пиролиз растительного масла. Каталитический крекинг пальмового масла был осуществлен в микрореакторе с неподвижным слоем катализатора при атмосферном давлении и температурах реакции 350-450 °С. В качестве катализаторов были использованы высококремнеземный цеолит HZSM-5, цеолит β и ультрастабильный цеолит Y. Из этих трех катализаторов наибольшая конверсия, равная 99 %, получена в случае применения катализатора HZSM-5 в рамках реакции, осуществленной при температуре 350 °С. Но, при этом, в продукте реакции оказалось лишь 5 % эфиров жирных кислот. Тогда как, в случае использования ультрастабильного цеолита Y в рамках реакции, осуществленной при $t=350$ °С, величине конверсии в 45,4 % отвечает максимальное (14,4 %) содержание биодизельного топлива в продукте реакции.

Помимо получения биодизельного топлива из съедобных растительных масел, набирает популярность и использование в качестве сырья непищевых и отработанных растительных и животных масел, а также микроводорослей. Условно, непищевое сырье, применимое в процессе реакции переэтерификации наглядно показано на рисунке 3.

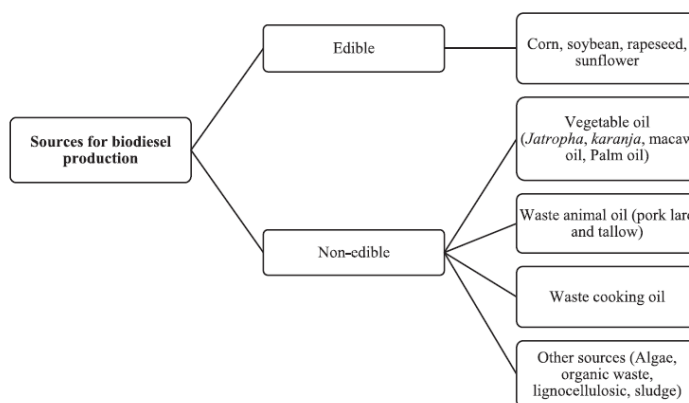


Рис. 3. Различные способы производства биодизельного топлива. Fig. 3. Different sources for biodiesel production.

Hamze и др. [21] оценили влияние концентрации катализатора, температуры реакции и мольного соотношения спирта к маслу на выход полученного биодизельного топлива из отработанных растительных масел. Они получили максимальный выход биотоплива (99,38 % масс.) при 1,4 % масс. загрузки катализатора, температуре реакции 65 °С и мольном соотношении 7,5:1. В исследовании Gurunathan и Ravi [22] получение биодизельного топлива из отработанных растительных масел оценивали с использованием гетерогенного катализатора – кальцинированного нанокompозита из оксида цинка, легированного медью. Максимальный выход биодизельного топлива составлял 97,71% масс. при концентрации нанокатализатора 12% масс., объемном соотношении масла к метанолу 1:8, температуре реакции 55 °С при длительности реакции - 50 мин. Maneerung и др. [23] для производства биодизельного топлива использовали кальцинированный куриный помет в качестве

катализатора СаО с высокой каталитической активностью. Выход метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) составлял 90 % при 7,5 % масс. катализатора, мольном соотношении метанола к маслу 15:1 и температуре реакции 65 °С.

Некоторые другие работы по получению биодизельного топлива в промышленно используемых условиях приведено в таблице 1.

Таблица 1

Данные о производстве биодизельного топлива из различных непищевых растительных масел

Непищевые растительные масла	Тип катализатора	Концентрация катализатора (%)	Спирт	Мольное соотношение	t, °С	Время	Выход, % масс	Источник
Ятрофа	КОН/кальцинированные кости животных отходов	6	Метанол	9:1	70	3 ч	96,1	[24]
Отработанное растительное масло	Яичная скорлупа	3.5	Метанол	22.5:1	65±5	5.5 ч	91	[25]
Пальмовое	SrO	5	Этанол	12:1	80	3 ч	98,2	[26]
Касторовое	КОН	1	Метанол	9:1	60	0.5 ч	95	[27]
Касторовое	КОН	1.25	Метанол	12:1	60	1 ч	94,9	[28]
Папайя	NaOH	0.95	Метанол	9,5:1	62,33	3.30 мин	99,9	[29]
Масло косточек плодов косточковых	КОН	6	Метанол	6:1	55	1 ч	95,8	[30]
Масло каранджи	γ- алюминий	1	Метанол	9:1	50	50 мин	69,3	[31]
Рапсовое	25 % масс пропитанный калием Fe ₃ O ₄ -CeO ₂	4.5	Метанол	7:1	65	2 ч	96,1	[32]

2. Методы получения биодизельного топлива с использованием рабочих сред в сверхкритическом флюидном (СКФ) состоянии, проблемы и пути их решения

2.1. Одностадийный процесс переэтерификации, осуществляемый в СКФ условиях

2.1.1. СКФ как среда для осуществления реакции переэтерификации

В настоящее время одним из наиболее перспективных подходов к получению биодизельного топлива является осуществление реакции переэтерификации в субкритических флюидных (СБКФ) и сверхкритических флюидных (СКФ) условиях реакционной смеси. Японские ученые S. Saka и D. Kusdiana [33] оказались первыми, кто осуществил реакцию переэтерификации в СКФ условиях реакционной смеси. Переэтерификация рапсового масла в среде метанола в отсутствие катализатора осуществлена авторами при $t=350$ °С, в диапазоне давлений 19-45 МПа, в процессе длительностью до 240 сек, при мольном соотношении «спирт/масло» 42:1. Максимальная конверсия рапсового масла в метиловые эфиры жирных кислот составила 95 %. СКФ процесс получения биодизельного топлива, предложенный японскими авторами, менее стадийен, нежели то, что имеет место в традиционном процессе (рис. 4).

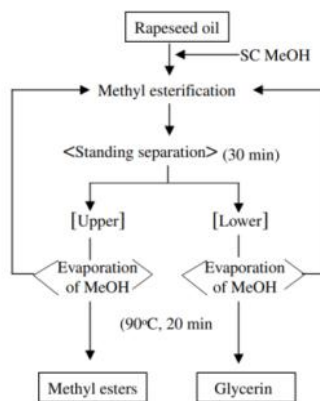


Рис. 4. Схема получения биодизельного топлива в СКФ условиях реакционной смеси.

Fig. 4. Scheme for obtaining biodiesel fuel in SCF conditions of the reaction mixture.

Сокращение количества этапов в рамках технологии получения биодизельного топлива при осуществлении реакции в СКФ условиях обусловлено и тем фактом, что в этом случае отсутствует потребность в предварительной обработке исходного сырья в целях удаления свободных жирных кислот (СЖК) и влаги [5,34,35]. В СБКФ и СКФ условиях практически любое количество СЖК, причем быстрее ТЖК, превращается в МЭЖК [36-38]. Нечто подобное можно высказать и относительно присутствия воды в исходном масле. К примеру, в работе [34] отмечается, что даже в присутствии 35 % H_2O в процессе СКФ переэтерификации, осуществленной при $t=350$ °С и мольном соотношении «метанол/масло», равном 42:1, полная конверсия рапсового масла в МЭЖК достигается всего лишь за 4 мин. Однако, в случае 50 % содержания воды и увеличения длительности процесса, реакция гидролиза начинает значимо конкурировать с реакцией переэтерификации и инициирует снижение выхода конечного продукта. Учитывая тот факт, что 50 % водный раствор масла лишь с большой натяжкой можно отнести к готовому к применению и приемлемому сырью, то закономерен вывод о том, что переэтерификация в СКФ условиях вполне пригодна для использования отработанных растительных масел и других низкокачественных, а стало быть, дешевых видов сырья. Другими авторами [39] в рамках исследования реакции переэтерификации соевого масла в средах метанола и этанола в СКФ условиях реакционной смеси повышенное внимание уделено влиянию воды на уровень конверсии масла в ЭЖК. Исходную смесь (метанол/этанол - соевое масло) в мольном соотношении 40:1 с постепенным добавлением воды (от 0 до 10 % масс) смешивали в смесителе до получения гомогенной дисперсной фазы. Эксперименты проводились при температурах 250 – 350 °С и давлении 20 МПа. В результате проведенных исследований авторы пришли к выводу о том, что наличие воды не уменьшает концентрацию эфиров жирных кислот в продукте реакции, а даже наоборот приводит к их увеличению.

Снижение длительности процесса получения биодизельного топлива за счет сокращения численности этапов технологической схемы еще более усиливается благодаря высокой скорости химической реакции в СКФ условиях. Согласно [40] значения константы скорости реакции для случаев необратимых реакций первого порядка: с кислотным катализатором (и степенью конверсии триглицеридов жирных кислот в 97 %); с щелочным катализатором (97 %); с кислотным гетерогенным катализатором (94 %) и, осуществленного в некаталитическом варианте в СКФ условиях (98 %), соответственно, равны: $2.43 \cdot 10^{-4}$, c^{-1} ; $2.08 \cdot 10^{-4}$, c^{-1} ; $2.60 \cdot 10^{-4}$, c^{-1} ; $3.26 \cdot 10^{-3}$, c^{-1} . В первых трех случаях речь идет о реакциях, осуществленных в традиционных условиях. Высокая степень конверсии при минимальной длительности реакции может иметь место только при условии полной смешиваемости реагентов, достигаемой именно при переходе к СКФ условиям. Дополнительно также стоит отметить, что в СКФ состоянии диэлектрическая проницаемость метанола уменьшается и приближается к диэлектрической проницаемости масла и, следовательно, обе становятся растворимыми друг в друге [41]. Таким образом, ограничения массопереноса, связанные с условиями окружающей среды, могут быть преодолены СКФ условиями для реакционной среды.

Приведенные выше сопоставления дают основание полагать, что переэтерификация триглицеридов жирных кислот в сверхкритических флюидных условиях является привлекательной альтернативой гомогенным каталитическим реакциям, реализуемым в традиционных условиях. Но, в то же самое время необходимо обратить внимание и на то, что в этом случае для достижения максимальных значений конверсии и скорости преобразования реагентов в МЭЖК необходимы высокие температуры (320-350 °С), высокие давления (19-45 МПа) и высокие значения соотношения «метанол/масло» (42:1 и более) [33,36,42,43]. При осуществлении реакций в подобных условиях требуются не только дорогостоящий реактор, но и эффективные схемы рекуперации тепла и, в целом, энергосбережения. Становятся особо важными мероприятия, призванные решать проблемы безопасности труда. А высокие значения соотношения «метанол/масло» требуют значительных энергозатрат на этапе восстановления избыточного метанола и его возвращения на рецикл. Как следствие, окончательные выводы относительно жизнеспособности процесса получения биодизельного топлива с реакцией, осуществляемой в СБКФ или СКФ условиях, могут быть сделаны лишь на основе сопоставительного технико-экономического анализа обсуждаемых процессов: традиционного с щелочным катализатором и некаталитического, для которых решение проблем СКФ состояния может быть дополнено рядом модифицирующих технологию факторов, таких, к примеру, как ультразвуковое эмульгирование реакционной смеси, использование соразтворителя среды реакции, гетерогенного катализатора, проточного реактора, оптимального принципа его

нагрева и других факторов, некоторые из которых подробно будут рассмотрены в рамках данного обзора.

2.1.3. Некаталитическая реакция переэтерификации, осуществляемая в СКФ условиях. Влияние основных факторов на эффективность реакции переэтерификации

Как было упомянуто ранее, для конкурентоспособности рассматриваемой технологии на начальном этапе представляются важными снижение режимных параметров осуществления процесса, уменьшение количества используемого спирта, а где-то и использование, к примеру, более совершенного способа нагрева реакционной смеси. Рассмотрим влияние каждого фактора в отдельности.

1. *Температура.* Температура значимым образом влияет на скорость химического превращения и степень завершенности обсуждаемой реакции. Причем, именно, более высоким температурам соответствуют более высокие значения скорости (рис. 5) и степени завершенности реакции, что обуславливает целесообразность движения по этой траектории.

Эта взаимосвязь особенно очевидна в СКФ области состояния. К примеру, при $P=28,0$ МПа и соотношении «метанол/масло» 42:1, а также росте температуры с 210 °С до 280 °С константа скорости реакции переэтерификации увеличивается до 7 раз [5]. При постоянных значениях давления и соотношения «метанол/масло» в диапазоне температур 200-350 °С, что предпочтительным образом отвечает СКФ-состоянию бинарной системы, содержание МЭЖК в продукте реакции увеличивается до 2-3 раз [5]. Увеличиваются выход продукта и конверсия, снижается длительность химической реакции.

Вместе с тем, даже в температурном диапазоне 320-350 °С может иметь место термическая деградация ненасыщенных жирных кислот [44], что в конечном итоге может отрицательно сказаться на содержании МЭЖК в продукте реакции. Этот эффект будет существенным образом проявляться, прежде всего, в том случае, когда сырье изобилует ненасыщенными жирными кислотами, как это, к примеру, имеет место для соевого масла (более 80 %) [45]. Соответственно, появляется новый фактор, указывающий на целесообразность выбора исходного сырья с преимущественным содержанием ТЖК при минимальном присутствии ненасыщенных жирных кислот. В итоге в случае увязывания понятия подходящей температуры с максимальным присутствием МЭЖК в продукте реакции, в качестве оптимальной температуры рассматривается значение в 270 °С и ниже [45]. В то же время в работе [40] отмечается, что частичная термическая деградация ненасыщенных жирных кислот увеличивает стойкость биодизельного топлива к окислению и в целом при хранении.

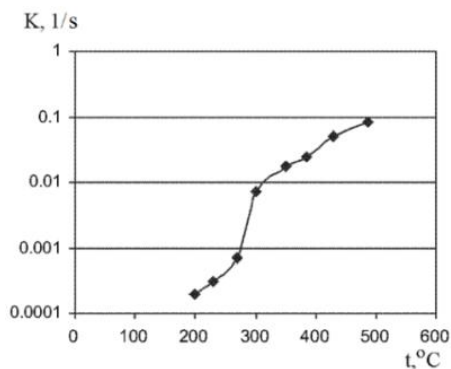


Рис. 5. Температурная зависимость константы скорости реакции переэтерификации рапсового масла, осуществляемой в СбКФ и СКФ условиях для соотношения «метанол/масло», равного 42:1 [37,41].

Fig. 5. Temperature dependence of the rate constant of the reaction of transesterification of rapeseed oil, carried out in SbKF and SCF conditions for a methanol/oil ratio of 42:1 [37,41].

В работе [46] представлены результаты осуществления реакции переэтерификации рапсового масла в средах метанола и этанола в СКФ условиях реакционной смеси. Эксперименты осуществлены при температурах 250, 300 и 350 °С, давлениях 8, 10 и 12 МПа с длительностью реакции в 7, 15 и 30 мин. Для метанольной среды максимальная конверсия рапсового масла в 93 % получена при $t=350$ °С, $P=12$ МПа и длительности реакции - 15 мин. Увеличение длительности реакции до 30 мин в тех же самых условиях приводит к снижению конверсии до 89,9%. Минимальная конверсия в 13,8 % зафиксирована при $t=250$ °С, $P=8$ МПа и длительности реакции в 7 мин. При использовании этанола максимальная конверсия (93,22 %) получена при $t=350$ °С, $P=12$ МПа и длительности реакции 30 мин.

Чтобы понизить температуру реакции, сохранив при этом фазовое состояние реакционной системы, необходимо понизить значение критической температуры этой самой системы, что в свою очередь можно сделать через увеличение соотношения «метанол/масло» или добавление инертного сорастворителя к метанолу.

В рамках интерпретации подобной взаимозависимости через анализ влияния величины соотношения «метанол/масло» на условия достижения состояния полной смешиваемости реагентов в работе [5] отмечается, что реакционная смесь, частично смешиваемая при 350 °С и мольном соотношении, равном 24:1, становится полностью смешиваемой даже при 150 °С (157 °С) и соотношении 40:1 (65:1).

2. *Давление.* Касательно влияния давления на итоговые характеристики процесса получения ЭЖК, на фоне оценки этого эффекта как недостаточно изученного [5] или незначительного [37], имеется и мнение [37] о целесообразности осуществления СКФ - перэтерификации в диапазоне давлений 10-20 МПа.

3. *Мольное соотношение.* И все же, наиболее значимым для экономики обсуждаемого процесса фактором является величина соотношения «метанол/масло». Приемлемые степени конверсии исходного сырья в МЭЖК в рамках реакции, осуществляемой в СКФ-условиях, в большинстве случаев [5, 10, 33-35, 37, 47-49] были достигнуты при значениях мольного соотношения, близких к 42:1 или выше [42, 43]. При этом в работе [48] отмечено, что выход ЭЭЖК оставался постоянным, когда мольное соотношение было увеличено с 42:1 до 60:1. Это наблюдение объясняется следующим образом: этанол и масло в нормальных условиях практически не смешиваются, но с ростом температуры диэлектрическая проницаемость этанола уменьшается, а, следовательно, уменьшается и ее полярность. Благодаря этому растворимость неполярных соединений и масла, в том числе, в этаноле увеличивается. Таким образом, в СКФ условиях масло существенно лучше растворяется в этаноле. Когда мольное соотношение «этанол/масло» достигает значения 42:1, этанол и масло образуют гомогенную смесь. В результате увеличивавшаяся с ростом соотношения скорость реакции достигает некоего предельного при прочих равных условиях значения именно при соотношении 42:1. Как следствие, дальнейшее увеличение количества этанола и не приводит к увеличению количества ЭЭЖК.

Увеличение соотношения «метанол/масло» ведет к росту количества используемого в процессе метанола. Увеличивается и критическое давление бинарной смеси «метанол/масло», а соответственно, и реакционное давление. Как следствие, требуется оборудование больших размеров и, рассчитанное на более высокие значения давления, что в свою очередь обуславливает более высокие капитальные затраты. В части эксплуатационных затрат существенно возрастают энергозатраты на нагрев реагентов и восстановление избыточного метанола с его последующим возвращением на рецикл. В работе [5] приводятся результаты оценок, согласно которым при осуществлении реакций в СКФ-условиях издержки, связанные с рециклом избыточного метанола, превышают энергозатраты на перекачку и нагрев реагентов. А если добавить к этому и экологические проблемы, формируемые также и прежде всего значительными объемами метанола в рецикле, то становится очевидной целесообразность поиска и исследования путей снижения вышеотмеченного соотношения.

Редкие, но имеющие место примеры [43, 49] достижения приемлемых степеней конверсии при малых значениях соотношения «метанол/масло» отражены в таблице 2. Результаты [49], воспринятые первоначально [40] как неожиданные и удивительные, инициировали многочисленные лабораторные исследования в части поиска объяснений и в настоящем начинают подкрепляться новыми фактами [42, 43].

Таблица 2

Характеристики реакции перэтерификации, осуществленной в СБКФ и СКФ условиях, обосновывающие возможность осуществления реакции при пониженных значениях соотношения «метанол/масло»

Режим работы \ Условия	t, °С	P, МПа	Мольн. соотнош. «метанол/масло»	Длительность реакции, мин	Конверсия, % масс	Источник
Проточн.	350-400	12.5-25.0	3:1	2.5	>98	[50]
Период.	300	6.5	10:1	30	100	[51]
Период.	300	0.4	5:1	30	95	[51]
Период.	300	7.5	20:1	30	100	[51]
Период.	300	14.0	10:1	30	100	[51]
Период.	350	14.0	5:1	10	100	[51]
Проточн.	360	20.0	7:1*	35 (10)**	>98	[42]

* - мольное соотношение «этанол/масло».

**- время пребывания реакционной смеси в температурном диапазоне от 175 °С до режимного значения t включительно на этапах разогрева реактора и осуществления реакции (в скобках приведена длительность пребывания реакционной смеси в температурных диапазонах, соответственно, 350-360 °С, 292-298 °С и 255-260 °С).

4. *Способ нагрева.* Еще одним фактором, способным значимо влиять на конечный результат, является принцип нагрева реактора и реакционной смеси [42,43]. Авторы данного обзора на протяжении нескольких лет научной деятельности в данном направлении долго не могли решить проблему оптимального нагрева смеси до СКФ состояния реакционной смеси. На основании опыта проведения исследовательских работ на лабораторных установках периодического действия [50] ими были разработаны технологические схемы и установки лабораторного и пилотного масштабов для получения биодизельного топлива в СбКФ и СКФ условиях реакционной смеси на основе реакторов проточного типа, первым из которых явился обладающий патентной новизной (патент №71117 от 29.10.2007 г.) теплообменно-реакторный блок СК05.1.00.00.000 (рис. 6).

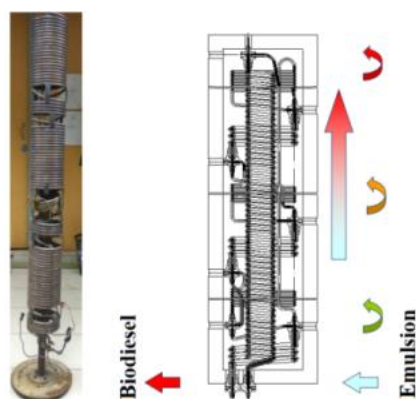


Рис. 6. Теплообменно-реакторный блок пилотной установки проточного типа.

Fig. 6. Heat exchanger-reactor block of the flow-type pilot plant.

В его основе использован осевой нагрев, который заключается в размещении источника тепла внутри его потребителя (теплообменно-реакторного блока). Для этого источник тепла (магнетиальный кабель) располагается коаксиально внутри толстостенной трубки, образуя двухтрубчатый центральный теплообменник. Теплота, излучаемая наружной поверхностью толстостенной трубки, поглощается как самим центральным теплообменником, так теплообменниками и ступенями реактора, расположенными коаксиально снаружи. Для дополнительной интенсификации теплообмена и смешения исходных компонентов перед каждой ступенью реактора установлен статический смеситель типа «Kenics», каждый элемент которого представляет собой стальную ленту, свернутую в спираль и помещенную внутрь толстостенной трубки. Как оказалось позднее, малая поверхность теплообмена в конструкции осевого нагрева реактора не только ограничивает возможности варьирования мощностью реактора, но и не обеспечивает оптимальных скоростей его прогревания. В немалой степени, именно это, а также плохая смешиваемость масла и спирта явились причинами использования высоких и экономически неоправданных соотношений «метанол/масло» (82:1 – 304:1) [42, 43] для достижения приемлемых степеней конверсии. Кроме этого, существовала проблема согласования работы насосов высокого давления с целью обеспечения подачи реагентов в теплообменно - реакторный блок в соответствии с выбранным значением их мольного соотношения. Все это приводило к существенным энергозатратам. В итоге, по прошествии серии экспериментов, осуществлен переход на схему с использованием одного насоса высокого давления с предварительным смешением компонентов вначале в механическом смесителе, а далее с использованием ультразвукового эмульгатора (1 этап модернизации - рисунок 7) с заменой теплообменно-реакторного блока на реактор проточного типа (рис. 8).

На установке проточного типа с двумя вариантами реакторов проведен ряд экспериментов по получению биодизельного топлива в следующих диапазонах режимных параметров осуществления процесса: $T=553-653$ К, $P=20-40$ МПа, длительность процесса= 5–30 мин., мольное соотношение (м.с.) исходных реагентов «этиловый спирт/масло» 5:1 - 52:1 [51]. В первом варианте установки конверсия в 98 % получена при температуре 633 К и мольном соотношении 52:1. После модернизации этой установки конверсия в 98% получена уже при м.с. «спирт/масло» 17:1 и температуре 623 К.

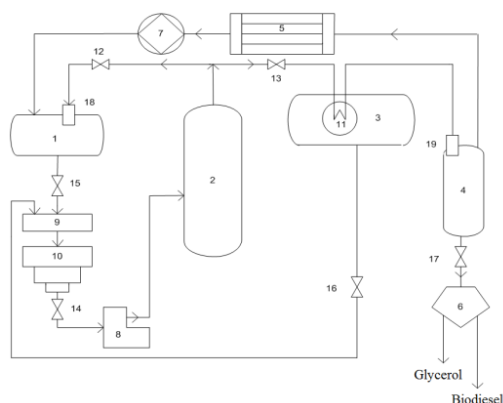


Рис. 7. Принципиальная схема модернизированной установки: 1 – резервуар для спирта; 2 – реактор с прямым нагревом; 3 – резервуар для растительного масла; 4 – термостатируемый задерживающий сосуд; 5 – холодильник; 6 – гравитационно-динамический сепаратор; 7 – вакуумный насос; 8 – насос дозирующий; 9 – смеситель; 10 – УЗ эмульгатор; 11 – теплообменник; 12, 13 – вентиль высокого давления; 14, 15, 16, 17 – вентиль; 18, 19 – регулятор давления.

Fig. 7. Schematic diagram of the upgraded plant: 1 – tank for alcohol; 2 – reactor with direct heating; 3 – tank for vegetable oil; 4 – thermostatically controlled holding vessel; 5 – refrigerator; 6 – gravitational-dynamic separator; 7 – vacuum pump; 8 – dosing pump; 9 – mixer; 10 – ultrasonic emulsifier; 11 – heat exchanger; 12, 13 – high pressure valve; 14, 15, 16, 17 – valve; 18, 19 – pressure regulator.

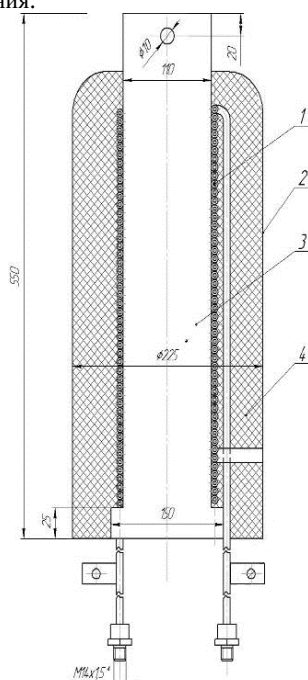


Рис. 8. Реактор модернизированной пилотной установки проточного типа: 1 – реактор; 2 – корпус; 3 – кронштейн; 4 – теплоизоляция.

Fig. 8. Reactor of the upgraded flow type pilot plant: 1 – reactor; 2 – body; 3 – bracket; 4 – thermal insulation.

2.1.4. Ультразвуковое эмульгирование реакционной смеси

Одним из факторов, ограничивающих скорость реакции переэтерификации растительных масел и животных жиров в спиртовой среде в рамках традиционной технологии получения биодизельного топлива, является малая площадь поверхности контакта фаз, обусловленная плохой смешиваемостью реагентов при атмосферном давлении и температурах, близких к комнатным [52, 53]. Для увеличения площади контакта фаз и скорости массопередачи одним из оптимальных решений может явиться эмульгирование реакционной смеси.

Так, авторами [42] на этапе предварительных исследований с использованием установки периодического действия выявлена целесообразность ультразвуковой обработки реакционной смеси перед ее подачей в реактор (рис. 9). При обработке сред высокочастотными звуковыми колебаниями срабатывают, как минимум, два фактора:

акустическая кавитация и акустическая релаксация, благодаря которым наблюдаются интенсивное турбулентное перемешивание, эмульгирование в случае несмешивающихся жидкостей и, в целом, интенсификация тепло- и массообменных процессов.

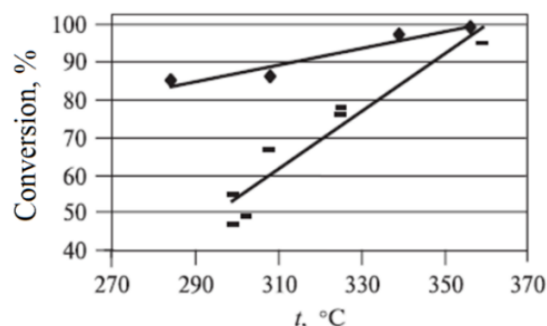


Рис. 9. Влияние предварительной ультразвуковой обработки (22 кГц, 2 кВт) на температурную зависимость величины конверсии пальмового масла в рамках реакции переэтерификации, осуществленной в СКФ условиях (установка периодического действия, мол. с. «метанол/масло» 185:1, длительность реакции 10 мин). ♦ - с ультразвуковой обработкой; ■ - без ультразвуковой обработки.

Fig. 9. Influence of preliminary ultrasonic treatment (22 kHz, 2 kW) on the temperature dependence of palm oil conversion in the framework of the interesterification reaction carried out under SCF conditions (batch unit, mol. wt. "methanol/oil" 185:1, reaction time 10 min). ♦ - with ultrasonic treatment; ■ - without ultrasonic treatment.

В рамках исследований [42, 54-62] проведен анализ зависимости устойчивости получаемой эмульсии от мощности ультразвукового воздействия (75, 100, 150, 200 Вт), длительности ультразвуковой обработки (0,5-3,0 мин), значения мольного соотношения «спирт/масло» (4:1-150:1) и времени выдержки после ультразвуковой обработки [51]. Выявлено, что при атмосферном давлении и комнатной температуре длительность и мощность ультразвуковой обработки при прочих равных условиях не оказывает существенного влияния на устойчивость получаемых эмульсий. В то время как величина мольного соотношения «этиловый спирт/масло» значительно влияет на ее устойчивость. Эмульсия, полученная для смеси с низким значением мольного соотношения «спирт/масло» (4:1, 6:1), сохраняет свою устойчивость, без видимого расслоения, в течение 30 минут и более (рис. 10). А в случае высокого значения мольного соотношения (42:1 и выше) по прошествии 5 минут после завершения ультразвуковой обработки устойчивость составляет лишь около 40 %, снижаясь до 30 % по прошествии 30 минут. При этом, незначительное присутствие воды в спирте способствует более высокой устойчивости спирто-масляной эмульсии. В этом смысле менее чистый этанол в сопоставлении с метанолом более предпочтителен. И вышеотмеченное касается, прежде всего, тех спиртов, для которых характерны водно-спиртовые азеотропы.

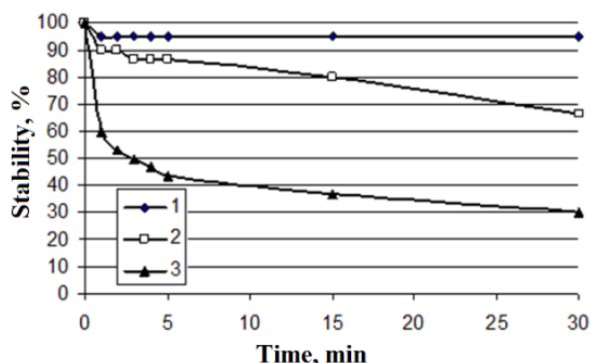


Рис. 10. Устойчивость эмульсии на основе рапсового масла и этанола как функция времени выдержки после 2 минут ультразвуковой обработки (75 Вт) смеси реагентов с мольным соотношением «спирт/масло»: 1 – 4:1; 2 – 18:1; 3 – 42:1.

Fig. 10. The stability of the emulsion based on rapeseed oil and ethanol as a function of the exposure time after 2 minutes of ultrasonic treatment (75 W) of a mixture of reagents with a molar ratio of "alcohol/oil": 1 - 4:1; 2 - 18:1; 3 - 42:1.

Влияние мощности ультразвукового воздействия на качество подготовки реакционной смеси проявляется через степень эмульгирования (в том числе, и до наноразмеров дисперсной частицы), которая определяет устойчивость формируемой эмульсии и величину поверхности контакта фаз. Этап эмульгирования смеси исходных реагентов введен и в последовательность операций на пилотной установке непрерывного действия с проточным реактором [42,43]. На рисунке 11 приведена температурная зависимость величины конверсии пальмового масла в рамках реакции переэтерификации, осуществленной в СбКФ-СКФ условиях на проточной установке непрерывного действия с ультразвуковой обработкой исходной смеси при мольном соотношении «этанол/масло» 7:1, показывающая высокую конверсию пальмового масла при относительно умеренных температурах проведения процесса.

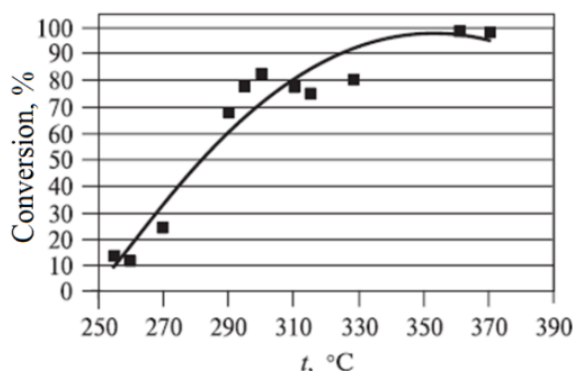


Рис. 11. Температурная зависимость величины конверсии пальмового масла в рамках реакции переэтерификации, осуществленной в СбКФ-СКФ условиях (проточная установка непрерывного действия, мольное соотношение «этанол/масло» 7:1, ультразвуковая обработка исходной смеси, длительность реакции в диапазоне 350-360 °C – 10 мин).

Fig. 11. Temperature dependence of the value of palm oil conversion in the framework of the interesterification reaction carried out under SbCF-SCF conditions (continuous flow unit, ethanol/oil molar ratio 7:1, ultrasonic treatment of the initial mixture, reaction duration in the range of 350-360 °C - 10 min).

Singh и др. [63] также констатируют значительное уменьшение длительности реакции и беспрецедентную эффективность преобразования за короткое время реакции; ими показано, что с помощью ультразвуковой обработки в реакторе периодического действия выход биодизельного топлива, превышающий 99 %, может быть достигнут за удивительно короткую длительность реакции в пять минут. Stavarache с соавторами [57] подсчитали, что при применении высокочастотного ультразвука (40 кГц) скорость переэтерификации увеличивается в разы. Как следствие, несколько новых заводов по производству биодизельного топлива уже используют технологию ультразвуковой обработки.

2.1.5. Использование соразтворителя основной среды реакции

Как отмечалось ранее, для проведения реакции в СКФ условиях необходимо снижать критическую температуру реакционной смеси, а стало быть, и температуру реакции не только за счет увеличения соотношения «спирт/масло», но и через добавление соответствующего соразтворителя в среду реакции. Речь идет, прежде всего, об инертном соединении, присутствие которого не окажет влияния на механизм реакции, а критическая температура бинарной системы «спирт-соразтворитель» окажется меньшей по величине той, что характерна для чистого спирта. При этом, функции соразтворителя не ограничиваются лишь задачей улучшения взаимной растворимости реагентов, а распространяются и на выполнение таких назначений, как разжижение жировой компоненты, замедление процесса термического разложения ЭЖК и другие.

В перечень веществ, исследуемых с точки зрения возможности их использования в качестве соразтворителей, входят такие, как диоксид углерода, пропан, гексан, тетрагидрофуран и некоторые другие [5,37]. Причем, предпочтения к первым двум представителям этого перечня обусловлены в немалой степени тем фактом, что, будучи газообразными при комнатных условиях, они легко могут быть отделены от избыточного метанола или продукта реакции лишь простым расширением. Тогда как, в случае «жидких» соразтворителей, к каковым относятся гексан и тетрагидрофуран, задачи восстановления и рецикла метанола и соразтворителя существенным образом усложняются, чему

способствует и близость точек кипения (для метанола (64,7 °С), гексана (68,8 °С) и тетрагидрофурана (66,0 °С).

Традиционно присутствие соразтворителя ограничивается незначительным его количеством (к примеру, в работах [64, 65] на 1,0 моль метанола приходится 0,10 моли CO₂ или 0,05 моли пропана). Ибо, как отмечается в работе [5], избыточное количество соразтворителя в реакционной среде вызывает снижение степени завершенности реакции по причине разбавления метанола и блокирования реагентов.

Эффект от добавления соразтворителя и, прежде всего диоксида углерода, представляется весьма существенным. Высокие степени конверсии достигаются при заведомо умеренных с точки зрения энергозатрат условиях осуществления химической реакции, среди которых следует особо выделить низкое значение мольного соотношения «спирт/масло». В работе авторов [66] переэтерифицировали прессованные волокна пальмового масла при следующих условиях: мольное соотношение «этанол/масло» 20:1, 40:1; температуры в диапазоне 150-350 °С; давление 20 МПа с добавлением CO₂ в качестве соразтворителя в количестве 0,7-5,31 г при длительности реакции - 10-60 мин. Наибольший выход (99,93 % ЭЭЖК) наблюдался при мольном соотношении 40:1, 350 °С в течение 60 мин. Оптимальный выход (96,58 % ЭЭЖК) наблюдался при мольном соотношении 20:1, температуре 150 °С и времени реакции - 40 минут.

В то же самое время следует отметить, что в работе [48] эффект от добавления диоксида углерода оценен как менее значимый. С чисто термодинамической точки зрения последнее представляется более логичным, так как мольной фракции метанола, соответствующей вышеотмеченному присутствию CO₂ в среде реакции, отвечает критическая температура бинарной системы весьма близкая к той, что характерна для чистого метанола.

В работе [67] приведены результаты моделирования промышленного процесса получения биодизельного топлива с реакционной средой «метанол-пропан», находящейся в СКФ состоянии. Сопоставление технико-экономических показателей этой модели с характеристиками моделей, основанных на традиционных процессах с щелочным и кислотным катализаторами, выявило преимущества и перспективность инновационного подхода.

И, наконец, обратим внимание на важный вывод [5] об отсутствии единой термодинамической модели для всего процесса в целом, которое, по всей видимости, обусловлено разностью полярностей реакционной системы в начальном и конечном состояниях.

2.1.6. Каталитическая реакция переэтерификации, осуществляемая в СКФ условиях с использованием гетерогенного катализатора

Возвращаясь к обсуждению результатов, полученных в [42,43,68], нельзя не отметить и возможное влияние каталитической активности стенок реактора. В частности, в работе [69] в рамках исследования процесса субкритического метанолиза было установлено, что различия в значениях конверсии для реакторов, изготовленных из стекла и из нержавеющей стали, существенно превысили возможную погрешность результатов измерений. Последнее и подобные этому результаты явились основанием для изучения возможности использования гетерогенных катализаторов в целях интенсификации реакции переэтерификации, осуществляемой в СКФ условиях. Речь идет, прежде всего, о гетерогенных катализаторах, поскольку именно в этом случае удастся избежать проблем последующей очистки продукта и переработки формируемых в процессе отходов, характерных для случая использования гомогенных катализаторов в традиционном процессе получения биодизельного топлива. Применение гетерогенных катализаторов выгодно отличают простота их отделения, а также возможности регенерации и повторного использования. Гетерогенные катализаторы преобразуют триглицериды жирных кислот в ЭЖК медленнее, чем гомогенные, но за счет того, что они могут быть повторно использованы, такой процесс становится экономически целесообразным [70]. Для гетерогенного катализа процесс получения высоких конверсий растительных масел в биотопливо достаточно значимо увязан с условиями осуществления процесса: температурой, количественным присутствием катализатора, режимом смешения, мольным соотношением «спирт/масло», наличием/отсутствием примесей в сырье и длительностью реакции.

В качестве гетерогенных катализаторов для обсуждаемой реакции можно использовать оксиды щелочных [71-73], щелочноземельных [74-78] и переходных [79,80] металлов и их производные; смешанные оксиды металлов и их производные [81-83]; катализаторы борной группы [84,85]; катализаторы углеродной группы [86,87]; цеолиты

[88,89] и катализаторы на основе отходов [90-93]. К гетерогенным кислотным катализаторам причисляют сульфатированные оксиды [94-97] и катионообменные смолы кислотного типа [98-100]. К примеру, использование гетерогенных катализаторов [73] при 250 °С и СбКФ состоянии бинарной системы «метанол/соевое масло» константа скорости реакции переэтерификации в присутствии нанooksида магния увеличивается с $4.20 \cdot 10^{-4}$ 1/с до $4.72 \cdot 10^{-3}$ 1/с (в 11,2 раза).

В других работах [101-109] произведена оценка по оксидам металлам на конверсию рапсового масла в биодизельное топливо. Эксперименты по каталитической переэтерификации проводились в температурном диапазоне 623-653 К, при мольных соотношениях 12:1–20:1 продолжительностью 30 минут с использованием гетерогенного гранулированного катализатора Al_2O_3 и синтезированного на его основе $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с различными степенями пропитки носителя (1 % - 5 %) в количестве 2 % масс. от исходной смеси (рис. 12,13).

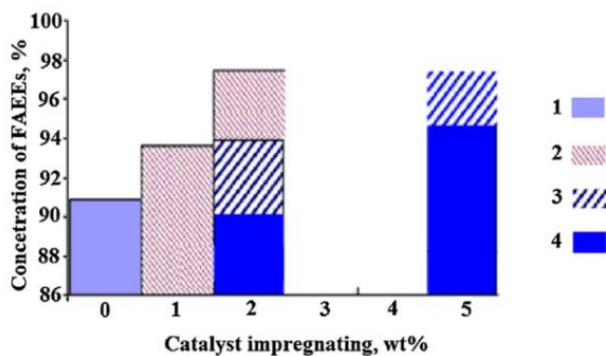


Рис. 12. Концентрация ЭЭЖК в продукте реакции при использовании катализаторов с различными степенями пропитки: $T=623$ К, $P=30$ МПа, мольное соотношение «спирт/масло» 12:1. Концентрация в отсутствии катализатора = 77.51 %: 1 – Al_2O_3 ; 2 – $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 3 – $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 4 – $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Fig. 12. The concentration of FAEE in the reaction product when using catalysts with different degrees of impregnation: $T=623$ K, $P=30$ MPa, alcohol/oil molar ratio 12:1. Concentration in the absence of catalyst = 77.51%: 1 – Al_2O_3 ; 2 – $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 3 – $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 4 – $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

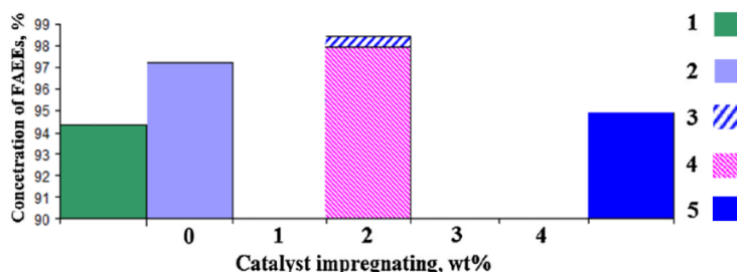


Рис. 13. Концентрация ЭЭЖК в продукте реакции при использовании катализаторов с различными степенями пропитки: $T=638$ К, $P=30$ МПа, мольное соотношение «спирт/масло» 18:1: 1 – without catalyst; 2 – Al_2O_3 ; 3 – $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 4 – $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 5 – $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Fig. 13. The concentration of FAEE in the reaction product when using catalysts with different degrees of impregnation: $T=638$ K, $P=30$ MPa, alcohol/oil molar ratio 18:1: 1 – without catalyst; 2 – Al_2O_3 ; 3 – $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 4 – $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$; 5 – $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Для реакции, осуществленной при $T=623$ К и мольном соотношении «спирт/масло» 12:1 с использованием гетерогенного катализатора, установлен заметный рост (до 20 %) концентрации ЭЭЖК в продукте реакции в сопоставлении с некаталитическим вариантом реакции. При более высоких мольных соотношениях (18:1) и повышенной температуре (653 К) не наблюдалось существенного роста (лишь около 4 %) концентрации ЭЭЖК. Каталитические свойства Al_2O_3 в ряду исследованных катализаторов оказались наименее предпочтительными. При 5 % пропитке катализаторы $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ при мольном соотношении 12:1 и температуре 623 К более эффективны, нежели в случае 2 % пропитки. Использование катализатора $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ дает больший выход целевого продукта, нежели при использовании $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Содержание ЭЭЖК при использовании катализатора $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ с 2 % содержанием оксида стронция по сравнению с использованием

катализаторов $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2 %) и $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2 %) дает большее значение в плане целевого продукта (97,46 %), что сопоставимо с использованием $\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (5 %), где также достигается высокий выход (97,45 %). Тем самым, применение $\text{SrO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в качестве катализатора, по заявлению авторов, может явиться перспективным решением для процесса получения биодизельного топлива.

В работе [110] переэтерификация масла *Madhuca Indica (Mahua)* в среде метанола с использованием в качестве катализатора ZnO , включая различные модификации, осуществлена в температурном диапазоне 503-583 К для фиксированного мольного соотношения «спирт/масло», равного 40:1. Количество использованного катализатора изменялось в диапазоне от 0,5 до 3,0 % масс. Конверсия в 90 % и более получена в течение часа с использованием ZnO-AA и ZnO-GLY . Установлено, что выход целевого продукта увеличивается с увеличением длительности реакции. К примеру, конверсия триглицеридов жирных кислот в рамках реакции с гетерогенным катализатором ZnO-NR при увеличении длительности реакции с 2 до 45 минут возрастает с 10 % до 98 %. В случае использования в качестве катализатора ZnO-AA конверсия в 90 % в рамках реакции, осуществленной при $T=503$ К, достигается за 65 минут, тогда как более высокая степень конверсии (более 95 %) достигнута при $T=583$ К и длительности реакции в 20 мин. Отметим, что в одном из некаталитических вариантов осуществления реакции переэтерификации длительностью в 30 минут, осуществленной при $T=623$ К и $P=30$ МПа, достигнута конверсия лишь в 89 %.

В таблице 3 приведены работы и характеристики процесса переэтерификации растительных масел (подсолнечного [111], соевого [68], рапсового [109]), осуществленных в СБКФ и СКФ условиях с использованием и в отсутствие гетерогенного катализатора.

Таблица 3

Характеристики процесса переэтерификации растительных масел, осуществленных в СБКФ и СКФ условиях с использованием и в отсутствие гетерогенного катализатора

Условия Режим работы	Катализатор	T, К	P, МПа	Мол. соот. «метанол/ масло»	Длительн. реакции, мин	Конвер- сия, %	Источ- ник
Период.	CaO	525	-	41:1	6	98	[111]
Период.	Отсутствует	525	-	41:1	27	98	[111]
Период.	MgO-нано	523	24	36:1	10	96	[70]
Период.	Отсутствует	523	24	36:1	30	95	[70]
Проточ.	$\text{ZnO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	623	30	12:1	30	97,45	[108]
Проточ.	$\text{Sr}/\text{Al}_2\text{O}_3$	623	30	12:1	30	97,46	[108]
Проточ.	Отсутствует	623	30	12:1	30	77,51	[108]

2.1.7. Получение биодизельного топлива без свободного глицерина

В современном производстве биодизельного топлива не до конца решена проблема утилизации освобождающегося глицерина. Если в 2003 г. его количество оценивалось в 200000 тонн, то к 2025 году прогнозируется, что этот показатель возрастет до 6 миллионов тонн. Побочный продукт производства биодизельного топлива - сырой глицерин, в составе которого имеются примеси, требует очистки и имеет низкую стоимость. По материалам работы авторов [112], глицерин с примесями образует эмульсию Пикеринга, рафинирование которой связано с кислотно-основным титрованием, нейтрализацией, отстаиванием, атмосферной или вакуумной дистилляцией, адсорбцией и фильтрацией и, по некоторым оценкам, экономически нецелесообразно. Это заставляет многих производителей биодизельного топлива рассматривать сырой биодизельный глицерин как отход. В настоящее время ведутся исследования эффективных методов утилизации сырого глицерина. Авторами работы [112] разработан новый подход к получению биодизельного топлива, сочетающий алкоголиз триглицерида с кетализацией глицерина низшими карбонильными соединениями или их кеталями. Модельный процесс получения биодизельного топлива без свободного глицерина осуществлен на примере рапсового масла с использованием кислотных катализаторов, а также без катализатора в среде этанола и сверхкритических флюидных условиях, где, помимо ожидаемых циклических кеталей, обнаружено образование моноалкиловых эфиров глицерина.

Итак, одним из возможных вариантов использования биодизельного глицерина является осуществление комбинированного процесса, сочетающего алкоголиз триглицерида с кетализацией глицерина. Аналогично diketалам моносахаридов гемицеллюлозы, циклические кетали, образующиеся в результате конденсации глицерина с низшими карбонильными соединениями (ацетон, метилэтилкетон, ацетальдегид и т. п.),

обнаруживают комплекс свойств, позволяющих рассматривать их как новый вид жидкого биотоплива. Добавки циклических кеталей к спиртосодержащим бензинам обеспечивают повышение октанового числа и увеличение фазовой стабильности, в дизельных топливах они снижают дымность, уменьшают термоокислительные превращения, проявляют антиобледенительный эффект [113].

Дополнительные возможности в реализации комбинированного процесса открывает использование этанола в сверхкритических условиях. Авторами [112,114] в системе триглицерид : ацетон : этанол 1:2:4 при 350 °С и давлении 30 МПа за 30 мин удалось получить 75 % конверсию триглицерида. В гомогенной реакционной массе, помимо ожидаемых этилкарбоксилатов (биодизельное топливо) и диоксолана (1), методом хромато-масс-спектрометрии обнаружены еще несколько производных глицерина – 2-метил-4-гидроксиметил-1,3-диоксолан (3), моноэтиловый (5) и моноизопропиловый (6) эфиры глицерина, глицидиловый спирт и дигидроксиметилдиоксан (рис. 14).

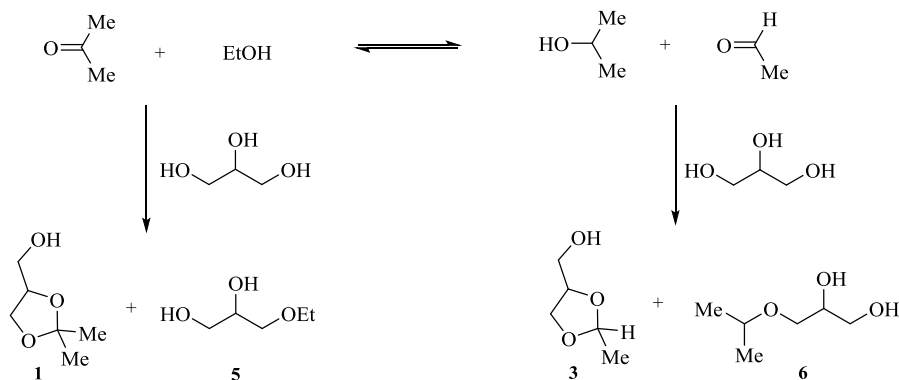


Рис. 14. Схема образования побочных продуктов при проведении реакции в СКФ условиях

Fig. 14. Scheme of the formation of by-products during the reaction under SCF conditions

Такой набор продуктов указывает на осуществление более сложной, чем в обычных условиях, цепи превращений, включающей обменное редокс-взаимодействие между этанолом и ацетоном с образованием новой пары спирт – карбонильное соединение и ее участие в процессе.

Также обнаружено, что в отличие от реакции, проводимой в традиционных условиях, СКФ процесс не ограничивается образованием этилбутирата. Помимо этого ожидаемого продукта, наблюдается образование диэтил-орто-бутирата, соответствующего присоединению молекулы этанола по карбонильной группе эфира. Можно предположить, что такие орто-эфиры являются интермедиатами в превращениях заведомых ЭЭЖК в сверхкритическом этаноле, приводящих к многокомпонентным смесям более высоких гомологов жирных кислот в результате этилирования. Полученные в условиях СКФ многокомпонентные смеси, содержащие, помимо исходных ЭЭЖК, эфиры образующихся *in situ* жирных кислот, можно рассматривать как легкий аналог биодизельного топлива и использовать без разделения на компоненты [112,114].

Другими исследователями проведены различные исследования по превращению глицерина в такие ценные продукты, как карбонат глицерина [115, 116] и солкеталь [117-120]. Солкеталь является одним из наиболее полезных производных глицерина, полученных путем кислотного-катализируемой конденсации глицерина с ацетоном [121].

Так, авторами [122] проведены исследования с последовательным получением метилацетата и солкеталья при мольном соотношении метанола к триацетину 6:1, ацетона к глицерину 4:1, температуре 50 °С и длительности реакций 2,5-35 мин. Для изучения прямых реакций глицерина с ацетоном использован AmberlystTM 70-SO₃H. Через 25 минут реакции метанола и триацетина, последний превращался в 99,1 ± 2,0 % метилацетата. После этого следовало реактивное соединение глицерина с ацетоном. Конверсия глицерина в солкеталь быстро увеличивалась с 46,9 ± 2,7 % через 5 минут до 74,0 ± 1,8 % через 20 мин пребывания в реакторе, а затем наблюдалось лишь медленное увеличение и за 35 мин реакции конверсия в солкеталь достигала 76,5 ± 2,8 %, что снижало содержание глицерина на выходе целевой реакции примерно на 76 %. Результаты этого исследования показали, что реактивное связывание глицерина и ацетона может быть осуществлено в присутствии метанола, что согласуется с сообщениями и иных авторов [123]. Таким образом, в

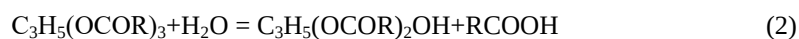
результате осуществления этого процесса получают биодизельное топливо и солкеталь, которые являются горючими топливными композициями и не требуют разделения на выходе после извлечения избытка метанола и ацетона.

Следует обратить внимание и на тот факт, что многие исследователи при высоких температурах осуществления реакции переэтерификации наблюдали термическое разложение ЭЖК и глицерина [124,125]. Ими обнаружено, что термическое разложение цепей ненасыщенных жирных кислот возникает в СКФ условиях проведения реакции переэтерификации при температурах, превышающих 573-598 К; для этиловых эфиров олеиновой кислоты термическое разложение зафиксировано при температурах выше 648 К [126].

При осуществлении реакции в подобных температурных диапазонах и при длительной непрерывной циркуляции продукта реакции глицерин разлагается [127,128]. В ходе реакции он начинает реагировать с избыточным спиртом, образуя при этом эфиры глицерина и воду:

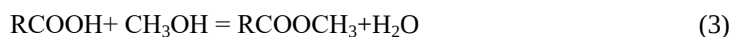


Образующаяся вода по реакции гидролиза взаимодействует с триглицеридами жирных кислот (ТЖК) с образованием диглицеридов жирных кислот (ДЖК) и свободных жирных кислот (СЖК):



где R – длинные углеводородные цепи жирных кислот.

При более длительной реакции СЖК превращаются в сложные эфиры:



Таким образом, в ходе реакции глицерин преобразуется в этиловые эфиры глицерина, воду и эфиры жирных кислот с меньшим молекулярным весом. Наличие этих эфиров снижает общую вязкость топлива, что улучшает качество самого биодизельного топлива [129]. Наличие глицерина в продукте реакции уменьшается с 10 % в классическом катализируемом щелочами процессе до 0,1 % в СКФ процессе [51]. Результаты показывают, что процесс, проводимый в СКФ условиях, может производить биодизельное топливо, которое соответствует требованиям международных стандартов к содержанию глицерина, имеющим ограничения в 0,24 % по массе к получаемому продукту, и при этом не требуется производить дополнительной очистки продукта реакции от глицерина. Тем самым, разложение глицерина приводит к тому, что механизм реакции, проводимой в СКФ условиях, несколько отличается от механизма реакции, проводимой при обычных условиях и может быть записан в виде:



2.1.8. Сырьевая база для процесса получения биодизельного топлива

Одним из наиболее перспективных видов сырья для получения биодизельного топлива еще в начале 2000-х годов считалось рапсовое масло. Как отмечалось в работе [12], агрохозяйство, обладающее посевной площадью 100 га, может полностью обеспечить себя топливом, если 10÷12 га из них отведёт под озимый рапс. Даже при достаточно низкой урожайности в 2,5 т/га с этой площади можно было собрать 25÷30 тонн семян и получить из них 8÷10 тонн масла. С добавлением нефтяного дизельного топлива из этого объёма масла вышло бы 10÷12 тонн биотоплива, чего в принципе хватило бы для проведения всех сельскохозяйственных работ на этих 100 га. Если же поднять урожайность рапса (в странах ЕС, к примеру, она заметно выше приведённого уровня), то в хозяйстве появятся даже товарные излишки горючего. Однако, на фоне острой проблемы нехватки питания в мире международным сообществом было признано негуманным производство топлив из пищевых продуктов. И выход был найден. Микроводоросли по своим показателям значимым образом превосходят характеристики практически всех существующих в природе масличных культур. К примеру, если в случае рапса с гектара земли в год можно получить лишь около ~1190 литров масла, то, выращивая микроводоросли, можно довести этот показатель до ~95000 литров с одного гектара в год. Как следствие, рапсовое масло для

многих исследователей стало выполнять роль модельной системы в процессе исследований и отработки методов получения биодизельного топлива.

Одним из преимуществ использования микроводорослей является возможность влияния на химический состав получаемых из неё экстрактов путём изменения условий их выращивания (температура, освещение, pH и концентрация диоксида углерода, солей и питательных веществ в среде выращивания). Для производства биомассы из микроводорослей необходимы источник света, углекислый газ, вода и неорганические соли. Для роста большинства микроводорослей оптимальным является температурный диапазон 293÷303 К. В качестве источника света представляется разумным использовать бесплатный солнечный свет. Авторы работы [130] считают, что выращивание микроводорослей в сельских пахотных районах, может способствовать снижению стоимости производства биодизельного топлива из микроводорослей. Более того, они считают, что возможно снижение стоимости и потребления энергии при производстве биодизельного топлива из водорослей благодаря разработкам новых и современных технологических принципов, а также налоговых послаблений для биоэнергетики [130].

К основным проблемам в настоящем и в то же самое время перспективным направлениям развития производства биодизельного топлива из масла микроводорослей в будущем относятся вопросы предпочтительных условий культивирования биомассы, доступные технологии ее сбора и методы извлечения из нее липидов [131].

В качестве примера использования масла микроводорослей при получении биодизельного топлива можно привести работу [132] в рамках которой 99 %, выход МЭЖК получен с использованием каталитической реакции, осуществленной при температуре 80°C, при мольном соотношении «метанол/масло» 30:1, длительности реакции 3 ч и 3 % масс содержания наночастиц метоксида кальция, используемых в качестве катализатора.

2.1.9. «Вязкостная корреляция» состава продукта реакции

ольшинство работ по оценке конверсии растительных масел и животных жиров в биодизельное топливо оценивается путем хромато-масс-спектрометрии. Зачастую хроматографический метод требует больших затрат времени, денежных средств (высокая стоимость приборов) и сложен в определении содержания ЭЖК в продукте реакции. Наличие некоего экспресс-метода полезно и даже необходимо и не только в рамках задачи получения биодизельного топлива. В этом качестве может выступить вискозиметрия. DeFillipis и соавторы [133] впервые рассмотрели вискозиметрию в качестве потенциальной основы аналитического метода оценки концентрации метиловых эфиров жирных кислот в образцах продукта реакции переэтерификации. Ими было предложено корреляционное выражение: «динамическая вязкость (η) - концентрация МЭЖК» для образцов, полученных на основе соевого масла:

$$\text{МЭЖК (\%)} = a * \ln \eta + b \quad (5)$$

где η – динамическая вязкость, МПа*с; a, b – константы, зависящие от типа используемого масла (рапсовое, соевое и т.д.) и температуры.

Позже иными авторами [134] для случая того же соевого масла и метанол/этанольной реакционной среды получены корреляционные зависимости с участием кинематической вязкости образцов продукта реакции:

$$\text{МЭЖК (\%)} = 152 * \exp\left(-\frac{v}{9.8}\right) \quad (6)$$

$$\text{ЭЭЖК (\%)} = 160 * \exp\left(-\frac{v}{9.0}\right) \quad (7)$$

где v – кинематическая вязкость, мм²/с.

Корреляции, предложенные в работах [182,183], получены для образцов биодизельного топлива, произведенных в рамках гомогенной каталитической реакции, осуществленной при атмосферном давлении и температурах 333-343 К.

Позже авторами [135-137] предложена «вязкостная корреляция» содержания ЭЭЖК в образцах продукта реакции переэтерификации, но уже осуществленной в СКФ условиях и определена как функция кинематической вязкости этих образцов:

$$W = A * \ln(v) + B \quad (8)$$

$$v = \exp\left(\frac{W}{A} - C\right) \quad (9)$$

где W – концентрация ЭЭЖК в образце продукта реакции, масс. %; ν – коэффициент кинематической вязкости образца продукта реакции, $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; A, B, C – подгоночные эмпирические параметры: $A = -49.392473$, $C = -3.513642$, $C = B/A$.

Функциональная зависимость (9) аналогична той, что ранее [134,138] установлена для продукта той же самой реакции, но осуществленной в традиционных условиях (при атмосферном давлении и температурах относительно близких к комнатной температуре). Значения констант уравнения (9) определены с помощью линейной аппроксимации вязкостно-концентрационной зависимости для гипотетических образцов продукта реакции, в которых отсутствует спиртовая компонента (рапсовое масло и ЭЭЖК).

По словам авторов [135-138], наблюдается хорошее согласие между концентрациями ЭЭЖК, найденными по вязкостной корреляции и ИК-масс-спектрометрии для всего измеренного диапазона параметров. Но при этом заметны значительные расхождения между концентрациями ЭЭЖК, полученными по «вязкостной корреляции» и хроматографическому анализу при мольных соотношениях этанола к рапсовому маслу 6:1 - 10:1 и 12:1 (температуры 623 К и 638 К). В итоге, причиной такого несоответствия явилось наличие непрореагировавшего рапсового масла, растворенного в образцах биодизельного топлива. Как известно [139,140], вязкость триглицеридов жирных кислот, содержащихся в рапсовом масле, выше вязкости эфиров соответствующих жирных кислот. Так и в работе авторов [134], в образцах биодизельного топлива, полученных из рапсового масла, наблюдалось расхождение в значениях, полученных по вязкостной корреляции и хроматографии, особенно для образцов, содержащих жирные кислоты в продукте реакции. Таким образом, можно заключить, что применимость данной методики может быть распространена на образцы топлива, в которых отсутствует или крайне мало количество непрореагировавшего масла.

2.2. Двухстадийный процесс получения биодизельного топлива, осуществляемый в СКФ условиях

Еще одной возможностью для осуществления реакции в более «мягких» режимных условиях и улучшения экономических показателей СКФ-процесса получения МЭЖК является использование, так называемого, двухстадийного процесса, который в 2004 году разработали и осуществили японские исследователи S. Saka и D. Kusdiana, и в последующем получивший название «Saka – Dadan» - процесс [141]. Общий вид процесса схематически представлен на рисунке 15.

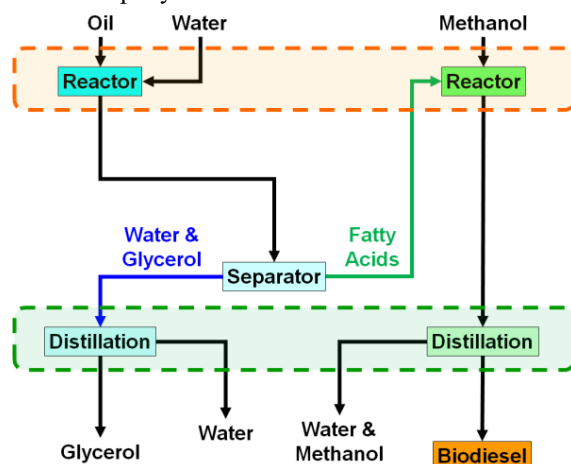


Рис. 15. Двухступенчатое некаталитическое получение биодизельного топлива

Fig. 15. Two-stage non-catalytic biodiesel production

На первом этапе исходные ТЖК подвергаются гидролизу в среде субкритической воды с преобразованием их в свободные жирные кислоты. И лишь на второй стадии в СБКФ-СКФ условиях промежуточный продукт (СЖК) этерифицируется до МЭЖК и воды. В целом, режимные параметры осуществления двухстадийного процесса ($t=275-290$ °С, $P=10-11$ МПа, «метанол/масло» = 10:1) [142] оказываются более «мягкими» нежели то, что имеет место в большинстве реализаций одностадийного процесса ($t=270-350$ °С, $P=14-40$ МПа, «метанол/масло» = 42:1). Что согласно [142] обуславливает возможность 25 % сокращения энергозатрат при переходе к двухстадийному процессу. К недостаткам этого процесса относят ее большую стадийность и повышенную сложность в эксплуатации, а также потребность в нагреве большого количества воды на первой стадии.

Большинство исследовательских реализаций двухстадийного процесса все же осуществлено в интервале температур 250-320 °С [141, 143-146]. В работе [143] получен >90 % выход метилового эфира для некаталитической метиловой этерификации олеиновой кислоты менее чем за 10 минут при $t=320$ °С. С другой стороны, при некаталитической переэтерификации рапсового масла при тех же условиях получено только 30 % сложных метиловых эфиров. И более того, увеличение длительности реакции до 30 минут приводит лишь к 65 % выходу. В итоге, авторы утверждают, что этерификация происходит намного быстрее, чем переэтерификация. Если в случае некаталитической этерификации высокий выход метилового эфира (> 90 %) получен с использованием мольного соотношения, равного лишь 3:1, то для некаталитической переэтерификации требуется десятикратное увеличение мольного соотношения для достижения того же выхода.

Заключение

Переэтерификация, осуществляемая в СКФ условиях, предоставляет значимые преимущества в сопоставлении с традиционным процессом и, особенно, в части возможности использования разнообразного и, в том числе, низкокачественного сырья, облегчает процедуру выделения конечного продукта и, наконец, делает возможным переход от относительно маломасштабных реализаций с реакторами периодического действия к высокопроизводительным установкам с проточными реакторами.

В качестве промежуточного вывода относительно путей и методов снижения режимных параметров осуществления процесса получения ЭЖК в СБКФ-СКФ условиях можно отметить следующее: необходим детальный анализ условий и причин достижения приемлемых значений конверсии при режимных параметрах осуществления процесса, отвечающих требованиям экономической целесообразности. В частности, методы подготовки реакционной смеси, а также вопросы каталитической активности стенок реактора или использования гетерогенных катализаторов, фигурирующие в основах вышеотмеченных достижений, должны быть предметами новых исследований. В значительной степени открыт вопрос разработки и использования высокоэффективных технических решений в области тепло- и массообменных контактных устройств для несмешивающихся жидкостей. Последнее важно вдвойне, так как в подавляющем большинстве случаев процессы получения биодизельного топлива осуществлены в до- или субкритических флюидных условиях реакционной смеси. Необходимо обратить внимание и на то, что нередко исследователи заблуждаются, характеризуя состояние, по сути, двухфазной системы, как сверхкритическое флюидное, исходя лишь из условий, отвечающих СКФ состоянию спиртовой компоненты (к примеру, метанола).

В результате термического разложения триглицеридов жирных кислот, эфиров ненасыщенных жирных кислот и глицерина образуются, в том числе, и низкомолекулярные соединения, улучшающие текучесть биодизельного топлива при пониженных (сезонных) температурах. Далее, как ранее уже отмечалось, частичная термическая деградация ненасыщенных жирных кислот увеличивает стойкость биодизельного топлива к окислению и при хранении в целом. В обсуждаемых условиях глицерин превращается в топливную композицию, увеличивая тем самым совокупный выход биодизельного топлива, что вполне можно рассматривать как альтернативный способ увеличения рентабельности процесса получения биодизельного топлива. Насыщенность глицеринового рынка и наблюдаемое снижение цен на глицерин обосновывают относительную безубыточность снижения выхода глицерина в процессе получения биодизельного топлива.

Благодарность. Результаты исследований по работам авторского коллектива проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Литература

1. Cvengrosova Z., Cvengros J., Hronce M. Rapeseed oil ethyl esters as alternative fuels and their quality control. *Petroleum and Coal*. 1997. V. 39. P. 36-40.
2. Wevten H., Willems L., Adriansen W., Van Ginneken L. Transesterification reaction of vegetable oil in supercritical methanol. *Proc. of the 8 th Meeting on Supercritical Fluids*. Bordeaux (France). 2002. V 1. P. 139-144.
3. Марченко Г.Н., Алтынбаева Э.Р. Перспективы использования новых видов топлива и развития возобновляемых источников энергии // *Вестник КГЭУ*. 2010. №4. С. 6-13.

4. Моисеев И., Тарасов В., Трусов Л. Эволюция биоэнергетики. Время водорослей // The Chemical Journal. 2009. №12. С.24-29.
5. Sawangkeaw R., Bunyakiat K., Ngamprasertsith S. A review of laboratory-scale research on lipid conversion to biodiesel with supercritical methanol (2001–2009). J. of Supercritical Fluids. 2010. Vol. 55. P. 1-13.
6. Coronado C.R., de Carvalho J.A. Jr., Silveira J.L. Biodiesel CO₂ emissions: a comparison with the main fuels in the Brazilian market. Fuel Processing Technology. 2009. V. 90. P. 204–211.
7. Hu Z., Tan P., Yan X., Lou D. Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China. Energy. 2008. V. 33. P. 1654–1658.
8. M.C. Math, S.P. Kumar, S.V. Chetty. Technologies for biodiesel production from used cooking oil — A review. Energy for Sustainable Development. 2010. V.14. №4. P. 339–345.
9. J.M. Marchetti, V.U. Miguel, A.F. Errazu. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007. №11. P.1300–1311.
10. Glisic S., Skala D. The problems in design and detailed analyses of energy consumption for biodiesel synthesis at supercritical conditions. J. of Supercritical Fluids. 2009. V. 49. P. 293–301.
11. Ma F., Hanna M.A. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology. 1999. V. 70. P. 1–15.
12. Газизов Р.А., Билалов Т.Р., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р., Яруллин Р.С. Биодизель вплотную подошел к российским границам // Нефть и Капитал. 2002. № 1. С. 72-74.
13. Д.С. Дворецкий, С.А. Нагорнов, А.А. Ермаков, С.В. Неизвестная. Технология получения биодизельного топлива с использованием гетерофазных катализаторов и СВЧ-нагрева / Вопросы современной науки и практики. Спец. Выпуск. 2012. №39. С. 136-143.
14. N. Shibasaki-Kitakawa, H. Honda, H. Kuribayashi, T. Toda, T. Fukumura, T. Yonemoto. Biodiesel production using anionic ion-exchange resin as heterogeneous catalyst. Bioresour. Technol. 2007. V. 98. P. 416-421.
15. C.E.T. Co, M.C. Tan, J.A.R. Diamante, L.R.C. Yan, R.R. Tan, L.F. Razon. Internal mass-transfer limitations on the transesterification of coconut oil using an anionic ion exchange resin in a packed bed reactor. Catal. Today. 2011. V.174. P. 54-58.
16. M.G. Falco, C.D. Córdoba, M.R. Capeletti, U. Sedran. Basic ion exchange resins as heterogeneous catalysts for biodiesel synthesis. Adv. Mater. Res. 2010. V. 132. P. 220-227.
17. Y. Feng, A. Zhang, J. Li, B. He. A continuous process for biodiesel production in a fixed bed reactor packed with cation-exchange resin as heterogeneous catalyst. Bioresour. Technol. 2011. V. 102. P. 3607-3609.
18. B.M.E. Russbueltdt, W.F. Hoelderich. New sulfonic acid ion-exchange resins for the preesterification of different oils and fats with high content of free fatty acids. Appl. Catal. A: Gen. 2009. V. 362. P. 47-57.
19. S.M. de Rezende, M. de Castro Reis, M.G. Reid, P. Lúcio Silva Jr, F.M.B. Coutinho, R.A. da Silva San Gil, E.R. Lachter. Transesterification of vegetable oils promoted by poly(styrene-divinylbenzene) and poly(divinylbenzene). Appl. Catal. A: Gen. 2008. Vol. 349. P. 198-203.
20. D.G. Lima, V.C.V. Soares, E.B. Ribeiro, D.A. Caravvalho, E.C.V. Cardoso, F.C. Rassi, K.C. Mundim, J.C. Rubim, P.A.Z. Suarez. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. J. of Analytical and Applied Pyrolysis. 2004. №71. P. 987–996.
21. Hamze H., Akia M., Yazdani F. Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology. Process Saf Environ Prot. 2015. Vol.94. P. 1–10.
22. Gurunathan B., Ravi A. Biodiesel production from waste cooking oil using copper doped zinc oxide nanocomposite as heterogeneous catalyst. Bioresour Technol. 2015. Vol. 88. P. 124–127.
23. Maneerung T., Kawi S., Dai Y., Wang C.-H. Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. Energy Convers Manage. 2016. V. 123. P. 487–97.
24. Nisar J., Razaq R., Farooq M., Iqbal M., Khan R.A., Sayed M., et al. Enhanced biodiesel production from Jatropha oil using calcined waste animal bones as catalyst. Renew Energy. 2017. V. 101. P. 111–119.
25. Tshizanga N., Aransiola E.F., Oyekola O. Optimisation of biodiesel production from waste vegetable oil and eggshell ash. South African. J Chem Eng. 2017. V. 23. P. 145–156.

26. Roschat W., Phewphong S., Khunchalee J., Moonsin P. Biodiesel production by ethanolysis of palm oil using SrO as a basic heterogeneous catalyst. *Mater Today*. 2018 V. 5. P. 13916–13921.
27. Keera S.T., El Sabagh S.M., Taman A.R. Castor oil biodiesel production and optimization. *Egypt J Pet*. 2018. Vol. 27. P. 979–984.
28. Elango R.K., Sathiasivan K., Muthukumaran C., Thangavelu V., Rajesh M, Tamilarasan K. Transesterification of castor oil for biodiesel production: process optimization and characterization. *Microchem J*. 2019. Vol. 145. P. 1162–1168.
29. Nayak M.G., Vyas A.P. Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology. *Renew Energy*. 2019. Vol. 138. P. 18–28.
30. Anwar M., Rasul M., Ashwath N. Optimization of biodiesel production from stone fruit kernel oil. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 160. P. 268–276.
31. Kashyap S.S., Gogate P.R., Joshi S.M. Ultrasound assisted intensified production of biodiesel from sustainable source as karanja oil using interesterification based on heterogeneous catalyst (γ -alumina). *Chem Eng Process Intensif*. 2019. V. 136. P. 11–16.
32. Ambat I., Srivastava V., Haapaniemi E., Sillanpää M. Nano-magnetic potassium impregnated ceria as catalyst for the biodiesel production. *Renew Energy*. 2019. V. 139. P. 1428–1436.
33. S. Saka, D. Kusdiana. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*. 2001. №80. P. 225–231.
34. Kusdiana D., Saka S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*. 2004. V. 91. P. 289–295.
35. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*. 2009. V. 50. P. 923–927.
36. Kusdiana D., Saka S. Methyl esterification of free fatty acids of rapeseed oil as treated in supercritical methanol. *J. Chem. Eng. Jpn*. 2001. V.34. №3. P. 383–387.
37. De Boer K., Bahri P.A. Supercritical methanol for fatty acid methyl ester production: a review. *Biomass Bioenergy*. 2011. V. 35. P. 989–991.
38. Warabi Y., Kusdiana D., Saka S. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology*. 2004. V. 91. P. 283–287.
39. I. Vieitez, C. da Silva, I. Alckmin, G. R. Borges, F. C. Corazza, J. V. Oliveira, M. A. Grompone, I. Jachmaniarn. Continuous catalyst-free methanolysis and ethanolysis of soybean oil under supercritical alcohol/water mixtures. *Renewable Energy*. 2010. №35. P. 1976–1981.
40. West A.H., Posarac D., Ellis N. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS Plant. *Bioresource Technology*. 2008. V. 99. P. 6587–6601.
41. Kusdiana D, Saka S. Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. *Fuel*. 2001. V. 80(5). P. 693–698.
42. Biktashev Sh.A., Usmanov R.A., Gabitov R.R., Gazizov R.A., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Abdulagatov I.M., Yarullin R.S., Yakushev I.A. Transesterification of rapeseed and palm oils in supercritical methanol and ethanol. *Biomass Bioenergy*. 2011. V. 35. P. 2999–3011.
43. Усманов Р.А., Габитов Р.Р., Бикташев Ш.А., Шамсетдинов Ф.Н., Гумеров Ф.М., Габитов Ф.Р., Зарипов З.И., Газизов Р.А., Яруллин Р.С., Якушев И.А. Пилотная установка для непрерывной переэтерификации растительных масел в среде сверхкритического метанола и этанола // Сверхкритические Флюиды. Теория и практика. 2011. Т. 6. №3. С. 45–61.
44. Imahara H., Minami E., Hari S., Saka S. Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol. *Fuel*. 2008. V. 87. P. 1–6.
45. Bunyakiat K., Makmee S., Sawangkeaw R., Ngamprasertsith S. Continuous production of biodiesel via transesterification from vegetable oils in supercritical methanol. *Energy and Fuels*. 2006. V. 20. № 2. P. 812–817.
46. Ferenc E. Kiss, Radoslav D. Micic, Milan D. Tomic, Emilija B. Nikolic-Djoric, Mirko D. Simikic. Supercritical transesterification: Impact of different types of alcohol on biodiesel yield and LCA results. *J. of Supercritical Fluids*. 2014. № 86. P. 23–32.
47. P. Andreo-Martínez, N. García-Martínez, M. Durán-del-Amor, J. Quesada-Medina. Advances on kinetics and thermodynamics of non-catalytic supercritical methanol transesterification of some vegetable oils to biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 173. P. 187–196.
48. Dung Hoang, Samir Bensaid, Guido Saracco, Raffaele Pirone and Debora Fino. Investigation on the conversion of rapeseed oil via supercritical ethanol condition in the presence of a heterogeneous catalyst. *Green Process Synth*. 2017. V. 6. P. 91–101.

49. Animescu G., Deshpande A., Tavlarides L.L. Integrated technology for supercritical biodiesel production and power cogeneration. *Energy Fuels*. 2008. V. 22. P. 1391-1399.
50. Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Габитов Р.Р., Бикташев Ш.А., Габитов Ф.Р., Яруллин Р.С., Якушев И.А. Реализация процесса непрерывной переэтерификации растительных масел в сверхкритических флюидных средах. *Бутлеровские сообщения*. 2011. Т. 25. № 6. С. 1-12.
51. F.M. Gumerov, R.A. Usmanov and others (21 authors). Biodiesel fuel. Transesterification in supercritical conditions. Kazan: Publishing House "Innovative Publishing House" Butlerov Heritage. 2017, 360 p.
52. Нагорнов С.А., Романцова С.В., Дворецкий С.И., Таров В.П., Рязанцева И.А., Малахов К.С. Исследование кинетики процесса метанолиза при переработке растительного сырья в биотопливо // *Вестник ТГТУ*. 2009. №3 (15). С. 245.
53. S.X. Tan, S. Lim, H.C. Ong, Y.L. Pang. State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel*. 2019. V. 235. P. 886-907.
54. Stavarache C., Vinatoru M., Maeda Y. Aspect of ultrasonically assisted transesterification of various vegetable oils with methanol. *Ultrason. Sonochem*. 2007. V. 14. P. 380-386.
55. Omotola B., Leslie P., Bamikole A., Farouk A. Low-Cost feedstock conversion to biodiesel via ultrasound technology. *Energies*. 2009. V. 3. P. 1691-1703.
56. Kumar D., Kumar G., Poonam Singh C.P. Ultrasonic-assisted transesterification of jatropha oil using solid catalyst, Na/SiO₂. *Ultrason. Sonochem*. 2010. V. 17. P. 839-844.
57. Stavarache C., Vinatoru M., Nishimura R., Maeda Y. Conversion of vegetable oil to Biodiesel using ultrasonic irradiation. *Chem. Lett*. 2003. V. 32. P. 716-717.
58. Taleyarkhan R.P., Cho J.S., West C.D., Nigmatulin R.I., Block R.C. Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation. *Phys. Rev*. 2004. V. 69. P. 361-369.
59. Encinar J.M., González J.F., Rodríguez J.J., Tejedor A. Biodiesel fuels from vegetable oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. Oils with Ethanol. *Energy Fuels*. 2002. V. 16. P. 443-450.
60. Encinar J.M., Juan F., Gonzalez J.F., Rodriguez J.R. Biodiesel from Used Frying oil: Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2005. Vol. 44. P. 5491-5499.
61. Kumar D., Kumar G., Poonam Singh C.P. Fast, easy ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication. *Ultrason. Sonochem*. 2010. V. 17. P. 555-559.
62. Martinez-Guerra E., Gude V.G. Determining optimum pulse mode for ultrasound enhanced biodiesel production. *J. Ind. Eng. Chem*. 2016. V. 35. P. 14-19.
63. Singh A.K., Fernando S.D., Hernandez R. Base-catalyzed fast transesterification of soybean oil using ultrasonication. *Energy Fuels*. 2007. V. 21. P. 1161-1164.
64. Cao W., Han H., Zhang J. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. *Fuel*. 2005. V. 84. P. 347-351.
65. Han H., Cao W., Zhang J. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and CO₂ as co-solvent. *Process Biochemistry*. 2005. V. 40. P. 3148-3151.
66. Fernanda Wariss Figueiredo Bezerra, Wanessa Almeida da Costa, Mozaniel Santana de Oliveira, Eloisa Helena de Aguiar Andrade, Raul Nunes de Carvalho Junior. Transesterification of Palm Pressed-Fibers (*Elaeis guineensis* Jacq.) Oil by Supercritical Fluid Carbon Dioxide with Entrainer Ethanol. *J. of Supercritical Fluids*. 2018. V. 136. P. 136-143.
67. Van Kasteren J.M.N., Nisworo A.P. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. *Res. Conserv. Recycl*. 2007. V. 50. № 4. P. 442-458.
68. F.M. Gumerov. Supercritical fluid technology. Economic expediency. Kazan: Publishing House of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2019. 440 p.
69. Dasari M.A., Goff M.J., Suppes G.J. Noncatalytic alcoholysis kinetics of soybean oil. *JAOCS*. 2003. V. 80. № 2. P. 189-192.
70. Sakai T., Kawashima A., Koshikawa T. Economic assessment of batch biodiesel production processes using homogeneous and heterogeneous alkali catalysts. *Bioresour. Technol*. 2009. №100. P. 3268-3276.
71. Ebiura T., Echizen T., Ishikawa A., Kazuhito M., Baba T. Selective transesterification of triolein with methanol to methyl oleate and glycerol using alumina loaded with alkali metal salt as a solid-base catalyst. *Appl. Catal. A: Gen*. 2005. №283. P. 111-116.
72. Fabbri D., Bevonni V., Notari M., Rivetti F. Properties of a potential biofuel obtained from soybean oil by transmethylation with dimethyl carbonate. *Fuel*. 2007. №86. P. 690-697.

73. Wang L., Yang J. Transesterification of soybean oil with nano-MgO or not in supercritical and subcritical methanol. *Fuel*. 2007. №86. P. 328–333.
74. Mootabadi H., Salamatinia B., Bhatia S., Abdullah A.Z. Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts. *Fuel*. 2010. №89. P. 1818–1825.
75. Salamatinia B., Mootabadi H., Bhatia S., Abdullah A.Z. Optimization of ultrasonic-assisted heterogeneous biodiesel production from palm oil: a response surface methodology approach. *Fuel Process Technol.* 2010. №91. P. 441–448.
76. Vujicic D.J., Comic D., Zarubica A., Micic R., Boskovic G. Kinetics of biodiesel synthesis from sunflower oil over CaO heterogeneous catalyst. *Fuel*. 2010. №89. P. 2054–2061.
77. Yoosuk B., Udomsap P., Buppa P., Pawnprapa K. Modification of calcite by hydration–dehydration method for heterogeneous biodiesel production process: the effects of water on properties and activity. *J. Chem. Eng.* 2010. №162. P. 135–141.
78. Yoo S.J., Lee H.S., Bambang V., Kim J., Kim J.D., Lee Y.W. Synthesis of biodiesel from rapeseed oil using supercritical methanol with metal oxide catalysts. *Bioresour. Technol.* 2010. №101. P. 8686–8689.
79. Yang Z., Xie W. Soybean oil transesterification over zinc oxide modified with alkali earth metals. *Fuel Process Technol.* 2007. №88. P. 631–638.
80. Antunes W.M., Veloso C.O., Henriques C.A. Transesterification of soybean oil with methanol catalyzed by basic solids. *Catal. Today*. 2008. №133–135. P. 548–554.
81. Hai-xin B., Xiao-Zhen S., Xiao-hua L., Shengyong L. Synthesis of porous CaO microsphere and its application in catalyzing transesterification reaction for biodiesel. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2009. №19. P. 674–677.
82. Yan S., Salley S.O., Simon K.Y. Simultaneous transesterification and esterification of unrefined or waste oils over ZnO–La₂O₃ catalysts. *Appl. Catal. A: Gen.* 2009. №353. P. 203–212.
83. Noiroj K., Intarapong P., Luengnarumitchai A., Jai-In S. A comparative study of KOH/Al₂O₃ and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil. *Renew. Energy*. 2009. №34. P. 1145–1150.
84. Lukic I., Krstic J., Jovanovic D., Skala D. Alumina/silica supported K₂CO₃ as a catalyst for biodiesel synthesis from sunflower oil. *Bioresour. Technol.* 2009. №100. P. 4690–4696.
85. Boz N., Degirmenbasi N., Kalyon D.M. Conversion of biomass to fuel: transesterification of vegetable oil to biodiesel using KF loaded nano-g-Al₂O₃ as catalyst. *Appl. Catal. B: Environ.* 2009. №89. P. 590–596.
86. Shu Q., Gao J., Nawaz Z., Liao Y., Wang D., Wang J. Synthesis of biodiesel from waste vegetable oil with large amounts of free fatty acids using a carbon based solid acid catalyst. *Appl. Energy*. 2010. №87. P. 2589–2596.
87. Baroutian S., Aroua M.K., Abdul Raman A.A., Nik Sulaiman N.M. Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil. *Fuel Process Technol.* 2010. №91. P. 1378–1385.
88. Marchetti J.M., Errazu A.F. Comparison of different heterogeneous catalysts and different alcohols for the esterification reaction of oleic acid. *Fuel*. 2008. №87. P. 3477–3480.
89. Ramos M.J., Casas A., Rodriguez L., Romero R., Perez A. Transesterification of sunflower oil over zeolites using different metal loading: a case of leaching and agglomeration studies. *Appl. Catal. A: Gen.* 2008. №346. P. 79–85.
90. Puna J.F., Gomes J.F., Correia M.J., Soares Dias A.P., Bordado J.C. Advances on the development of novel heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides in biodiesel. *Fuel*. 2010. №89. P. 3602–3606.
91. Wei Z., Xu C., Li B. Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 2009. №100. P. 2883–2885.
92. Viriya-empikul N., Krasae P., Puttasawat B., Yoosuk B., Chollacoop N., Faungnawakij K. Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresour. Technol.* 2010. №101. P. 3765–3767.
93. Chakraborty R., Bepari S., Banerjee A. Application of calcined waste fish (Labeo rohita) scale as low-cost heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Bioresour. Technol.* 2011. №102. P. 3610–3618.
94. Park Y.M., Chung S., Eom H.J., Lee J., Lee K. Tungsten oxide zirconia as solid superacid catalyst for esterification of waste acid oil (dark oil). *Bioresour. Technol.* 2010. №101. P. 6589–6593.
95. Liu R., Wang X., Zhao X., Feng P. Sulfonated ordered mesoporous carbon for catalytic preparation of biodiesel. *Carbon*. 2008. №46. P. 1664–1669.

96. De Almeida Rusiene M., Noda Lucia K., Goncalves Norberto S., Meneghetti Simoni M.P., Meneghetti Mario R. Transesterification reaction of vegetable oils, using superacid sulfated TiO₂-base catalysts. Appl. Catal. A: Gen. 2008. №347. P. 100–105.

97. Juan J.C., Zhang J.C., Yarmo M.A. Structure and reactivity of silica – supported zirconium sulfate for esterification of fatty acid under solvent – free condition. Appl. Catal. A: Gen. 2007. №332. P. 209–215.

98. Holser Ronald A., Doll Kenneth M., Erhan Sevim Z. Metathesis of methyl soyate with ruthenium catalysts. Fuel. 2006. №85. P. 393–395.

99. Alsalmeh A., Kozhevnikova E.F., Kozhevnikov I.V. Heteropoly acids as catalysts for liquid-phase esterification and transesterification. Appl. Catal. A: Gen. 2008. №349. P. 170–176.

100. Park Y.M., Lee D.W., Kim D.K., Lee J., Lee K.Y. The heterogeneous catalyst system for the continuous conversion of free fatty acids in used vegetable oils for the production of biodiesel. Catal. Today. 2008. №131. P. 238–243.

101. R. A. Usmanov, F. M. Gumerov, F. R. Gabitov, Z. I. Zaripov, F. N. Shamsetdinov, I. M. Abdulagatov, in Liquid Fuels: Types, Properties and Production. Chap. 3: Nova Science, New York, 2012., p. 99.

102. С.В. Мазанов, Р.А. Усманов, Ф.М. Гумеров. Гетерогенный катализ при получении биодизельного топлива. Изд. LAP Lambert Academic Publishing, - 2017. 189 с.

103. S.V. Mazanov, A.R. Gabitova, R.A. Usmanov, F.M. Gumerov, S. Labidi, M.B. Amar, J-P. Passarello, A. Kanaev, F. Volle, B. Le Neindre. Continuous production of biodiesel from rapeseed oil by ultrasonic assist transesterification in supercritical ethanol. The Journal of Supercritical Fluids. 2016. Vol.118. P. 107–118.

104. F.M. Gumerov, S.V. Mazanov, R.A. Usmanov, A.R. Gabitova, A.I. Kourdioukov, Z.I. Zaripov. Theoretical and Experimental Study of Reaction of Transesterification of Vegetable Oils in an Alcohol Environment in the SbCF and SCF Conditions with the Ultrasonic Emulsification of Reaction Mixture and the Use of Heterogeneous Catalysts. International Journal of Analytical Mass Spectrometry and Chromatography. 2017. №5. P. 40-55.

105. С.В. Мазанов, А.Р. Габитова, Л.Х. Мифтахова, Р.А. Усманов, Ф.М. Гумеров, З.И. Зарипов, В.А. Васильев, Э.А. Каралин. Получение биодизельного топлива в сверхкритических флюидных условиях с использованием гетерогенных катализаторов // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2015. Т. 10. №2. С. 71-83.

106. С.В. Мазанов, Р.А. Усманов, Ф.М. Гумеров, Э.А. Каралин, В.А. Васильев, Р.З. Мусин. Трансэтерификация рапсового масла в среде этанола в сверхкритических флюидных условиях в проточном реакторе в присутствии гетерогенного катализатора // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2014. №5. С. 14-24.

107. С.В. Мазанов, Р.А. Усманов, Р.Д. Амирханов, Ф.М. Гумеров. Экспериментальное исследование процесса получения биодизельного топлива в сверхкритических флюидных условиях // Проблемы энергетики. 2017. №1-2. С. 41-51.

108. S.V. Mazanov, A.R. Gabitova, L.H. Miftahova, R.A. Usmanov, F.M. Gumerov, Z.I. Zaripov, V.A. Vasil'ev, E.A. Karalyn. Preparing biodiesel fuel in supercritical fluid conditions with heterogeneous catalysts. Russian Journal of Physical Chemistry B. 2016. Vol. 10. №7. P. 1099–1107.

109. Мазанов С.В., Усманов Р.А., Куагу Ж.М., Ункатэн Д.Д., Фонкоу М.Д., Гумеров Ф.М., Зарипов З.И., Шаповалов Ю.А., Наурызбаев М.К. Экспериментальное исследование некаталитической и каталитической реакции переэтерификации рапсового масла в сверхкритических флюидных условиях на установке проточного типа // Промышленность Казахстана. 2019. №1(105). С. 90-92.

110. Neha Lamba, Rimzhim Gupta, Jayant M. Modak, Giridhar Madras. ZnO catalyzed transesterification of Madhuca indica oil in supercritical Methanol. Fuel. 2019. Vol. 242. P. 323–333.

111. Demirbas A. Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide. Energy Conversion and Management. 2007. Vol. 48. P. 937–941.

112. В.Б.Вольева, И.С.Белостоцкая, Н.Л.Комиссарова, Е.В.Коверзанова, Л.Н.Курковская, Р.А.Усманов, Ф.М.Гумеров. Биодизель без свободного глицерина // ЖОХ. 2015. Т. 51. №7. С. 935.

113. Mushrush G.W., Beal E.J., Hardy D.R., Hughes J.M Cummings J.C. Jet Fuel System Icing Inhibitors: Synthesis and Characterization. Ind. Eng. Chem. Res. 1999. Vol. 38. P. 2497.

114. Varfolomeev S.D., Gladchenko M.A., Gaydamaka S.N., Murygina V.P., Volieva V.B., Komissarova N.L., Gumerov F.M., Usmanov R.A., Koversanova E.V. Biocatalytic Conversion of Lignocellulose Materials to Fatty Acids and Ethanol with Subsequent Esterification.

Monograph. Chemistry and Technology of plant substances. Chemical and Biochemical Aspects (Chapter 6): Apple Academic Press. Part I, 2017. - P.111-133.

115. J. George, Y. Patel, S.M. Pillai, P. Munshi. Methanol assisted selective formation of 1,2-glycerol carbonate from glycerol and carbon dioxide using $n\text{Bu}_2\text{SnO}$ as a catalyst. *J. Mol. Catal. Chem.* 2009. Vol. 304. P. 1-7.

116. J.R. Ochoa-Gómez, O. Gómez-Jiménez-Aberasturi, B. Maestro-Madurga, A. Pesquera-Rodríguez, C. Ramírez-López, L. Lorenzo-Ibarreta. Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dimethyl carbonate by transesterification: Catalyst screening and reaction optimization. *Appl. Catal. A: Gen.* 2009. Vol. 366. P. 315-324.

117. M. Malyaadri, K. Jagadeeswaraiyah, P.S. Sai Prasad, N. Lingaiah. Synthesis of glycerol carbonate by transesterification of glycerol with dimethyl carbonate over Mg/Al/Zr catalysts. *Appl. Catal. A: Gen.* 2011. Vol. 401. P. 153-157.

118. L. Li, T.I. Koranyi, B.F. Sels, P.P. Pescarmona. Highly-efficient conversion of glycerol to solketal over heterogeneous Lewis acid catalysts. *Green Chem.* 2012. Vol. 14. P. 1611-1619.

119. N. Suriyaprapadilok, B. Kitiyanan. Synthesis of Solketal from Glycerol and Its Reaction with Benzyl Alcohol. *Energy Procedia.* 2011. Vol. 9. P. 63-69.

120. J.R. Dodson, T.d.C.M. Leite, N. S. Pontes, B. Peres Pinto, C.J.A. Mota. Green acetylation of solketal and glycerol formal by heterogeneous acid catalysts to form a biodiesel fuel additive. *ChemSusChem.* 2014. Vol. 7. P. 2728-2734.

121. R. Rodrigues, M. Goncalves, D. Mandelli, P.P. Pescarmona, W.A. Carvalho. Solvent-free conversion of glycerol to solketal catalysed by activated carbons functionalised with acid groups. *Catal. Sci. Technol.* 2014. Vol. 4. P. 2293-2301.

122. Valentine C. Eze, Adam P. Harvey. Continuous Reactive Coupling of Glycerol and Acetone – a Strategy for Triglyceride Transesterification and In-situ Valorisation of Glycerol by-product. *Chemical Engineering Journal.* 2018. Vol. 347. P. 41-51

123. C.X.A. da Silva, C.J.A. Mota. The influence of impurities on the acid-catalyzed reaction of glycerol with acetone. *Biomass Bioenergy.* 2011. Vol. 35. P. 3547-3551.

124. M.R. Nanda, Z. Yuan, W. Qin, H.S. Ghaziaskar, M.A. Poirier, C. Xu. Catalytic conversion of glycerol to oxygenated fuel additive in a continuous flow reactor: process optimization. *Fuel.* 2014. Vol. 128. P. 113-119.

125. Olivares-Carrillo P., Quesada-Medina J. Thermal decomposition of fatty acid chains during the supercritical methanol transesterification of soybean oil to biodiesel. *Journal of supercritical fluids.* 2012. №72. P. 52– 58.

126. Vieitez I., Silva C., Alckmin I., Borges G.R., Corazza F.C., Oliveira J.V., Grompone M.A., Jachmanian I. Effect of temperature on the continuous synthesis of soybean esters under supercritical ethanol. *Energy and Fuels.* 2009. №23. P. 558–563.

127. Hee-Yong Shin, Seon-Muk Lim, Seong-Youl Bae, Sea Cheon Oh. Thermal decomposition and stability of fatty acid methyl esters in supercritical methanol. *Journal of analytical and applied pyrolysis.* 2011. №92. P. 332–338.

128. Aimaretti N., Manuale D.L., Mazziere V.M., Vera C.R., Yori J.C. Batch study of glycerol decomposition in one-stage supercritical production of biodiesel. *Energy and Fuels.* 2009. №23. P. 1076–1080.

129. Marulanda V.F., Anitescu G., Tavlarides L.L. Investigations on supercritical transesterification of chicken fat for biodiesel production from low-cost lipid feedstocks. *J. of Supercritical Fluids.* 2010. №54. P. 53–60.

130. Chen J., Li J., Dong W., Zhang X., Tyagi R.D., Drogui P. The potential of microalgae in biodiesel production. *Renew Sustain Energy Rev.* 2018. V. 90. P. 336–346.

131. Goh B.H.H., Ong H.C., Cheah M.Y., Chen W.-H., Yu K.L., Mahlia T.M.I. Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019. Vol.107. P. 59–74.

132. H.T. Siow, I. Aminul, H.T. Yun. Algae derived biodiesel using nanocatalytic transesterification process. *Chem. Eng. Res. Design.* 2016. Vol. 111. P. 362–370.

133. P. De Filipis, C. Giavarini, M. Scarsella, M. Sorrentino, Transesterification processes for vegetable oils: a simple control method of methyl ester content. *Journal of the American Oil Chemists Society.* 1995. Vol. 72. P. 1399–1404.

134. F.P. Sousa, M.A. Luciano, V.M.D. Pasa. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE). *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 109. P. 133–140.

135. R.A. Usmanov, S.V. Mazanov, A.R. Gabitova, L.Kh. Miftakhova, F.M. Gumerov, R.Z. Musin, I.M. Abdulagatov. The effect of fatty acid ethyl esters concentration on the kinematic viscosity of biodiesel fuel. *J. Chem. Eng. Data.* 2015. V. 60. №11. P. 3404-3413.

136. A.R. Gabitova, S.V. Mazanov, R.A. Usmanov, Z.I. Zaripov, F.M. Gumerov, I.M. Abdulagatov. Viscometry as a method for determining concentration of fatty acid ethyl esters in biodiesel fuel. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017. V.53. №1. P. 77-86.
137. А.Р. Габитова, С.В. Мазанов, Р.А. Усманов, З.И. Зарипов, Ф.М. Гумеров, И.М. Абдулагатов. Вискозиметрия как метод определения концентрации этиловых эфиров жирных кислот в биодизельном топливе // *Химия и технология топлив и масел*. 2017. №1. С. 47-51.
138. M.E. Borges, L. Díaz, J. Gavín, A. Brito. Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements. *Fuel Processing Technology*. 2011. V. 92. P. 597–599.
139. G. Knothe, K.R. Steidley. Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures. *Fuel*. 2007. V. 86. P. 2560–2567.
140. D. Valeri, A.J.A. Meirelles. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. *JAOCs*. 1997. V. 10. P. 1221-1226.
141. D. Kusdiana, S. Saka. Two-step preparation for catalyst-free biodiesel production: hydrolysis and methyl esterification. *Applied Biochem, Biotechnol*. 2004. V.113. №1. P. 781-791.
142. D'Ippolito S.A., Yori J.C., Iturria M.E., Pieck C.L., Vera C.R. Analysis of a two-step, noncatalytic, supercritical biodiesel production process with heat recovery. *Energy Fuels*. 2007. V. 21. P. 339-346.
143. Minami, E. Saka, S. Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process. *Fuel*. 2006. V. 85(17-18). P. 2479-2483.
144. Z. Ilham, S. Saka. Two-step supercritical dimethyl carbonate method for biodiesel production from *Jatropha curcas* oil. *Bioresource Technology*. 2010. V. 101. № 8. P. 2735-2740.
145. Y. Sugami, E. Minami, S. Saka. Renewable diesel production from rapeseed oil with hydrothermal hydrogenation and subsequent decarboxylation. *Fuel*. 2016. V. 166. P. 376-381.
146. F.L. Martinovic, F.E. Kiss, R.D. Micic, M.Đ. Simikić, M.D. Tomić. Comparative techno-economic analysis of single-step and two-step biodiesel production with supercritical methanol based on process simulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. V. 132. P. 751-765.

Авторы публикации

Мазанов Сергей Валерьевич – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Гумеров Фарид Мухамедович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Усманов Рустем Айтуганович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Габитова Асия Радифовна – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Зарипов Зуфар Ибрагимович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Варфоломеев Сергей Дмитриевич – д-р хим. наук, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН

Вольева Виолетта Борисовна – канд. хим. наук, Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН

Шаповалов Юрий Александрович – д-р техн. наук, Казахский национальный университет им. аль-Фараби

References

1. Cvengrosova Z, Cvengros J, Hronce M. Rapeseed oil ethyl esters as alternative fuels and their quality control. *Petroleum and Coal*. 1997;39:36-40.
2. Wevten H, Willems L, Adriansen W, et al. Transesterification reaction of vegetable oil in supercritical methanol. *Proc. of the 8 th Meeting on Supercritical Fluids. Bordeaux (France)*.

2002;1:139-144.

3. Marchenko GN, Altynbaeva ER. Prospects for the use of new types of fuel and the development of renewable energy sources. *Vestnik KSEU*. 2010;4:6-13.

4. Moiseev I, Tarasov V, Trusov L. Evolution of bioenergetics. Algae time. *Chemistry Journal*. 2009;12:24-29.

5. Sawangkeaw R, Bunyakiat K, Ngamprasertsith S. A review of laboratory-scale research on lipid conversion to biodiesel with supercritical methanol (2001–2009). *J. of Supercritical Fluids*. 2010;55:1-13.

6. Coronado CR, de Carvalho JA Jr, Silveira JL. Biodiesel CO₂ emissions: a comparison with the main fuels in the Brazilian market. *Fuel Processing Technology*. 2009;90:204-211.

7. Hu Z, Tan P, Yan X, et al. Life cycle energy, environment and economic assessment of soybean-based biodiesel as an alternative automotive fuel in China. *Energy*. 2008;33:1654-1658.

8. Math MC, Kumar SP, Chetty SV. Technologies for biodiesel production from used cooking oil — A review. *Energy for Sustainable Development*. 2010;14(4):339-345.

9. Marchetti JM, Miguel VU, Errazu AF. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007;11:1300-1311.

10. Glisic S, Skala D. The problems in design and detailed analyses of energy consumption for biodiesel synthesis at supercritical conditions. *J. of Supercritical Fluids*. 2009;49:293-301.

11. Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*. 1999;70:1-15.

12. Gazizov RA, Bilalov TR, Gumerov FM, et al. Biodiesel has come close to Russian borders. *Oil and Capital*. 2002;1:72-74.

13. Dvoretzky DS, Nagornov SA, Ermakov AA, et al. Technology for obtaining biodiesel fuel using heterophase catalysts and microwave heating. *Problems of Modern Science and Practice. Specialist. Release*. 2012;39:136-143.

14. Shibasaki-Kitakawa N, Honda H, Kuribayashi H, et al. Biodiesel production using anionic ion-exchange resin as heterogeneous catalyst. *Bioresour Technol*. 2007;98:416-421.

15. Co CET, Tan MC, Diamante JAR, et al. Razon, Internal mass-transfer limitations on the transesterification of coconut oil using an anionic ion exchange resin in a packed bed reactor. *Catalysis Today*. 2011;174:54-58.

16. Falco MG, Córdoba CD, Capeletti MR, et al. Basic ion exchange resins as heterogeneous catalysts for biodiesel synthesis. *Adv Mater Res*. 2010;132:220-227.

17. Feng Y, Zhang A, Li J, et al. A continuous process for biodiesel production in a fixed bed reactor packed with cation-exchange resin as heterogeneous catalyst. *Bioresour Technol*. 2011;102:3607-3609.

18. Russbueldt BME, Hoelderich WF. New sulfonic acid ion-exchange resins for the preesterification of different oils and fats with high content of free fatty acids. *Applied Catalysis A: General*. 2009;362:47-57.

19. De Rezende SM, de Castro Reis M, Reid MG, et al. Transesterification of vegetable oils promoted by poly(styrene-divinylbenzene) and poly(divinylbenzene). *Applied Catalysis A: General*. 2008;349:198-203.

20. Lima DG, Soares VCV, Ribeiro EB, et al. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004;71: 987-996.

21. Hamze H, Akia M, Yazdani F. Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology. *Process Saf Environ Prot*. 2015;94:1-10.

22. Gurunathan B, Ravi A. Biodiesel production from waste cooking oil using copper doped zinc oxide nanocomposite as heterogeneous catalyst. *Bioresour Technol*. 2015;188:124-127.

23. Maneerung T, Kawi S, Dai Y, et al. Sustainable biodiesel production via transesterification of waste cooking oil by using CaO catalysts prepared from chicken manure. *Energy Convers Manage*. 2016;123:487-97.

24. Nisar J, Razaq R, Farooq M, et al. Enhanced biodiesel production from Jatropha oil using calcined waste animal bones as catalyst. *Renew Energy*. 2017;101:111–119.

25. Tshizanga N, Aransiola EF, Oyekola O. Optimisation of biodiesel production from waste vegetable oil and eggshell ash. *South African J Chem Eng*. 2017;23:145–156.

26. Roschat W, Phewphong S, Khunchalee J, et al. Biodiesel production by ethanolysis of palm oil using SrO as a basic heterogeneous catalyst. *Mater Today: Proc*. 2018;5:13916-13921.

27. Keera ST, El Sabagh SM, Taman AR. Castor oil biodiesel production and optimization. *Egypt J Pet*. 2018;27:979–984.

28. Elango RK, Sathiasivan K, Muthukumaran C, et al. Transesterification of castor oil for biodiesel production: process optimization and characterization. *Microchem J*. 2019;145:1162-1168.

29. Nayak MG, Vyas AP. Optimization of microwave-assisted biodiesel production from Papaya oil using response surface methodology. *Renew Energy*. 2019;138:18–28.
30. Anwar M, Rasul M, Ashwath N. Optimization of biodiesel production from stone fruit kernel oil. *Energy Procedia*. 2019;160:268–276.
31. Kashyap SS, Gogate PR, Joshi SM. Ultrasound assisted intensified production of biodiesel from sustainable source as karanja oil using interesterification based on heterogeneous catalyst (γ -alumina). *Chem Eng Process Intensif*. 2019;136:11–16.
32. Ambat I, Srivastava V, Haapaniemi E, et al. Nano-magnetic potassium impregnated ceria as catalyst for the biodiesel production. *Renew Energy*. 2019;139:1428–36.
33. Saka S, Kusdiana D. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. *Fuel*. 2001;80:225–231.
34. Kusdiana D, Saka S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. *Bioresource Technology*. 2004;91:289–295.
35. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification. *Energy Conversion and Management*. 2009;50:923–927.
36. Kusdiana D, Saka S. Methyl esterification of free fatty acids of rapeseed oil as treated in supercritical methanol. *J. Chem. Eng. Jpn.* 2001;34(3):383–387.
37. De Boer K, Bahri PA. Supercritical methanol for fatty acid methyl ester production: a review. *Biomass Bioenergy*. 2011;35:989–991.
38. Warabi Y, Kusdiana D, Saka S. Reactivity of triglycerides and fatty acids of rapeseed oil in supercritical alcohols. *Bioresource Technology*. 2004;91:283–287.
39. Vieitez I, da Silva C, Alckmin I, et al. Continuous catalyst-free methanolysis and ethanolysis of soybean oil under supercritical alcohol/water mixtures. *Renewable Energy*. 2010;35:1976–1981.
40. West AH, Posarac D, Ellis N. Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS Plant. *Bioresource Technology*. 2008;99:6587–6601.
41. Kusdiana D, Saka S. Kinetics of transesterification in rapeseed oil to biodiesel fuel as treated in supercritical methanol. *Fuel*. 2001;80(5):693–8.
42. Biktashev SA, Usmanov RA, Gumerov FM, et al. Transesterification of rapeseed and palm oils in supercritical methanol and ethanol. *Biomass Bioenergy*. 2011;35:2999–3011.
43. Usmanov RA, Gabitov RR, Biktashev ShA, et al., Pilot plant for continuous interesterification of vegetable oils in supercritical methanol and ethanol. *Supercritical Fluids. Theory and practice*. 2011;3:45–61.
44. Imahara H, Minami E, Hari S, et al. Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol. *Fuel*. 2008;87:1–6.
45. Bunyakiat K, Makmee S, Sawangkeaw R, et al. Continuous production of biodiesel via transesterification from vegetable oils in supercritical methanol. *Energy and Fuels*. 2006;20(2):812–817.
46. Kiss FE, Micic RD, Tomic MD, et al. Supercritical transesterification: Impact of different types of alcohol on biodiesel yield and LCA results. *J. of Supercritical Fluids*. 2014;86:23–32.
47. Andreo-Martínez P, García-Martínez N, Durán-del-Amor M, et al. Advances on kinetics and thermodynamics of non-catalytic supercritical methanol transesterification of some vegetable oils to biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 2018;173:187–196.
48. Hoang D, Bensaid S, Saracco G, et al. Investigation on the conversion of rapeseed oil via supercritical ethanol condition in the presence of a heterogeneous catalyst. *Green Process Synth*. 2017;6:91–101.
49. Animescu G, Deshpande A, Tavlarides LL. Integrated technology for supercritical biodiesel production and power cogeneration. *Energy Fuels*. 2008;22:1391–1399.
50. Gumerov FM, Usmanov RA, Gabitov RR, et al. Implementation of the process of continuous interesterification of vegetable oils in supercritical fluid media. *Butlerov Communications*. 2011;6(25):1–12.
51. Gumerov FM, Usmanov RA, Mazanov SV, et al. Biodiesel fuel. Transesterification under supercritical fluid conditions. Monograph. – Kazan: Publishing house LLC "Innovative Publishing House "Butlerovskoye heritage", 2017. – 360 p.
52. Nagornov SA, Romantsova SV, Dvoretzky SI, et al. Study of the kinetics of the methanolysis process during the processing of plant raw materials into biofuels. *Vestnik TSTU*. 2009;3(15):245.
53. Tan SX, Lim S, Ong HC, et al. State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel*. 2019;235:886–907.
54. Stavarache C, Vinatoru M, Maeda Y. Aspect of ultrasonically assisted

- transesterification of various vegetable oils with methanol. *Ultrason. Sonochem.* 2007;14:380-386.
55. Omotola B, Leslie P, Bamikole A, et al. Low-Cost feedstock conversion to biodiesel via ultrasound technology. *Energies.* 2009;3:1691–1703.
56. Kumar D, Kumar G, Poonam SCP. Ultrasonic-assisted transesterification of jatropha oil using solid catalyst, Na/SiO₂. *Ultrason. Sonochem.* 2010;17:839–844.
57. Stavarache C, Vinatoru M, Nishimura R, et al. Conversion of vegetable oil to Biodiesel using ultrasonic irradiation. *Chem. Lett.* 2003;32:716–717.
58. Taleyarkhan RP, Cho JS, West CD, et al. Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation. *Phys. Rev.* 2004;69:361–369.
59. Encinar JM, González JF, Rodríguez JJ, et al. Biodiesel fuels from vegetable oils: Transesterification of *Cynara cardunculus* L. Oils with Ethanol. *Energy Fuels.* 2002;16:443-450.
60. Encinar JM, Juan F, Gonzalez JF, et al. Biodiesel from Used Frying oil: Variables Affecting the Yields and Characteristics of the Biodiesel. *Ind.Eng.Chem. Res.* 2005;44:5491-5499.
61. Kumar D, Kumar G, Singh CP, et al. Fast, easy ethanolysis of coconut oil for biodiesel production assisted by ultrasonication. *Ultrason. Sonochem.* 2010;17:555–559.
62. Martinez-Guerra E, Gude VG. Determining optimum pulse mode for ultrasound enhanced biodiesel production. *J. Ind. Eng. Chem.* 2016;35:14–19.
63. Singh AK, Fernando SD, Hernandez R. Base-catalyzed fast transesterification of soybean oil using ultrasonication. *Energy Fuels.* 2007;21:1161–1164.
64. Cao W, Han H, Zhang J. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. *Fuel.* 2005;84:347–351.
65. Han H, Cao W, Zhang J. Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and CO₂ as co-solvent. *Process Biochemistry.* 2005;40:3148–3151.
66. Bezerra FWF, da Costa WA, de Oliveira MS, et al. Transesterification of Palm Pressed-Fibers (*Elaeis guineensis* Jacq) Oil by Supercritical Fluid Carbon Dioxide with Entrainer Ethanol. *J. of Supercritical Fluids.* 2018;136:136-143.
67. Van Kasteren JMN, Nisworo AP. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. *Res. Conserv. Recycl.* 2007;50(4):442–458.
68. Gumerov FM. Supercritical fluid technologies. Economic feasibility, Kazan: Ed. AS RT, 2019. – 440 p.
69. Dasari MA, Goff MJ, Suppes GJ. Noncatalytic alcoholysis kinetics of soybean oil. *JAOCs.* 2003;80(2):189-192.
70. Sakai T, Kawashima A, Koshikawa T. Economic assessment of batch biodiesel production processes using homogeneous and heterogeneous alkali catalysts. *Bioresour. Technol.* 2009;100:3268–3276.
71. Ebiura T, Echizen T, Ishikawa A, et al. Selective transesterification of triolein with methanol to methyl oleate and glycerol using alumina loaded with alkali metal salt as a solid-base catalyst. *Appl. Catal. A: Gen.* 2005;283:111–116.
72. Fabbri D, Bevoni V, Notari M, et al. Properties of a potential biofuel obtained from soybean oil by transmethylation with dimethyl carbonate. *Fuel.* 2007;86:690–697.
73. Wang L, Yang J. Transesterification of soybean oil with nano-MgO or not in supercritical and subcritical methanol. *Fuel.* 2007;86:328–333.
74. Mootabadi H, Salamatina B, Bhatia S, et al. Ultrasonic-assisted biodiesel production process from palm oil using alkaline earth metal oxides as the heterogeneous catalysts. *Fuel.* 2010;89:1818–1825.
75. Salamatina B, Mootabadi H, Bhatia S, et al. Optimization of ultrasonic-assisted heterogeneous biodiesel production from palm oil: a response surface methodology approach. *Fuel Process Technol.* 2010;91:441–448.
76. Vujicic DJ, Comic D, Zarubica A, et al. Kinetics of biodiesel synthesis from sunflower oil over CaO heterogeneous catalyst. *Fuel.* 2010;89:2054–2061.
77. Yoosuk B, Udomsap P, Buppa P, et al. Modification of calcite by hydration–dehydration method for heterogeneous biodiesel production process: the effects of water on properties and activity. *J. Chem. Eng.* 2010;162:135–141.
78. Yoo SJ, Lee HS, Bambang V, et al. Synthesis of biodiesel from rapeseed oil using supercritical methanol with metal oxide catalysts. *Bioresour. Technol.* 2010;101:8686–8689.
79. Yang Z, Xie W. Soybean oil transesterification over zinc oxide modified with alkali earth metals. *Fuel Process Technol.* 2007;88:631–638.
80. Antunes WM, Veloso CO, Henriques CA. Transesterification of soybean oil with methanol catalyzed by basic solids. *Catal. Today.* 2008;133–135:548–554.
81. Hai-xin B, Xiao-Zhen S, Xiao-hua H, et al. Synthesis of porous CaO microsphere and

its application in catalyzing transesterification reaction for biodiesel. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2009;19:674–677.

82. Yan S, Salley SO, Simon KY. Simultaneous transesterification and esterification of unrefined or waste oils over $\text{ZnO-La}_2\text{O}_3$ catalysts. *Appl. Catal. A: Gen.* 2009;353:203–212.

83. Noiroj K, Intarapong P, Luengnaruemitchai A, et al. A comparative study of $\text{KOH/Al}_2\text{O}_3$ and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil. *Renew. Energy*. 2009;34:1145–1150.

84. Lukic I, Krstic J, Jovanovic D, et al. Alumina/silica supported K_2CO_3 as a catalyst for biodiesel synthesis from sunflower oil. *Bioresour. Technol.* 2009;100:4690–4696.

85. Boz N, Degirmenbasi N, Kalyon DM. Conversion of biomass to fuel: transesterification of vegetable oil to biodiesel using KF loaded nano-g- Al_2O_3 as catalyst. *Appl. Catal. B: Environ.* 2009;89:590–596.

86. Shu Q, Gao J, Nawaz Z, et al. Synthesis of biodiesel from waste vegetable oil with large amounts of free fatty acids using a carbon-based solid acid catalyst. *Appl. Energy*. 2010;87:2589–2596.

87. Baroutian S, Aroua MK, Abdul Raman AA, et al. Potassium hydroxide catalyst supported on palm shell activated carbon for transesterification of palm oil. *Fuel Process Technol.* 2010;91:1378–1385.

88. Marchetti JM, Errazu AF. Comparison of different heterogeneous catalysts and different alcohols for the esterification reaction of oleic acid. *Fuel*. 2008;87:3477–3480.

89. Ramos MJ, Casas A, Rodriguez L, et al. Transesterification of sunflower oil over zeolites using different metal loading: a case of leaching and agglomeration studies. *Appl. Catal. A: Gen.* 2008;346:79–85.

90. Puna JF, Gomes JF, Correia MJ, et al. Advances on the development of novel heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides in biodiesel. *Fuel*. 2010;89:3602–3606.

91. Wei Z, Xu C, Li B. Application of waste eggshell as low-cost solid catalyst for biodiesel production. *Bioresour. Technol.* 2009;100:2883–2885.

92. Viriya-empikul N, Krasae P, Puttasawat B, et al. Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts. *Bioresour. Technol.* 2010;101:3765–3767.

93. Chakraborty R, Bepari S, Banerjee A. Application of calcined waste fish (*Labeo rohita*) scale as low-cost heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis. *Bioresour. Technol.* 2011;102:3610–3618.

94. Park YM, Chung S, Eom HJ, et al. Tungsten oxide zirconia as solid superacid catalyst for esterification of waste acid oil (dark oil). *Bioresour. Technol.* 2010;101:6589–6593.

95. Liu R, Wang X, Zhao X, et al. Sulfonated ordered mesoporous carbon for catalytic preparation of biodiesel. *Carbon*. 2008;46:1664–1669.

96. De Almeida RM, Noda LK, Goncalves NS, et al. Transesterification reaction of vegetable oils, using superacid sulfated TiO_2 -base catalysts. *Appl. Catal. A: Gen.* 2008;347:100–105.

97. Juan JC, Zhang JC, Yarmo MA. Structure and reactivity of silica – supported zirconium sulfate for esterification of fatty acid under solvent – free condition. *Appl. Catal. A: Gen.* 2007;332:209–215.

98. Holser RA, Doll KM, Erhan SZ. Metathesis of methyl soyate with ruthenium catalysts. *Fuel*. 2006;85:393–395.

99. Alsalmeh A, Kozhevnikova EF, Kozhevnikov IV. Heteropoly acids as catalysts for liquid-phase esterification and transesterification. *Appl. Catal. A: Gen.* 2008;349:170–176.

100. Park YM, Lee DW, Kim DK, et al. The heterogeneous catalyst system for the continuous conversion of free fatty acids in used vegetable oils for the production of biodiesel. *Catal. Today*. 2008;131:238–243.

101. Usmanov R.A., Gumerov F.M., Gabitov F.R., et al. Liquid Fuels: Chap. 3. Types, Properties and Production. Nova Science, 2012. p. 99.

102. Mazanov SV, Usmanov RA, Gumerov FM. Heterogeneous catalysis in the production of biodiesel fuel. Publishing house «LAP Lambert Academic Publishing. 2017, - 189 p.

103. Mazanov SV, Gabitova AR, Usmanov RA, et al. Continuous production of biodiesel from rapeseed oil by ultrasonic assist transesterification in supercritical ethanol. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2016;118:107–118.

104. Gumerov FM, Mazanov SV, Usmanov RA, et al. Theoretical and Experimental Study of Reaction of Transesterification of Vegetable Oils in an Alcohol Environment in the SbCF and SCF Conditions with the Ultrasonic Emulsification of Reaction Mixture and the Use of Heterogeneous Catalysts. *International Journal of Analytical Mass Spectrometry and*

Chromatography. 2017;5:40-55.

105. Mazanov SV, Gabitova AR, Gumerov FM, et al. Production of biodiesel fuel under supercritical fluid conditions using heterogeneous catalysts. *Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2015;2(10):71-83.

106. Mazanov SV, Usmanov RA, Gumerov FM, et al. Transesterification of rapeseed oil in an ethanol medium under supercritical fluid conditions in a flow reactor in the presence of a heterogeneous catalyst. *Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2014;5:14-24.

107. Mazanov SV, Usmanov RA, Gumerov FM, et al. Experimental study of the process of obtaining biodiesel fuel under supercritical fluid conditions. *Problemy Energetiki*. 2017;1-2:41-51.

108. Mazanov SV, Gabitova AR, Miftahova LH, et al. Preparing biodiesel fuel in supercritical fluid conditions with heterogeneous catalysts. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2016;10(7):1099–1107.

109. Mazanov SV, Usmanov RA, Gumerov FM, et al. Experimental study of non-catalytic and catalytic reactions of interesterification of rapeseed oil under supercritical fluid conditions in a flow-type unit. *Industry of Kazakhstan*. 2019;1(105):90-92.

110. Lamba N, Gupta R, Modak JM, et al. ZnO catalyzed transesterification of Madhuca indica oil in supercritical Methanol. *Fuel*. 2019;242:323–333.

111. Demirbas A. Biodiesel from sunflower oil in supercritical methanol with calcium oxide. *Energy Conversion and Management*. 2007;48:937–941.

112. Vol'eva VB, Belostotskaya IS, Komissarova NL, et al. Biodiesel without free glycerin. *Journal of Organic Chemistry*. 2015;51:935.

113. Mushrush GW, Beal EJ, Hardy DR, et al. Jet Fuel System Icing Inhibitors: Synthesis and Characterization. *J.C. Ind. Eng. Chem*. 1999;38(6):2497-2502.

114. Varfolomeev SD, Gladchenko MA, Gaydamaka SN, et al. Biocatalytic Conversion of Lignocellulose Materials to Fatty Acids and Ethanol with Subsequent Esterification. Chemistry and Technology of plant substances. Chemical and Biochemical Aspects (Chapter 6). Apple Academic Press. Part I, 2017. - P.111-133.

115. George J, Patel Y, Pillai SM, et al. Methanol assisted selective formation of 1,2-glycerol carbonate from glycerol and carbon dioxide using nBu₂SnO as a catalyst. *J. Mol. Catal. Chem*. 2009;304:1-7.

116. Ochoa-Gómez JR, Gómez-Jiménez-Aberasturi O, Maestro-Madurga B, et al. Synthesis of glycerol carbonate from glycerol and dimethyl carbonate by transesterification: Catalyst screening and reaction optimization. *Appl. Catal. A: Gen*. 2009;366:315-324.

117. Malyaadi M, Jagadeeswaraiah K, Sai Prasad PS, et al. Synthesis of glycerol carbonate by transesterification of glycerol with dimethyl carbonate over Mg/Al/Zr catalysts. *Appl. Catal. A: Gen*. 2011;401:153-157.

118. Li L, Koranyi TI, Sels BF, et al. Highly-efficient conversion of glycerol to solketal over heterogeneous Lewis acid catalysts. *Green Chem*. 2012;14:1611-1619.

119. Suriyaprapadilok N, Kitiyanan B. Synthesis of Solketal from Glycerol and Its Reaction with Benzyl Alcohol. *Energy Procedia*. 2011;9:63-69.

120. Dodson JR, Leite TCM, Pontes NS, et al. Green acetylation of solketal and glycerol formal by heterogeneous acid catalysts to form a biodiesel fuel additive. *ChemSusChem*. 2014;7:2728-2734.

121. Rodrigues R, Goncalves M, Mandelli D, et al. Solvent-free conversion of glycerol to solketal catalysed by activated carbons functionalised with acid groups. *Catal. Sci. Technol*. 2014;4:2293-2301.

122. Eze VC, Harvey AP. Continuous Reactive Coupling of Glycerol and Acetone – a Strategy for Triglyceride Transesterification and In-situ Valorisation of Glycerol by-product. *Journal: Chemical Engineering Journal*. 2018;347:41-51.

123. Da Silva CXA, Mota CJA. The influence of impurities on the acid-catalyzed reaction of glycerol with acetone. *Biomass Bioenergy*. 2011;35:3547-3551.

124. Nanda MR, Yuan Z, Qin W, et al. Catalytic conversion of glycerol to oxygenated fuel additive in a continuous flow reactor: process optimization. *Fuel*. 2014;128:113-119.

125. Olivares-Carrillo P, Quesada-Medina J. Thermal decomposition of fatty acid chains during the supercritical methanol transesterification of soybean oil to biodiesel. *Journal of supercritical fluids*. 2012;72:52– 58.

126. Vieitez I, Silva C, Alckmin I, et al. Effect of temperature on the continuous synthesis of soybean esters under supercritical ethanol. *Energy and Fuels*. 2009;23:558–563.

127. Shin HY, Lim SM, Bae SY, et al. Thermal decomposition and stability of fatty acid methyl esters in supercritical methanol. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2011;92:332–338.

128. Aimaretti N, Manuale DL, Mazzieri VM. Batch study of glycerol decomposition in one-stage supercritical production of biodiesel. *Energy and Fuels*. 2009;23:1076–1080.
129. Marulanda VF, Anitescu G, Tavlarides LL. Investigations on supercritical transesterification of chicken fat for biodiesel production from low-cost lipid feedstocks. *J. of Supercritical Fluids*. 2010;54:53–60.
130. Chen J, Li J, Dong W, et al. The potential of microalgae in biodiesel production. *Renew Sustain Energy*. 2018;90:336–346.
131. Goh BHH, Ong HC, Cheah MY, et al. Sustainability of direct biodiesel synthesis from microalgae biomass: a critical review. *Renew Sustain Energy*. 2019;107:59–74.
132. Siow HT, Aminul I, Yun HT. Algae derived biodiesel using nanocatalytic transesterification process. *Chem. Eng. Res*. 2016;111:362–370.
133. De Filipis P, Giavarini C, Scarsella M, et al. Transesterification processes for vegetable oils: a simple control method of methyl ester content. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1995;72:1399–1404.
134. Sousa FP, Luciano MA, Pasa VMD. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE). *Fuel Process. Technol*. 2013;109:133–140.
135. Usmanov RA, Mazanov SV, Gabitova AR, et al. The effect of fatty acid ethyl esters concentration on the kinematic viscosity of biodiesel fuel. *J. Chem. Eng*. 2015;60(11):3404–3413.
136. Gabitova AR, Mazanov SV, Usmanov RA, et al. Viscometry as a method for determining concentration of fatty acid ethyl esters in biodiesel fuel. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017;53(1):77–86.
137. Gabitova AR, Mazanov SV, Usmanov RA, et al. Viscometry as a method for determining the concentration of ethyl esters of fatty acids in biodiesel fuel. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2017;1:47–51.
138. Borges ME, Díaz L, Gavín J, et al. Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements. *Fuel Processing Technology*. 2011;92:597–599.
139. Knothe G, Steidley KR. Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures. *Fuel*. 2007;86:2560–2567.
140. Valeri D, Meirelles AJA. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. *JAOCs*. 1997;10:1221–1226.
141. Kusdiana D, Saka S. Two-step preparation for catalyst-free biodiesel production: hydrolysis and methyl esterification. *Applied Biochem, Biotechnol*. 2004;113(1):781–791.
142. D'Ippolito SA, Yori JC, Iturria ME, et al. Analysis of a two-step, noncatalytic, supercritical biodiesel production process with heat re-recovery. *Energy Fuels*. 2007;21:339–346.
143. Minami E, Saka S. Kinetics of hydrolysis and methyl esterification for biodiesel production in two-step supercritical methanol process. *Fuel*. 2006;85:2479–2483.
144. Ilham Z, Saka S. Two-step supercritical dimethyl carbonate method for biodiesel production from *Jatropha curcas* oil. *Bioresource Technology*. 2010;101(8):2735–2740.
145. Sugami Y, Minami E, Saka S. Renewable diesel production from rapeseed oil with hydrothermal hydrogenation and subsequent decarboxylation. *Fuel*. 2016;166:376–381.
146. Martinovic FL, Kiss FE, Micic RD, et al. Comparative techno-economic analysis of single-step and two-step biodiesel production with supercritical methanol based on process simulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;132:751–765.

Authors of the publication

Sergey M. Valerievich –Kazan National Research Technological University.

Farid M. Gumerov –Kazan National Research Technological University.

Rustem A. Usmanov –Kazan National Research Technological University.

Asiya R. Gabitova –Kazan National Research Technological University.

Zufar I. Zaripov - Kazan National Research Technological University.

Sergey D. Varfolomeev –Institute of Biochemical Physics N.M. Emanuel RAS

Violetta B. Vol'eva – Institute of Biochemical Physics N.M. Emanuel RAS

Yury A. Shapovalov – Kazakh National University al-Farabi.

Получено

17.06.2022 г.

Отредактировано

30.06.2022 г.

Принято

04.07.2022 г.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВАТТМЕТРОГРАММЫ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Манахов В.А., Цветков А.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является разработка метода диагностики оборудования штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) в процессе эксплуатации посредством спектрального анализа сигнала массива ваттметрограммы. В качестве измерительного элемента применяется модуль ваттметрирования, инструментом для обработки сигналов служит разработанное программное обеспечение в программном комплексе MatLab. Амплитудные спектры исследуемого объекта, построенные из массива ваттметрограммы путем быстрого преобразования Фурье, в программной среде MatLab, применяются для анализа технического состояния ШСНУ.

МЕТОДЫ. Метод ваттметрирования и спектрального анализа сигнала массивов ваттметрограммы позволяет осуществлять контроль ШСНУ во время его работы. Этот метод контроля отличается высокой точностью, чувствительностью к формированию повреждений и позволяет использовать компьютерные технологии для обработки и анализа сигналов в целях диагностики устройств.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Метод спектрального анализа раскрыт в полном объеме. Рассмотрено понятие спектра и его построения. Раскрыт метод ваттметрирования, также принцип работы и основные характеристики датчика ваттметрирования. Произведено снятие и оценка экспериментальных данных с действующей ШСНУ во время ее работы. Приведен пример ваттметрограммы и по массиву данных построен спектр. Анализ ваттметрограммы ШСНУ с осложненными условиями работы, у которой наблюдалось пенообразование, показал скачок электрической нагрузки в верхней точке положения балансира. Спектральный анализ показал рост амплитуд на определенных частотах, которые могут говорить о наличии вспенивания нефти в цилиндре насоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данный метод спектрального анализа сигнала ваттметрограммы с помощью программы MatLab позволяет выявлять механико-химические дефекты ШСНУ по амплитудно-частотным характеристикам параметров ваттметрограммы.

Ключевые слова: спектр; спектральное разложение Фурье; ваттметрограмма; диагностика; штанговая скважинная насосная установка; датчик ваттметрирования; спектральный анализ; сигнал; массив; пенообразование; гистограмма; Microsoft Excel MatLab.

Для цитирования: Манахов В.А., Цветков А.Н. Спектральный анализ механических дефектов по параметрам ваттметрограммы штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 50-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-50-62.

SPECTRAL ANALYSIS OF MECHANICAL AND CHEMICAL DEFECTS BY THE PARAMETERS OF THE WATTMETROGRAM OF DRAWER DRIVE PUMPING UNIT IN THE PROCESS OF OPERATION

VA. Manakhov AN. Tsvetkov,

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Abstract: *TARGET.* The purpose of this work is to develop a method for diagnosing the equipment of sucker-rod pumping units (SRPU) during operation by spectral analysis of the

wattmetergram array signal. A wattmetering module is used as a measuring element, the developed software in the MatLab software package serves as a signal processing tool. The amplitude spectra of the object under study, constructed from an array of wattmetrograms by fast Fourier transform, in the MatLab software environment, are used to analyze the technical condition of the SRPU.

METHODS. The method of wattmetering and spectral analysis of the signal of wattmetergram arrays makes it possible to control the SRPU during its operation under voltage. This control method is characterized by high accuracy, sensitivity to damage formation and allows the use of computer technologies for signal processing and analysis in order to diagnose devices.

RESULTS. The method of spectral analysis is fully disclosed. The concept of spectrum and its construction is considered. The method of wattmetry is disclosed, as well as the principle of operation and the main characteristics of the wattmetry sensor. The removal and evaluation of experimental data from the operating SRPU during its operation was carried out. A wattmetrogram is constructed and a spectrum is constructed from the signal data array. The wattmetrogram of the SRPU with complicated working conditions, in which foaming was observed, showed a jump in the electrical load at the upper point of the balancer position. Spectral analysis showed an increase in amplitudes at certain frequencies, which may indicate the presence of oil foaming in the pump cylinder.

CONCLUSION. This method of spectral analysis of the wattmetrogram signal with the help of the MatLab program makes it possible to identify mechanical and chemical defects of the SRPU according to the amplitude-frequency characteristics of the wattmetrogram parameters.

Keywords: spectrum; spectral Fourier decomposition; wattmeter diagram; diagnostics; sucker rod pumping unit; wattmetering sensor spectral analysis; signal; array; foaming; histogram; Microsoft Excel; MatLab.

For citation: Manakhov VA. Tsvetkov A.N Spectral analysis of mechanical and chemical defects by the parameters of the wattmetrogram of drawer drive pumping unit in the process of operation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):50-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-50-62.

Введение

Практически в каждой технической или энергетической системе приходится встречаться с таким понятием как сигнал, служащий для переноса информации между элементами этой системы. Такие сигналы можно назвать информационными или сигнал – это есть материальный носитель информации. Сигналы существуют как во временной, так и в частотной областях; мы можем одинаково точно думать о них как о значениях, изменяющихся во времени (временная область), или как о сочетаниях основных частот (спектральная область).

Метод определения этих основных частот по временным изменениям называется спектральным разложением Фурье или спектральным анализом. Спектральное разложение Фурье используется сегодня так широко, что даже мимолетное упоминание о его наиболее важных приложениях является длительным занятием. Спектральный анализ используется в квантовой физике для раскрытия структуры материи в мельчайших масштабах, а в космологии - для изучения Вселенной в целом. Спектроскопия и рентгеновская кристаллография полагаются на спектральный анализ для определения химического состава и физической структуры из мельчайших количеств материалов, а спектральный анализ света от звезд говорит нам о составе и температуре тел, отделенных от нас световыми годами. Инженеры рутинно вычисляют преобразования Фурье при анализе механических колебаний, при акустическом проектировании концертных залов, а также при строительстве самолетов и мостов. В медицине методы Фурье призваны реконструировать работу органов, полученные с помощью компьютерной томографии и МРТ, для выявления нарушений работы сердца и нарушений сна. Спектральный анализ может помочь нам отличить музыкальные инструменты, сделанные мастерами, от некачественных копий, могут помочь вернуть к жизни испорченные аудиозаписи великих вокалистов и могут помочь в проверке истинной личности говорящего.

В электроэнергетике существуют электромагнитные величины такие как ток I , напряжение U , напряженность электрического поля $\vec{E}$ и другие величины физически представлены именно в виде сигналов, изменяющихся во времени. Следовательно, функция

времени $S(t)$, с размерностью соответствующей физической величины – есть математическая модель данного сигнала.

Одним из ведущих отраслей Российской Федерации является нефтегазовая отрасль. Для обеспечения требуемой надежности и эффективности добычи нефти, актуально остается вопрос выявления дефектов и неисправностей в штанговых скважинных насосных установках в процессе добычи.

Научная новизна данной статьи состоит в исследовании и разработке возможного метода диагностики механических дефектов штанговых скважинных насосных установок путем спектрального анализа данных, полученных по параметрам ваттметрограммы. Практическая новизна состоит в том, что данные дефектов, диагностированные в процессе эксплуатации, могут быть использованы в качестве базы дефектов нефтяных установок, выявленных с использованием спектрального анализа.

Литературный обзор (Literature Review)

Более ста лет назад Жан Батист Фурье показал, что любая форма волны, существующая в реальном мире, может быть сгенерирована путем сложения синусоидальных волн. Проиллюстрируем это на рисунке 1 для простой формы волны, состоящей из двух синусоидальных волн.

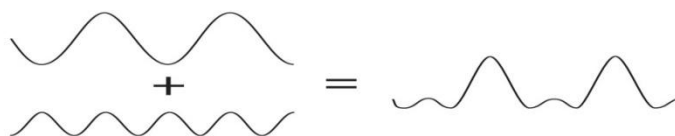


Рис. 1. Сложение синусоидальных волн

Fig.1. Addition of sinusoidal waves

Правильно выбирая амплитуды, частоты и фазы этих синусоидальных волн, мы можем генерировать форму волны, идентичную нашему желаемому сигналу. И наоборот, мы можем разбить любой существующий сигнал на те же самые синусоидальные волны. Можно показать, что эта комбинация синусоидальных волн уникальна. Любой сигнал может быть представлен только одной комбинацией синусоидальных волн. [1-3]

Очень часто информация кодируется в синусоидах, которые образуют сигнал. Это относится как к естественным сигналам, так и к тем, которые были созданы человеком. Многие вещи колеблются в нашей вселенной. Например, речь – это результат вибрации голосовых связок человека; звезды и планеты меняют свою яркость, вращаясь вокруг своих осей и вращаясь друг вокруг друга; корабельные винты генерируют периодическое смещение воды и так далее. Форма сигнала во временной области не важна в этих сигналах; ключевая информация находится в частоте, фазе и амплитуде составляющих синусоид. Для извлечения этой информации используется быстрое преобразование Фурье.[4-6]

Рассмотрены приложения спектрального анализа российских авторов: Татаринов В.Н., Татаринов С. В., Харкевич А.А., Недольский А.Н., Бойко Б.П., Тюрин В.А. а также были рассмотрены и зарубежные авторы: Хайкин., Персиваль и Уолден., Порат., Терриен, что показало различные точки зрения о построении и структуре спектра и его анализа.

Что касается, предположений о возможности применения ваттметрограмм для контроля над работой ШСНУ были впервые высказаны профессором Куликовским Лонгином Францевичем еще в 1948 г., и в то время не были разработаны методики расшифровки ваттметрограмм, из-за малых мощностей вычислительной техники.

С помощью метода ваттметрирования можно определить:

- состояние работы насоса;
- степень неуравновешенности станка-качалки (СК);
- наличие отрицательных усилий, ведущих к преждевременному выходу из строя редуктора;
- степень износа и состояние отдельных узлов станка-качалки;
- состояние ремней передачи;
- степень загрузки электродвигателя [7].

В настоящее время спектральным анализом механических дефектов в ШСНУ активно занимается доктор технических наук Хакимьянов Марат Ильгизович из Уфимского государственного нефтяного технического университета, им написано более 30 работ по данной и смежным тематикам.[8]

Результаты литературного обзора показали, что эти проблемы совершенно недостаточно разработаны и слабо освещены, в том числе и в нормативной литературе. Предлагаемые методы главным образом направлены либо на диагностику самой ваттметрограммы, либо диагностику по динамограмме. В связи с этим предложен новый

метод диагностирования, широко не используемый в диагностике механических дефектов ШСНУ, основанный на спектральном анализе сигнала, полученный по параметрам ваттметрограммы [1-18].

На сегодняшний день в связи с повышенными требованиями к диагностике и надежности ШСНУ при минимальных затратах на обслуживание, спектральный анализ химических и механических дефектов по параметрам ваттметрограммы ШСНУ заслуживает внимания и дальнейшего развития.

Материалы и методы (Materials and methods)

В электроэнергетике и электронике часто используется математическая модель сигнала $F(\omega)$ – функция частоты, известная как спектр сигнала. Функция времени $S(t)$ и спектр описывают один и тот же сигнал, следовательно, они взаимосвязаны. Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний [2].

Представление $S(t)$ в виде суммы гармонических колебаний называют спектральным разложением Фурье, которое в 1965 году, благодаря появлению второго поколения ЭВМ (переход к транзисторной элементной базе, появление первого монитора с параметрами: производительность – $5 \cdot 10^4$ коротких операций в секунду, разрядность – 24–48 бит, емкость ОЗУ–64–512 Кбайт) сделало цифровые вычисления спектра практически осуществимыми.

Рисунок 2 представляет собой трехмерный график сложения синусоидальных волн. Две оси – это время и амплитуда, по временной области. Третья ось – это частота, которая позволяет нам визуальнo отделять синусоидальные волны, чтобы дать нам нашу сложную форму волны. Если мы наложим этот трехмерный график вдоль оси частот, мы получим представление (рис. 2 б). Это представление синусоидальных волн во временной области. Сложение их вместе в каждый момент времени дает исходную форму сигнала.

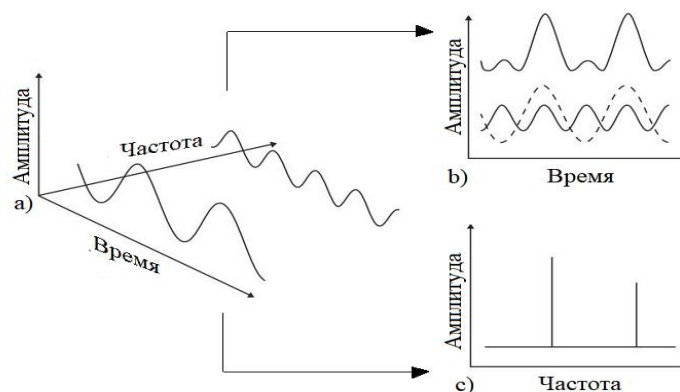


Рис. 2 Взаимосвязь между временной и частотной областями.

а) Трехмерные координаты времени, частоты и амплитуды;
б) Временная область; в) Частотная область.

Fig.2 The relationship between the time and frequency domains.

a) Three-dimensional coordinates of time, frequency and amplitude;
b) Time domain; c) Frequency domain.

Однако, если мы посмотрим на наш график вдоль оси частоты, как показано на рисунке 2.с), мы получим совершенно иную картину. Здесь у нас есть оси амплитуды и частоты, то, что обычно называют частотной областью. Каждая отдельная волна, которую мы отделили от входного сигнала, отображается в виде вертикальной линии. Её высота представляет амплитуду сигнала, а положение вертикальной линии представляет частоту этого сигнала. Исходя из рисунков 2 б и 2с, видим, что каждая линия представляет собой синусоидальную волну, мы однозначно охарактеризовали наш входной сигнал в частотной области. Это представление частотной области нашего сигнала называется спектром сигнала. Каждая синусоидальная линия спектра является составляющей общего сигнала.

Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний, или его еще называют *спектральным разложением Фурье*.

$$S(t) = A \cos(2\pi f t + \Phi) \quad (1)$$

Аргумент функции $(2\pi f t + \Phi)$, (рад) называется текущей фазой. Колебание полностью определено, если известны три параметра: начальная фаза Φ , амплитуда A , частота f . Начальная фаза может быть любой в интервале $-\pi < \Phi < \pi$. Амплитуда A может быть любой, но обязательно положительной величиной. Частота f является физическим параметром, размерность которого Герц.

В теории сигналов под энергией сигнала понимается величина:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt \quad (2)$$

В свою очередь, средняя мощность в общем виде определяется как

$$P_{cp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S^2(t) dt \quad (3)$$

Если средняя мощность является конечной, а – энергия сигнала E бесконечная величина, то спектральное разложение сигнала $S(t)$ имеет вид ряда:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \Phi_n) \quad (4)$$

Если энергия сигнала E – конечная величина, спектральное разложение имеет интегральное представление

$$S(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega) \cos \omega t + \Phi(\omega) d\omega \quad (5)$$

В разложении (4) частота принимает дискретные значения ω_n . Множество амплитуд A_n и множество начальных фаз Φ_n гармонических колебаний представляют дискретный спектр сигнала $S(t)$.

В разложении (5) роль амплитуды играет дифференциал

$$dA = \frac{1}{\pi} F(\omega) d\omega \quad (6)$$

Сигнал $S(t)$, в данном случае, формируется суммой гармонических колебаний *всех частот*. Амплитуда (6) на фиксированной частоте бесконечно мала и её значение не определено, поскольку бесконечно малый интервал частот d не имеет конкретного значения. Однако сигнал (5) полностью определен, если известны *амплитудная спектральная плотность* $F(\omega)$ и начальная фаза $\Phi(\omega)$ как функции частоты. Функции $F(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ представляют непрерывный спектр сигнала $S(t)$ [2].

Анализ выражений (4) и (5), дает понять, что они имеют общие свойства, следовательно, спектр сигнала $S(t)$ – это есть множество начальных фаз гармонических колебаний кратных частот и амплитуд, сумма которых равна сигналу $S(t)$.

Спектр периодического сигнала

Сигнал $S_T(t)$ называется периодическим, если все его значения повторяются через промежутки времени, кратные T , где T – период повторения сигнала, $k \in Z$. Такой сигнал можно разложить в гармонический ряд Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos 2\pi n F_1 t + b_n \cdot \sin 2\pi n F_1 t) \quad (7)$$

где A_0 – постоянная составляющая сигнала, определяемая выражением

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T s_T(t) dt. \quad (8)$$

Частота первой гармоники F_1 обратно пропорциональна периоду сигнала:

$$F_1 = \frac{1}{T} \quad (9)$$

Коэффициенты ряда Фурье a_n и b_n определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \cos(2\pi n F_1 t) dt, \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \sin(2\pi n F_1 t) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

Зависимость коэффициентов $\{A_0, a_n, b_n\}$ от частоты называют гармоническим спектром периодического сигнала в квадратурной форме. Эта зависимость изображается в виде дискретной функции частоты для значений $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots \infty$. Коэффициент A_0 определен при $f = 0$. Если функция сигнала $s(t)$ нечётная, то коэффициенты $a_n = 0$, если чётная, то $b_n = 0$.

Периодический сигнал $S_T(t)$ также можно представить в амплитудно-фазовой форме ряда Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(2\pi n F_1 t + \phi_n) \quad (11)$$

$n \cdot F_1$ – частота n -й гармоники периодического сигнала.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (12)$$

где A_n – амплитуда n -й гармоники периодического сигнала, определяемая по формуле:

$$\phi_n = \begin{cases} -\arctg \frac{b_n}{a_n}, a > 0, \\ -\arctg \frac{b_n}{a_n} \pm \pi, a < 0, \end{cases} \quad (13)$$

ϕ_n – начальная фаза n -й гармоники периодического сигнала

Односторонним фазовым спектром сигнала называют зависимость начальной фазы гармоник от частоты, в то же время односторонний амплитудный спектр есть зависимость амплитуд гармоник периодического сигнала от частоты.

Обе зависимости определены для значений частоты $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots \infty$. Общий вид этих зависимостей приведен на рисунке 3.

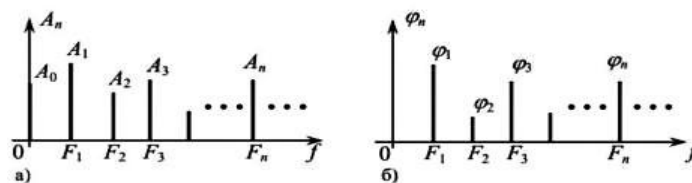


Рис.3. Односторонний спектр периодического сигнала: а) амплитудный спектр, б) фазный спектр.

Fig.3. One-sided spectrum of a periodic signal amplitude spectrum, b) phase spectrum.

Для расчета односторонних спектров необходимо знать аналитическое выражение сигнала $S(t)$. Тогда по формуле (8) вычисляется постоянная составляющая сигнала A_0 , по формуле (9) – частота первой гармоники F_1 , по формулам (10) – коэффициенты a_n, b_n , по формулам (12) и (13) – амплитуды и начальные фазы гармоник сигнала.

На рисунке 4 показано преобразование гармонического сигнала первой, третьей и пятой гармоник в амплитудно-частотный спектральный вид.

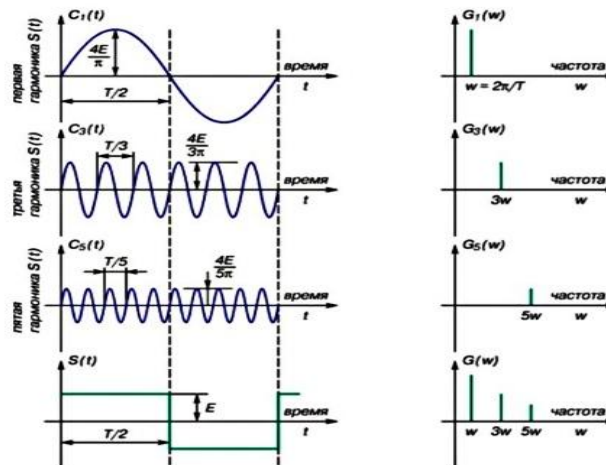


Рис.4. Преобразование Фурье для представления гармонического сигнала в спектр.

Fig.4. Fourier transform to represent a harmonic signal into a spectrum.

Результаты (Results)

Для построения спектра нам нужно получить периодический сигнал и сделать процедуру преобразования Фурье. Периодическим сигналом будет служить ваттметрограмма, которая представляет собой зависимость мощности, потребляемой электродвигателем, измеряемого станка-качалки действующей нефтяной штанговой скважинной насосной установки, во времени. Массив данной ваттметрограммы, путем измерения мгновенных значений тока и напряжения с их последующим преобразованием в мощность, являются исходными данными для анализа. (Рисунок 5.)

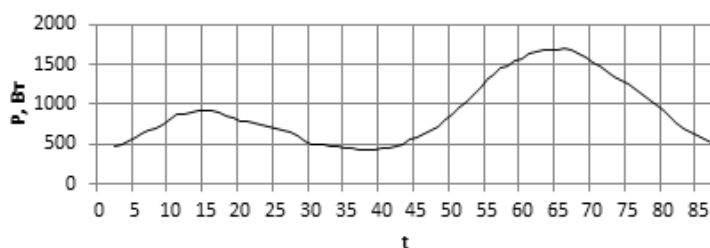


Рис. 5. Ваттметрограмма с действующей нефтяной штанговой скважинной насосной установки. Fig. 5. Wattmetrogram from an operating oil rod well pumping unit.

Предлагаемым методом диагностики по параметрам ваттметрограмм можно определить состояние механической части ШСНУ. Поэтому для проверки адекватности разработанных математических и имитационных моделей необходимо сравнить экспериментальные данные ваттметрограмм с эталонной ваттметрограммой.

Для построения ваттметрограммы нужен накопленный массив активной мощности и период качания станка-качалки. При этом эталонным считается массив, полученный на протяжении определенного времени без существенного изменения параметров станка-качалки. Эти данные были получены с действующей нефтяной насосной установки, с применением модуля ваттметрирования «CILK-UI», который предназначен для измерения токов, напряжений, потребляемой мощности и электроэнергии по трем фазам электродвигателей станков-качалок, а также для периодического формирования ваттметрограмм.

Модуль выполняет следующие функции:

- периодическое измерение мгновенных (за период измеряемого переменного тока) значений напряжений и токов по трем фазам измеряемой сети,
- вычисление периода (частоты) измеряемого переменного тока по фазе А,
- вычисление действующих за период значений напряжения и тока по трем фазам,
- вычисление полной мощности, активной мощности и коэффициента мощности по трем фазам,
- вычисление сдвига фаз между напряжениями фаз А и В, А и С,
- вычисление и периодическое накопление электрической энергии по трем фазам,
- периодическое (с заданным периодом) обновление массивов действующих значений токов, напряжений и активной мощности по трем фазам.

Частота дискретизации у модуля равна 6,5 Гц, что не дает нам возможности диагностики электрических дефектов, т.к. электрические дефекты можно диагностировать, при равной или превышающей промышленной частоте тока.

Модуль выполнен в виде законченного блока в поликарбонатном корпусе со съемной верхней крышкой. Конструктивно модуль оснащен защелкой для монтажа на стандартную 35 мм DIN-рейку.

Данный модуль имеет погрешности каналов измерений, такие как:

- максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения тока – 2%,
- максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения напряжения – 2%,
- максимальная приведенная погрешность измерения коэффициента мощности – 3 %,
- максимальная приведенная погрешность вычисленных значений полной и активной мощности – 3 %.

Данные, полученные модулем ваттметрирования, сохраняются в формате XLS программе *Microsoft Excel*, после чего обрабатываются и загружаются в программу *Matlab*. С 13 октября по 15 декабря 2021 года проведены опытно-промышленные испытания электропривода ЭПСН-15 производства АО «ЧЭАЗ» на скважинах НГДУ «Джалильнефть» (СП «Татнефть-Добыча») ПАО «Татнефть». В качестве объектов испытаний были подобраны скважины с осложненными условиями работы. На рисунке 6 представлена ваттметрограмма одной из скважин при нормальной работе ШСНУ. По сути своей данная ваттметрограмма является эталоном для данной скважины, т.к. построена по методу определения минимального отклонения по десяти качаниям, которые являются эталонными, т.е. были замерены при нормальной работе. При измерении данных ваттметрограмм не было обнаружено механических дефектов, а потребление

электроэнергии двигателем находилось в пределах номинального значения по паспортным данным.

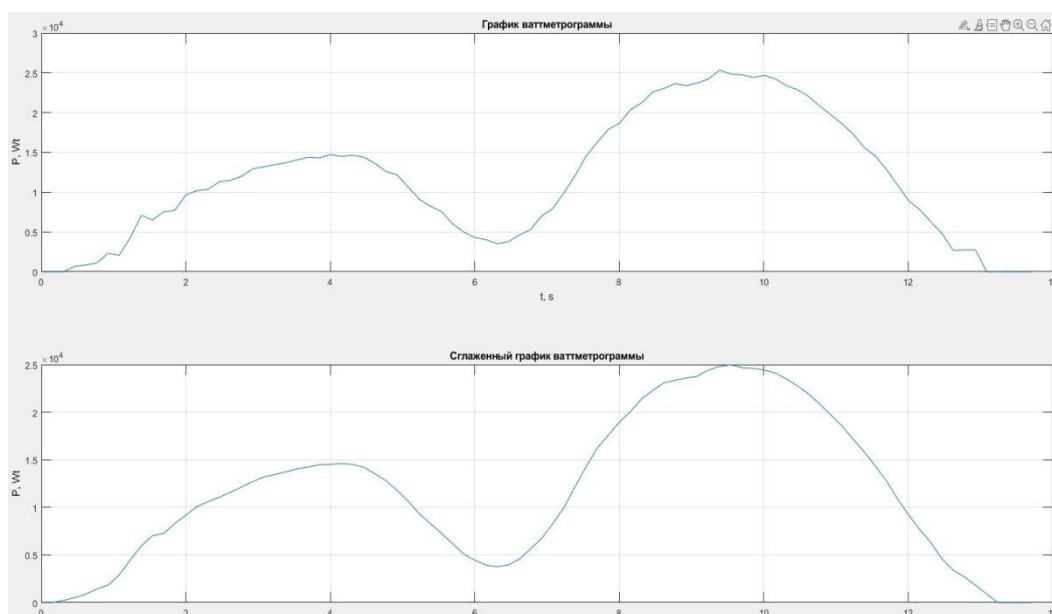


Рис. 6. Исходная и усредненная ваттметрограммы при нормальной работе ШСНУ.

Fig. 6. Initial and smoothed wattmetrograms during normal operation of the rod borehole pumping unit.

Пенообразование в цилиндре насоса происходит из-за слишком быстрой добычи нефтепродукта, при которой нефть просто не успевает поступать в нефтяной пласт с мест залежей и в следствии не успевает поступать в скважину.

На рисунке 7 приведена ваттметрограмма, полученная при работе станка-качалки с вспениванием жидкости в цилиндре насоса ШСНУ, часто данный процесс называют образованием эмульсии.

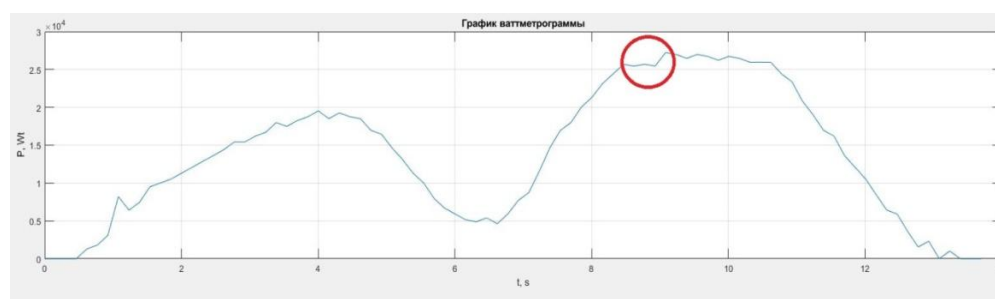


Рис. 7. Ваттметрограмма при вспенивании нефтяной жидкости в цилиндре насоса ШСНУ

Fig. 7. Wattmetrogram during foaming of the oil liquid in the cylinder of the pump rod borehole pumping unit

По ваттметрограмме можно заметить скачок в пиковой точке, который мы можем наблюдать в красной отметке на рисунке 7, что соответствует самой низкой точке устьевого штока и верхней точке балансира, в начале подъема нефти в штанговом насосе. Эти скачки и повышенная нагрузка в данных точках говорят о вспенивании нефтяной жидкости в поступающем в цилиндр насоса.

Вспенивание может образовываться из-за ускоренного темпа откачки, когда образуются конусы обводнения, препятствующие прохождению нефти в скважину. В случае этого уменьшить приток воды в скважину и пенообразование можно путём поддержания противодавления на нефтяной пласт или уменьшением скорости вращения двигателя, что автоматически скажется на уменьшении темпа откачки нефти и уменьшении пенообразования.

Вспенивание нефти чаще образуется в скважинах в верхней части столба, реже имеет место у забоя, и в основном пена собирается на поверхности нефти.

В некоторых месторождениях, где падение пласта идёт полого, нефть как бы плавает на поверхности воды в нижней части нефтяного пласта. В таких случаях количество воды попадающей в скважину, в большой степени зависит от скорости откачки нефти. Обычно в скважину попадает немного воды, если дебит невелик, уровень жидкости в скважине поддерживается умеренно высоким и насос находится над кровлей нефтяного пласта (правая часть рисунка 8). Содержание в нефти воды называется нефтяной эмульсией – это есть механическая смесь нефти и пластовой воды, нерастворимых друг в друге и находящихся в мелкодисперсном состоянии (в виде мелких капель) (Рис. 9).

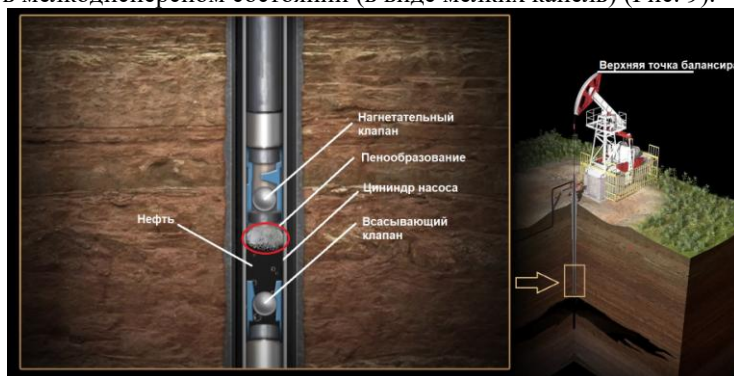


Рис.8. Пенообразование в цилиндре насоса с демонстрацией положения балансира.

Fig.8. Foaming in the pump cylinder with a demonstration of the position of the balancer.

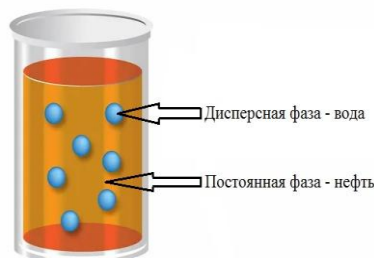


Рис. 9. Нефтяная эмульсия Fig. 9. Oil emulsion

Для диагностирования вспенивания построим эталонный спектр и спектры по 4 ваттметрограммам, полученные в период роста пенообразования и посмотрим спектральные зависимости, полученные при отклонении от нормальной работы станка качалки. На спектрах отбросим низкочастотную составляющую. Для удобства сравнения совместим спектры путем наложения в одном частотном диапазоне (Рис. 10).

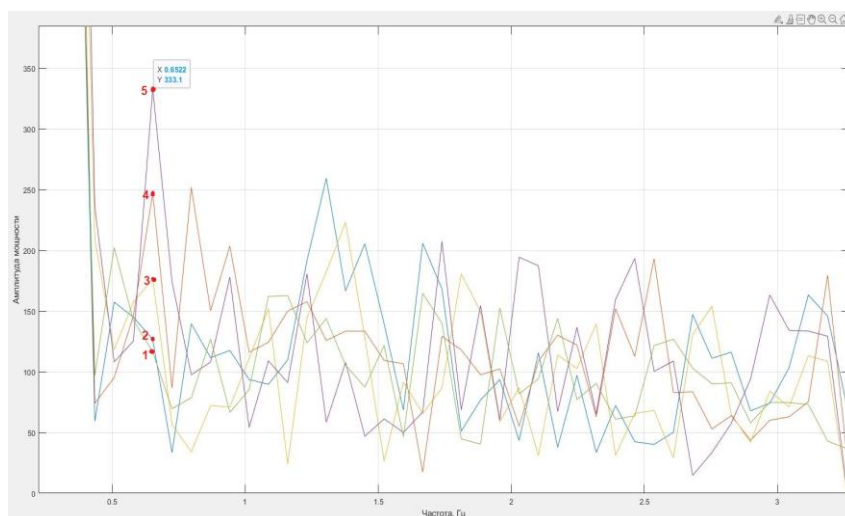


Рис. 10. Сравнение эталонного спектра и спектров с нарастанием пенообразования

Fig. 10. Comparison of the reference spectrum and spectra with an increase in foaming

На спектре можно заметить рост в амплитуде на частоте 0,6522 Гц, которая является кратной частоте качания станка-качалки с учетом передаточного отношения редуктора и шкивов ременной передачи на вал электродвигателя, через который и были полученные

исходные данные для построения спектра. Будем считать данную частоту характерной для пенообразования на основе анализа ваттметрограмм, полученных на двух осложненных нефтяных скважинах, где наблюдался рост амплитуды именно на данной частоте и нескольких скважин без пенообразования, где на данной частоте рост амплитуды отсутствовал. При этом исследуемые ваттметрограммы получены на заведомо исправном оборудовании, прошедшем стадию «подземного ремонта оборудования». Стоит отметить, что спектр должен выглядеть в дискретном виде как на рисунке 3, программа *Matlab* достраивает линии между точками амплитуд, и поэтому для удобства анализа переведем все значения спектров в формат *XLS* программе *Microsoft Excel* и построим гистограмму (Рис. 11). На рисунке видна характерная для данного дефекта (пенообразования) частота 0,6522 Гц, на которой происходит рост амплитуды от эталонного спектра до спектра максимального пенообразования. Также можем увидеть прямую зависимость роста амплитуды спектра и в более низкочастотной области, что говорит о росте пенообразования.

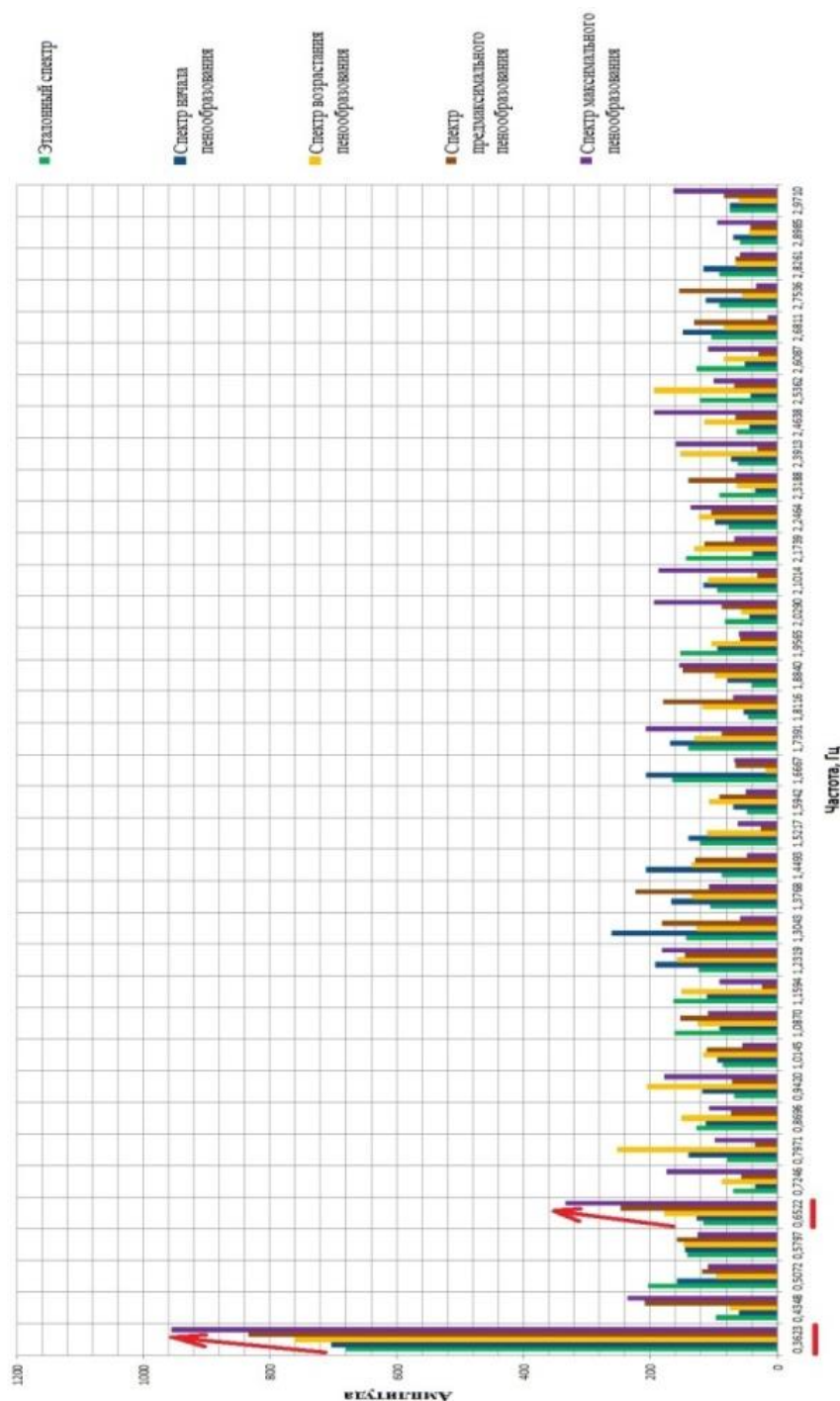


Рис. 11. Представление полученных спектров в виде гистограммы

Fig. 11. Representation of the obtained spectra in the form of a histogram

Заключение (Conclusions)

В полном объеме рассмотрен входной сигнал в виде ваттметрограммы ШСНУ и произведен спектральный анализ данного сигнала. Для непрерывного контроля состояния установок необходимо осуществлять анализ ваттметрограмм и их спектров. Снятие и оценка экспериментальных данных с действующей ШСНУ проводилась в процессе ее эксплуатации. Построена ваттметрограмма и по её массиву сигнала построен спектр. Осуществлена диагностика по параметрам ваттметрограммы и спектрального анализа ШСНУ, у которой было обнаружено пенообразование. Выявлен кратковременный скачок активной мощности в верхней точке нахождения балансира.

Удалось выявить и диагностировать такое негативное явление как вспенивание нефтяной жидкости. Решением данной проблемы является уход на пониженную частоту вращения электрического двигателя, что непременно сократит число ходов плунжера в минуту, это создаст возможность нефтяной жидкости успевать поступать в нефтяной пласт с мест залежей, тем самым скважинный насос будет наполнен. Если игнорировать данный негативный фактор, и продолжать осуществлять откачку добываемой жидкости в том же темпе, это вызовет понижение уровня жидкости в скважине, что в свою очередь уменьшает коэффициент полезного действия насоса и вызывает взбалтывание нефти и воды, т.е. будет способствовать эмульгированию при каждом ходе плунжера, что в свою очередь приведет к повышению нагрузки на шток, перегрузке приводного электродвигателя и аварийной остановке станка-качалки.

Существуют и другие методы уменьшения вспенивания нефти, и не допуская уменьшения динамического уровня нефтяной жидкости в скважине, такие как работа насоса с перерывом, установки насоса меньших размеров и если это возможно увеличение погружения насоса. Однако погружение насоса должно быть рассчитано так, чтобы не происходило полного «откачивания» досуха, т.е. чтобы жидкость не выкачивалась из скважины быстрее, чем поступала в нее – во избежание засасывания насосом воздуха или газа.

Исходя, из полученных экспериментальных данных и проделанной работе можно сделать следующие выводы:

- все сигналы имеют синусоидальную форму, что характерно для природы токовых колебаний;
- для диагностики электрических дефектов двигателя частота дискретизации, используемая в нашем опыте крайне мала, для успешной диагностики нужна частота дискретизации как минимум равной частоте тока, а желательно кратно превышающей его;
- частота дискретизации, используемая, в нашем опыте при построении ваттметрограмм отлично подходит для диагностики механической части оборудования ШСНУ;
- спектральный анализ дает более точную картину о развивающихся механических и химических дефектах, например такого как как вспенивание нефтяной жидкости.

Предложенный метод спектрального анализа сигнала ваттметрограммы с программным обеспечением MatLab позволяет обнаруживать механико-химические дефекты ШСНУ по амплитудно-частотным характеристикам параметров ваттметрограммы.

Литература

1. Солодкий Е.М. Энергоэффективная система управления добычи нефти штанговой насосной установки / Е.М. Солодкий, В.П. Казанцев, Д.А. Даденков, С.В. Сальников // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 12. С. 292-295.
2. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие / Б.П. Бойко, В.А. Тюрин. - Казань: Казанский федеральный университет, 2014. - 38 с.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с. ISBN 978-5-9775-0606-9. ЭБС «Знаниум».
4. Подлесный С. А. Устройства приема и обработки сигналов [Электронный ресурс] : / С. А. Подлесный, Ф. В. Зандер. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. 352 с. ISBN 978-5-7638-2263-2. ЭБС «Знаниум».
5. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015. 378 с.
6. Ившин И.В., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И., Цветков А.Н., Низамиев М.Ф., Корнилов В.Ю. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(5):3-13.
7. Манахов В.А., Цветков А.Н. Определение состояния и функционирования оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации по

параметрам ваттметрограммы. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):127-139. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139>.

8. Хакимьянов М.И. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов / М.И. Хакимьянов, Ф.Ф. Хусаинов, И.Н. Шафиков // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2. С. 35-40.

9. Сергиенко А.Б. MATLAB и преобразование Фурье / Exponentargo Математика в приложениях. 2003. № 3. С. 84–86.

10. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20(7-8):107-116.

11. 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;22(4):88-98.

12. Цветков А.Н., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., Ившин И.В. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно- поступательного действия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №3-4. С.105-111.

13. Cheng, Q. Vector Control of an Induction Motor based on a DSP. Master of Science Thesis./ Q. Cheng, L.Yuan. Sweden, Gothenburg: Chalmers Bibliotek, 2011. 76 p.

14. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model / D.S. Torgaeva, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov, N.A. Shalyapina // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. October. Vol. 9, Issue 1. P. 4403–4409.

15. Sensorless Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. Application Report [электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/an/bpra057/bpra057.pdf> (дата обращения 01.02.2022).

16. Frendo E., Bonamy D. English for the Oil Industry 1 Course Book. Pearson Education ESL 2017- P 80.

17. Roberto L. Soza. Review of Downhole Dynamometer Testing [электронный ресурс]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (дата обращения 08.03.2022).

18. J.F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis [электронный ресурс]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (дата обращения 04.04.2022).

Авторы публикации

Манахов Валерий Александрович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Цветков Алексей Николаевич – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Solodky EM, Kazantsev P, Dadenkov D.A. Energy-efficient oil production management system of a rod pumping unit. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2018;12:292-295.

2. Boyko BP, Tyurin VA. *Signal spectrum: an educational and methodical manual*. Kazan: Kazan Federal University, 2014. 38 p.

3. Sergienko AB. *Digital signal processing: textbook. stipend*. 3rd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p. (Educational literature for universities). ISBN 978-5-9775-0606-9. EBS «Znanium».

4. Podlesny SA, Zander FV. *Devices for receiving and processing signals* [Electronic resource] / Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2011. 352 p. ISBN 978-5-7638-2263-2. EBS «Znanium».

5. Anuchin AS. Control systems of electric drives. M.: MEI, 2015. 378 p.

6. Ivshin IB, Safin AR, Gibadullin R, et al. Analysis of the development of electric drives for oil pumping machines based on the results of a patent search. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2019;21(5):3-13.

7. Manakhov VA, Tsvetkov AN. Determination of the condition and functioning of the equipment of rod borehole pumping units during operation according to the parameters of the wattmetrogram. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(3):127-139. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139>.
8. Khakimyanov MI, Khusainov FF, Shafikov IN. Problems of increasing the energy characteristics of electric drives of borehole rod pumps. *Electrotechnical systems and complexes*. 2017;2:35-40.
9. Sergienko A.B. MATLAB and Fourier transform. Exponentapro Mathematics in applications. 2003;3:84-86.
10. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu. Model of a rocking machine control system based on synchronous motors with a sensorless method. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018;20(7-8):107-116.
11. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., Logacheva A.G., Petrov T.I., Kuvshinov N.E. Control measuring and information system of the experimental stand. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2020;22(4):88-98.
12. Tsvetkov AN, Safin AR, Gibadullin RR, et al. A test bench with a software and hardware complex for the study of an electric reciprocating machine. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2016;3-4:105-111.
13. Cheng Q, Yuan L. *Vector Control of an Induction Motor based on a DSP*. Master of Science Thesis. Sweden, Gothenburg: Chalmers Bibliotek, 2011. 76 p.
14. Torgaeva DS, Sukhorukov MP, Shinyakov YA, et al. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019. October. Vol. 9, Issue 1. P. 4403–4409.
15. Sensorless Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. Application Report [electronic resource]. URL: <http://www.ti.com/lit/an/bpra057/bpra057.pdf> (accessed 01.02.2022).
16. Frendo E., Bonamy D. *English for the Oil Industry 1 Course Book*. Pearson Education ESL 2017. P 80.
17. Roberto L. Soza. *Review of Downhole Dynamometer Testing* [electronic resource]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (accessed 08.03.2022).
18. J. F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. *Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis* [electronic resource]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (accessed 04.04.2022).

Authors of the publication

Valeriy A. Manakhov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexey N. Tsvetkov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 22.06.2022 г.

Отредактировано 29.06.2022 г.

Принято 06.07.2022 г.

ДАТЧИК ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Брякин¹ И.В., Бочкарев² И.В.

¹ Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук
Кыргызской республики, г. Бишкек, Кыргызстан

² Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызстан

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать дифференциальный параметрический индуктивный преобразователь значений вибрации в электрический сигнал, представляющий собой датчик виброперемещения (ДВ) с новым принципом действия. Теоретически обосновать работоспособность предложенного ДВ. Разработать новую систему виброакустического контроля технического состояния опор воздушных линий электропередач (ЛЭП) с использованием предложенного ДВ. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялась теория параметрических преобразователей и основные положения теории вибродиагностики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Конструктивной особенностью разработанного ДВ является отсутствие катушки возбуждения, причем его функциональные элементы образуют полноценный измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным коаксиально внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами проволоочных обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого датчика, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности. Полученный сигнал представляет собой функциональную зависимость выходного напряжения измерительного моста от величины внешних вибраций, характеристики временных реализаций которых отражают происходящие в опорах ЛЭП деградационные процессы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенная концепция системы мониторинга целостности опор ЛЭП фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, реализующей технологию PLC. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей опоры ЛЭП, вызванные естественными возмущающими факторами при их эксплуатации, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который составляет основу мониторинговой информации о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП.

Ключевые слова. Вибродиагностика, геотехническая система, датчик виброперемещения, измерительный мост, микровибрации, линия электропередач (ЛЭП), паразитные емкости, резонанс, система мониторинга состояния конструктивных элементов.

Для цитирования: Брякин И.В., Бочкарев И.В. Датчик виброперемещений для систем мониторинга состояния конструктивных элементов высоковольтных линий электропередач // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.

VIBRATION SENSOR FOR MONITORING SYSTEMS OF CONSTRUCTION ELEMENTS OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES

I.V. Bryakin¹, I.V. Bochkarev²

¹Institute of Mechanical Engineering and Automation of the National Academy of Sciences
Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan

²Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan

¹ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7463-8072>, bivas2006@yandex.ru

²ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>, elmech@mail.ru

Summary: *PURPOSE.* To develop a differential parametric inductive transducer of vibration values into an electrical signal, which is a vibration displacement sensor (DV) with a new principle of operation. Theoretically substantiate the performance of the proposed DV. To develop a new system for vibroacoustic monitoring of the technical condition of overhead power transmission line (TL) supports using the proposed DV. *METHODS.* When solving this goal, the theory of parametric transducers and the main provisions of the theory of vibration diagnostics were used. *RESULTS.* The design feature of the developed DV is the absence of an excitation coil, and its functional elements form a full-fledged measuring bridge, the arms of which include interturn capacitances of the windings of the first and second measuring coils, as well as capacitances formed by a metal cylindrical electrode with a coaxially located inside it ferromagnetic rod and the first lower rows of wire windings of the measuring coils. The bridge circuit operates in a resonant mode, which ensures the high sensitivity of the proposed sensor, and the quadrature conversion of the information signal provides the necessary level of noise immunity. The received signal is a functional dependence of the output voltage of the measuring bridge on the magnitude of external vibrations, the characteristics of the temporary realizations of which reflect the degradation processes occurring in the power transmission line supports. *CONCLUSION.* The proposed system for monitoring the integrity of power transmission line supports is actually a distributed real-time sensor network that implements PLC technology. The DV of each sensor module registers microvibrations of the structural elements of the corresponding power transmission line support, caused by natural disturbing factors during their operation, and converts them into an electrical information signal, which forms the basis of monitoring information about the current state of the power transmission line support structural elements.

Keywords. *Vibrodiagnostics, geotechnical system, vibration displacement sensor, measuring bridge, microvibrations, power line (TL), parasitic capacitances, resonance, system for monitoring the state of structural elements.*

For citation: I.V. Bryakin, I.V. Bochkarev. Vibration sensor for monitoring systems of construction elements of high-voltage power lines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):63-76. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-63-76.

Введение

Неотъемлемой частью энергетических систем являются опоры воздушных линий электропередач (ЛЭП), от выбора типа которых зависит долговечность и надежность конструкции самой ЛЭП, ее устойчивость к целому ряду внешних механических и природных факторов [1 - 3]. Поэтому, именно надежные опоры ЛЭП гарантируют безаварийную подачу электроэнергии потребителям, исключая перебои и возникновение внештатных, аварийных ситуаций. Следует отметить, что, несмотря на то, что отказы ЛЭП из-за разрушения опор составляют всего 13%, само разрушение опор имеет наиболее тяжелые последствия и приводит к большим затратам, связанным с восстановлением ЛЭП, и перерыву в электроснабжении [4, 5].

Наличие большого разброса прочности в таких материалах опор ЛЭП, как бетон, древесина и сталь, а также значительная изменчивость эксплуатационных нагрузок в виде собственного веса, крановой нагрузки, ветра и снега, действующих на элементы конструкции ЛЭП, часто приводит к технологическим разрушениям [6 - 9]. Так, например, при воздействии указанных факторов наиболее часто встречающимся дефектом является возникновение трещин, которые могут не влиять непосредственно на состояние опор ЛЭП в целом, но при этом свидетельствуют о серьезных конструкционных повреждениях, существенно снижающих долговечность и эксплуатационную безопасность опор ЛЭП. Причиной возникновения трещин служит обычно неправильное распределение нагрузки на несущие элементы конструкции опор ЛЭП, либо усадка фундамента, что в итоге и предопределяет необходимость развития методов диагностики эксплуатационного состояния оборудования ЛЭП. Главной и конечной целью такого диагностического обследования можно считать выявление оборудования, находящегося в предаварийном состоянии и оценка его технического ресурса. Это позволяет избежать надвигающихся

аварийных ситуаций, научно обосновать и минимизировать выбор необходимого и достаточного объема ремонтных мероприятий. При проведении подобных обследований объектами внимания становятся такие основные элементы ЛЭП, как провода и грозозащитные тросы, линейная арматура и изоляция, стойки опор, фундаменты и заземляющие устройства. Главными задачами при этом являются обнаружение элементов, снижающих надежность ЛЭП, установление причин возникновения дефектов, прогнозирование снижения ресурсов этих элементов ЛЭП [10-12].

В последние годы широкое распространение получили различные методы диагностики электрической части воздушных ЛЭП – проводов, контактных соединений и изоляции [13, 14]. Но для диагностики механической части ЛЭП – опор, стоек под оборудование и фундаментов, единственным широко распространенным способом остаются внешние осмотры, регламентируемые правилами эксплуатации электроустановок [15]. В большинстве случаев результаты подобных осмотров не могут считаться исчерпывающей диагностической информацией, так как наряду с видимыми дефектами конструкции зачастую имеют скрытые дефекты. Учитывая массовость этих элементов в составе любой электрической сети, можно констатировать, что вероятность возникновения аварий из-за повреждения механической части отдельных конструкций достаточно высока. Более того, следует подчеркнуть, что величина и распределение напряжений в опорах ЛЭП показывает не только механическую нагрузку непосредственно на опоры ЛЭП, но и косвенно характеризует нагрузку на провода [16]. Поэтому проблеме диагностики механической части ВЛ и ПС, находящихся в длительной эксплуатации, начали уделять более пристальное внимание [17-19]. Однако эти вопросы остаются актуальными как с точки зрения теории, так и практической реализации, и исследования, направленные на разработку новых систем контроля текущего состояния опор ЛЭП в настоящее время очень востребованы.

Материалы и методы

Рассмотрим ЛЭП в качестве технической системы (ТС), являющейся в свою очередь элементом геотехнической системы (ГТС). В общем случае структуру ГТС и взаимодействие ТС (инженерного сооружения в виде ЛЭП) с геологической средой и другими окружающими средами более детально можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 1.

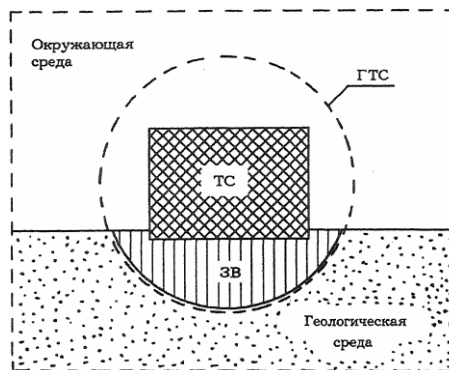


Рис. 1. Схема взаимодействия технической системы ТС с внешними средами.

Fig1. Scheme of interaction of a technical system with external environments

Как видно из рисунка 1, ГТС охватывает некоторое пространство, включающее собственно техническую систему (ТС) в виде ЛЭП, а также некоторые части окружающей и геологической сред в пределах, так называемой, зоны влияния (ЗВ) или зоны взаимодействия ТС и геологической среды. В результате действия различных экстремальных нагрузок на ТС со стороны геологической и окружающей сред, накопления повреждений, изменения с течением времени геометрии и тому подобных причин уменьшается способность данной механической системы сопротивляться внешним воздействиям. Следует отметить, что причинами отказов основных элементов ЛЭП в подавляющем числе случаев (в среднем до 70%) являются климатические и посторонние воздействия.

При возникновении нештатных ситуаций на первый план выходит проблема живучести такой ТС, т.е. ее способность оказывать сопротивление внешним воздействиям при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению ее геометрии. При этом системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом

ограниченную работоспособность, а системы с малой живучестью разрушаются катастрофически, что зачастую сопровождается большим материальным ущербом и гибелью людей.

Для предотвращения в подобных случаях катастрофических явлений необходимо принимать во внимание следующие основные факторы: 1 – любая деформация зарождается и развивается до критического состояния за определенное время; 2 – использование на различных инженерных сооружениях соответствующих систем мониторинга для контроля их основных параметров, а также поведения силовых (несущих) элементов под нагрузкой обеспечит необходимый уровень эксплуатационной надежности и безопасности.

В настоящее время существует множество методов и технологий неразрушающего контроля (НК), которые можно использовать для контроля состояния различных конструктивных элементов ЛЭП [20-22]. Одной из наиболее достоверных и информативных оценок является количественная оценка надежности элементов ЛЭП, полученная с помощью вибродиагностики, основанной на приеме и анализе виброакустических сигналов, которые представляют собой собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах, например, вибрационных, и акустическом шуме контролируемого объекта в окружающей среде.

Подобная виброакустическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП относится к классу систем функционального диагностирования, не требующих подачи на объект каких-либо целенаправленных сторонних воздействий. Иными словами, виброакустическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП работает в процессе применения объекта по назначению, при котором на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его эксплуатационными режимами функционирования в окружающей и геологической средах.

Для рассматриваемого случая рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП (металлические опоры ЛЭП и высоковольтные провода), возникающие при воздействии естественных возмущающих факторов в виде фоновых колебаний почвы под основанием опор ЛЭП и ветровых потоков. В результате такого воздействия во внутренних структурах указанных элементов ЛЭП возникают соответствующие случайные микровибрации, как результат возбуждения всех форм собственных колебаний ТС в целом.

Следует отметить, что вибрационное состояние ЛЭП определяется совокупностью его вибрационных характеристик и является следствием структурного и функционального состояний и динамических свойств его основных конструктивных элементов.

В качестве диагностических признаков могут быть использованы различные характеристики колебательных процессов: частота и амплитуда спектрального компонента, компонент кепстра, модуляционные характеристики, характеристики временных реализаций вибрации и ряд других.

Разработка датчика виброперемещения

Известно, что любая система НК предполагает наличие первичных измерительных преобразователей неэлектрической величины в электрический сигнал в виде соответствующих датчиков. На основе проведенного анализа научно-практической и патентной документации по известным техническим системам, применимым к диагностике опор ЛЭП, был сделан вывод о том, что наиболее приемлемыми являются системы НК, построенные на базе датчика виброперемещения (ДВ) из класса электромагнитных преобразователей, использующих инерцию твердотельных элементов и предназначенных для измерения низкочастотных динамических процессов [23-26]. К преимуществам подобных электродинамических вибродатчиков следует отнести широкий амплитудный диапазон, низкое выходное сопротивление и возможность передачи сигналов по длинной линии связи. Наряду с этим, известные ДВ имеют ряд недостатков, основными из которых являются невысокая чувствительность, а также недостаточная помехозащищенность.

Вариант блок-схемы измерительной цепи электродинамического осевого вибродатчика представлена на рис. 2.

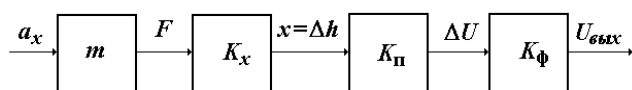


Рис. 2 Блок-схема измерительной цепи электродинамического вибродатчика

Fig. 2 Block diagram of the measuring circuit of the electrodynamic vibration sensor

Здесь обозначено: a_x – измеряемое ускорение; m – величина инерционной массы чувствительного элемента, являющейся коэффициентом передачи первого звена; F – сила инерции; K_x – коэффициент передачи второго звена; x – перемещение инерционной массы; K_L – коэффициент передачи преобразователя перемещений; ΔU – выходное напряжение преобразователя перемещения; K_Φ – коэффициент передачи активного фильтра; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение ДВ.

Для рассматриваемого варианта вибродиагностики предлагается использовать дифференциальный параметрический индуктивный преобразователь значений вибрации в электрический сигнал, т.е. ДВ соленоидного типа, в основе работы которого заложен новый принцип действия [27, 28]. На рисунке 3 показана конструкция этого датчика, которая в целом соответствует соленоидным плунжерным системам, ориентированным на измерения параметров вибрации в частотном диапазоне 1 Гц÷2 кГц. ДВ имеет цилиндрический корпус 1, закрытый с обеих сторон фланцами 2 и 3. Эти элементы изготовлены из металлического немагнитного материала и обеспечивают герметичность внутренней полости датчика. Фасонная втулка 4, выполненная из диэлектрического материала, на внешней поверхности имеет пазы для размещения цилиндрических измерительных катушек 5 и 6, а на ее внутренней поверхности установлен медный тонкостенный цилиндр 7. Инерционная масса датчика образована цилиндрической ферритовой втулкой 8, расположенной на немагнитном штоке 9 коаксиально цилиндру 7, который установлен на упругих плоских подвесах 12 и 13. Ферритовая втулка 8 в совокупности с немагнитным штоком 9 образуют якорь-плунжер ДВ.

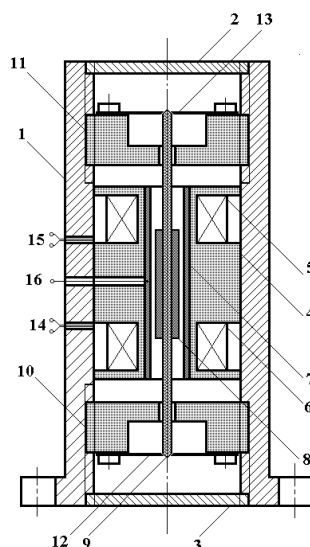


Рис. 3. Конструкция датчика *Fig. 3 Vibration sensor design*
виброперемещения

Указанные упругие подвесы жестко закреплены на диэлектрических фасонных шайбах 10 и 11, которые установлены с возможностью осевых перемещений относительно корпуса 1. На стадии подготовки датчика к работе путем смещения шайб 10 и 11 устанавливают нейтральное пространственное положение ферритовой втулки 8 относительно измерительных катушек 5 и 6.

Теоретическое обоснование работоспособности предложенного ДВ. Рассмотрим основные особенности функционирования предложенного ДВ.

В связи с тем, что рассматриваемый ДВ относится к классу параметрических преобразователей, одним из основных вопросов, требующего более внимательной проработки, является выбор и обоснование способа включения ДВ в измерительную схему. Конструктивные особенности рассматриваемого варианта ДВ предполагают включения ДВ в измерительную мостовую схему.

Известно, что в зависимости от характера решаемых измерительных задач различают три способа включения измерительных преобразователей в мостовую схему: 1 – мост с преобразователем, включенным в одно плечо моста; 2 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в противоположные плечи; 3 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в два соседних плеча моста.

В связи с тем, что рассматриваемый ДВ фактически представляет собой преобразователь дифференциального типа, то наиболее предпочтительным для него

является третий способ включения, который позволит достичь наибольшей чувствительности мостовой схемы в сочетании с температурной компенсацией и с наименьшей нелинейностью функции преобразования, не превышающей 0,5%.

Исходя из вышеизложенного, предлагается вариант электрической схемы включения ДВ (рис. 4), где: L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек (ИК₁ и ИК₂); R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; ЯП – якорь-плунжер, являющийся инерционным элементом датчика и на который воздействует виброускорение g ; $\dot{U}_0$ – комплексная величина гармонического напряжения питания, которое подводится к среднему электроду трехэлектродного конденсатора связи $C_{св}$, образованного медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенным ЯП и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; $C'_{св}$ и $C''_{св}$ – конденсаторы связи измерительных катушек, образованные частью среднего электрода трехэлектродного конденсатора связи $C_{св}$ и самыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек.

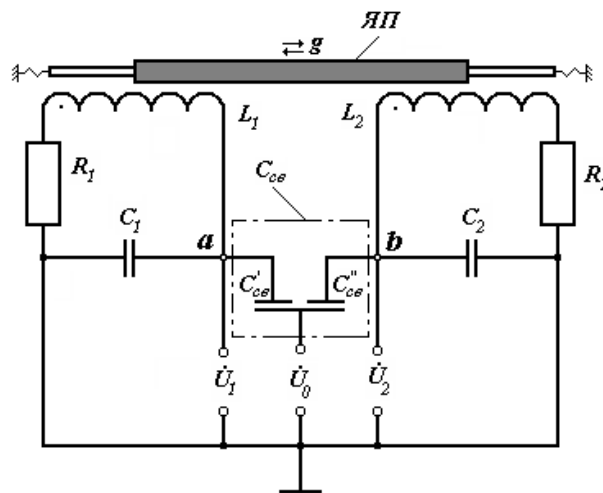


Рис.4. Электрическая схема включения ДВ

Fig. 4 The electrical circuit for switching on the vibration displacement sensor

Из рисунка 4 следует, что ДВ фактически является одинарным индуктивно-емкостным мостом, представляющим собой четырехплечевую схему, у которой в плечах установлены емкостные ($C'_{св}$ и $C''_{св}$) и индуктивные элементы L_1 и L_2 .

С учетом вышесказанного, для одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов $C'_{св}$ и $C''_{св}$ с заполненным диэлектриком межэлектродным пространством, электроды которых представлены в виде соответствующих двух коаксиальных цилиндров с осевой длиной l_c (м), условными радиусами r (м) и r^* (м) соответственно для внутреннего и внешнего электродов справедлива запись следующего вида:

$$C'_{св} = C''_{св} = C^* = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l_c}{\ln\left(\frac{r^*}{r}\right)}. \quad (1)$$

Следует отметить, что обмотки ИК₁ и ИК₂ с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 фактически включены в измерительную мостовую схему, где через ее соответствующую диагональ подается напряжение питания $u_0 = U_{0\max} \cdot \sin \omega t$ (комплексное значение $\dot{U}_0$ и циклическая частота возбуждения ω), а выходные сигналы регистрируются через электрические узлы «a» и «b» измерительной диагонали относительно корпуса в виде соответствующих напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$. В этом случае измеряемую величину можно определять по значению напряжения $\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$ в измерительной диагонали моста, который по своей сути является неравновесным измерительным мостом.

Кроме того, все конструктивные параметры обмотки ИК₁ идентичны всем конструктивным параметрам обмотки ИК₂ (рис. 5), т.е. $w_1 = w_2 = w$, $l_{1к} = l_{2к} = l_k$ и

$R_1=R_2=R^*$ – соответственно число витков, длина и активные сопротивления обмоток ИК₁ и ИК₂; $X_{C'_{св}} = X_{C''_{св}} = X_{C^*} = (\omega \times C^*)^{-1}$ – значение реактивных сопротивлений одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов соответственно $C'_{св}$ и $C''_{св}$.

В связи с тем, что при линейном осевом перемещении ЯП внутри ИК₁ и ИК₂ индуктивности последних L_1 и L_2 изменяются приблизительно пропорционально частям массы ЯП, находящихся внутри соответствующих измерительных катушек (рис.5), то для текущих значений этих индуктивностей можем записать:

$$\begin{aligned} L_1 &= \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 + \delta)}{l_k} = L_0 + \Delta L; \\ L_2 &= \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 - \delta)}{l_k} = L_0 - \Delta L, \end{aligned} \quad (2)$$

где w и l_k – соответственно число витков и длина измерительных катушек, D_2 и D_1 – наружный и внутренний диаметры поперечного сечения измерительных катушек в сантиметрах; l_0 – величина вхождения ЯП в сантиметрах; δ – линейное осевое смещение ЯП под воздействием внешних возмущений; μ – магнитная проницаемость материала ферритовой втулки ЯП; L_0 – индуктивности измерительных катушек при нейтральном положении ЯП; ΔL – изменение индуктивностей под воздействием внешних возмущений.

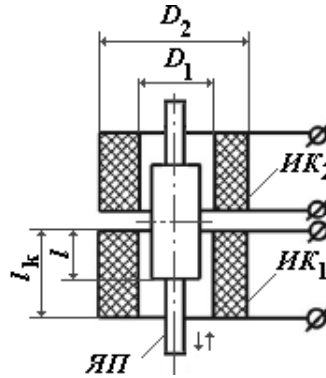


Рис. 5. Дифференциальный индуктивный датчик соленоидного типа Fig. 5 Solenoid type differential inductive sensor

Основное уравнение динамики ДВ с поступательным перемещением чувствительного элемента можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2 \times \delta = -a, \quad (3)$$

где a – ускорение перемещения корпуса ДВ в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{W/M}$ – собственная циклическая частота ДВ; β – степень затухания; W – жесткость упругих элементов, M – масса инерционного элемента.

При нейтральном положении ЯП для реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ можем констатировать, что

$$L_1 = L_2 = L_0; \quad X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L_0}, \quad (4)$$

где $X_{L_1} = \omega \times L_1$ и $X_{L_2} = \omega \times L_2$ – текущие значения реактивных сопротивлений соответственно ИК₁ и ИК₂; X_{L_0} – значение реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ при нейтральном положении ЯП, т.е. при сбалансированном состоянии мостовой схемы.

Таким образом, в режиме сбалансированного состояния, при котором $X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L_0}$, для индуктивно-емкостного моста на его измерительной диагонали будем иметь:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } \dot{U}_1 = \dot{U}_0 \times \frac{R_1 + j \times X_{L_1}}{R_1 + j \times (X_{L_1} - X_{C'_{св}})} + \dot{U}_{сш}; \quad \dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R_2 + j \times X_{L_2}}{R_2 + j \times (X_{L_2} - X_{C''_{св}})} + \dot{U}_{сш};$$

$\dot{U}_{сш}$ – комплексное значение аддитивных синфазных помех.

При внешнем воздействии на ЯП, вызывающем его линейное осевое смещение δ , возникают и соответствующие изменения реактивных сопротивлений в виде $\pm \Delta X_L$.

Тогда, с учетом сделанных замечаний, для реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ можем записать:

$$\begin{aligned} X_{L_1} &= \omega \times L_1 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L_0} + \Delta X_L; \\ X_{L_2} &= \omega \times L_2 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L_0} - \Delta X_L. \end{aligned} \quad (6)$$

В соответствии с выражениями (5) и (6) для регистрируемых напряжений $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{\text{СП}}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{\text{СП}}. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом того, что питание индуктивно-емкостного моста осуществляется электрическим напряжением на циклической частоте последовательного резонанса $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_0 \times C^*}$ двух симметричных пар его плечевых элементов $L_1; C'_{\text{св}}$ и $L_2; C''_{\text{св}}$, можем считать:

$$X_{L_0} = X_{C^*}$$

Тогда выражения (7) легко трансформируются к следующему виду:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для регистрируемого напряжения на измерительной диагонали индуктивно-емкостного моста после несложных математических преобразований получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{\text{СП}} - \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} - \dot{U}_{\text{СП}} = \\ &= \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*) \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2} - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2 \times R^* \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

В связи с тем, что $(R^*)^2 \gg (\Delta X_L)^2$ выражение (9) можно привести к виду:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*)}{(R^*)^2} \times \Delta X_L - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2}{R^*} \times \Delta X_L = \text{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \text{Im}(\Delta \dot{U}) \quad (10)$$

Для одновременной регистрации вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста требуется два квадратурных детектора (КД) с опорными напряжениями, сдвинутыми по фазе на $\pi/2$. Если векторы опорных напряжений совместить с осями координат на плоскости $\Delta \dot{U}$, то можно записать:

$$\Delta U_{\text{Re}} = |\Delta \dot{U}| \times \cos(\arg \Delta \dot{U}); \quad \Delta U_{\text{Im}} = |\Delta \dot{U}| \times \sin(\arg \Delta \dot{U}), \quad (11)$$

Из анализа полученного выражения (11) следует, что более определенную информацию, связанную с реакцией ЯП на внешнее возмущение, несет мнимая составляющая ΔU_{Im} .

Для повышения точности измерения вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста предлагается использовать синхронное детектирование, при котором синхронный детектор (СД) является линейным шестиполусником. При этом проводимость такого линейного шестиполусника при помощи опорного напряжения переменного тока периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения.

Функциональное уравнение для СД в общем случае можно представить в следующем виде:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = S \times u_{\text{ВХ}}(t) \times u_{\text{ОП}}(t)$$

где $u_{BbX}(t)$ – выходная величина СД; $u_{BX}(t)$ – измеряемая величина; $u_{OP}(t)$ – вектор коммутации (периодическая величина); S – постоянная, определяемая параметрами СД.

Следует отметить, что опорный сигнал, создающий вектор коммутации, поступает от того же источника, что и измеряемый сигнал.

Воспользуемся гармоническим типом СД, у которого вектор коммутации определяется выражением вида:

$$u_{OP}(t) = U_{OP_{max}} \times \cos \omega_p t$$

Тогда, при подаче на измерительный вход такого гармонического СД с вектором коммутации $u_{OP}(t) = U_{OP_{max}} \times \cos \omega_p t$ измеряемого синусоидального напряжения (с частотой, равной частоте вектора коммутации ω_p) $u_{BX}(t) = U_{BX_{max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi)$ на выходе СД получим соответствующий выходной сигнал:

$$u_{BbX}(t) = S \times U_{BX_{max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi) \times U_{OP_{max}} \times \cos \omega_p t$$

или

$$u_{BbX}(t) = \frac{S \times U_{BX_{max}} \times U_{OP_{max}}}{2} \times [\sin \varphi + \sin(2 \times \omega_p t + \varphi)] = u_{const} + u_{var} \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что при равенстве частот входного измеряемого сигнала и вектора коммутации выходной сигнал СД содержит постоянную слагаемую, пропорциональную реактивной компоненте вектора измеряемого сигнала:

$$u_{const} = \frac{S \times U_{BX_{max}} \times U_{OP_{max}}}{2} \times \sin \varphi \quad (13)$$

При этом, переменная слагаемая u_{var} выходного сигнала СД подавляется соответствующим сглаживающим инерционным фильтром.

Из выражения (13) следует, что применение гармонического СД позволит не только определить соответствующую компоненту вектора измеряемого сигнала, но и полностью исключить влияние высших гармоник и помех, наложенных на измеряемое напряжение.

В случае моногармонической вибрации для линейного осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений можем условно записать:

$$\delta = \delta_{max} \times \sin(\Omega t + \varphi_\delta); \quad (14)$$

где δ_{max} – величина максимального перемещения ЯП относительно его нейтрального расположения; Ω – угловая частота перемещения сердечника; φ_δ – начальная фаза перемещения ЯП (для рассматриваемого случая считаем, что $\varphi_{\delta=0}$).

Тогда, в соответствии с (2) и (14) будем иметь:

$$\Delta L = \mu \times w^2 \times \mu \times (D_2 - D_1) \times (l_k)^{-1} \times \delta = Q \times \delta_{max} \times \sin \Omega t \quad (15)$$

Для перевода двух КД в режим синхронного детектирования совместим векторы опорных напряжений КД на комплексной плоскости с соответствующими составляющими вектора питающего напряжения мостовой цепи $\dot{U}_0$. В этом случае, с учетом выражения (11) и (15), а также ранее сделанных замечаний, для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста можем записать:

$$\Delta U_{Im}(t) = S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{OP_{max}} \times \frac{1}{R^*} \times \Delta X_L = \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{OP_{max}} \times \delta_{max} \times \sin \Omega t \quad (16)$$

где $Q = \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times (R^* \times l_k)^{-1}$ – конструктивный коэффициент ДВ; S_{Im} – коэффициент преобразования СД для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста.

Для общего случая величина осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений может быть с достаточной точностью представлена следующим математическим рядом:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n \delta_i \times \sin(\Omega_i t + \varphi_i). \quad (17)$$

Тогда, с учетом (17) выражение (16) можно привести к виду:

$$\begin{aligned} \Delta U_{Im}(t) &= \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{OP_{max}} \times \delta(t) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \omega_p \times Q \times S_{Im} \times U_{0_{max}} \times U_{OP_{max}} \times \sum_{i=1}^n \delta_i \times \sin(\Omega_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (18)$$

Из выражения (18) определяется закон изменения $\delta(t)$, в соответствии с которым, используя решение дифференциального уравнения (3), находится в итоге и величина ускорения перемещения корпуса вибродатчика в абсолютной системе координат.

Полученное выражение (18) отражает четко выраженную функциональную зависимость приращения мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста от величины перемещения ЯП, вызываемой внешними вибрациями, характеристики временных реализаций которых косвенно отражают происходящие в конструктивных элементах ЛЭП критические деградационные процессы.

Система мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП. Предлагаемый новый тип ДВ ориентирован на применение в составе системы мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП, обобщенный вариант структуры которой представлен на рисунке 6: ДП – диспетчерский пункт; УП – устройство присоединения для вывода информационного сигнала с фидера ЛЭП; С – PLC-сервер; 1, 2, ... N – номера опор ЛЭП; 1.1, 2.1 ... N.1 – сенсорные модули опор ЛЭП, включающие в себя соответствующие ДВ; 1.2, 2.2, ... N.2 – PLC-модемы для преобразования и ввода информационного сигнала в фидеры соответствующих опор ЛЭП; 1.3, 2.3 ... N.3 – устройства присоединения для ввода информационного сигнала в фидеры соответствующих опор ЛЭП.

В данном случае система мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, использующей существующие линии электропередач в качестве физической среды передачи данных, т.е. реализующей технологию Power Line Communications (PLC), в основе которой лежит принцип множественного доступа “точка – множество точек” [29-31].

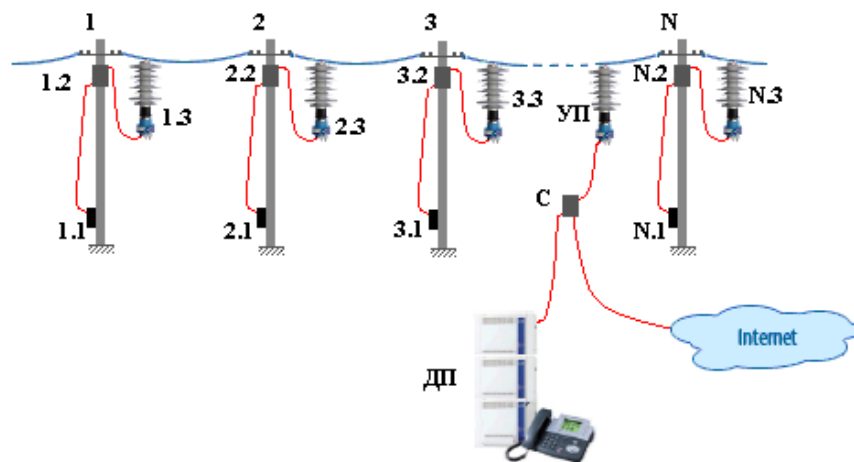


Рис. 6. Обобщённая структура системы мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП

Fig. 6 Generalized structure of the system for monitoring the state of structural elements of power transmission lines

Следует отметить, что предлагаемая система мониторинга представляет собой совокупность множества сенсорных информационных N подсистем, каждая из которых, в свою очередь, состоит из соответствующих функциональных компонентов: сенсорного модуля $N.1$, PLC-модема $N.2$ и вводное устройство присоединения $N.3$, представляющего собой специальное устройство на базе высоковольтного конденсатора. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей ЛЭП, вызванные воздействиями ветровых потоков и фоновыми колебаниями почвы под основанием опор ЛЭП, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который в последующем через соответствующие PLC-модем и вводное устройство присоединения передается в линию электропередачи. Данный информационный сигнал по силовым линиям электропередачи через УП выводится на PLC-сервер, с выходов которого преобразованный информационный сигнал поступает в диспетчерский пункт ДП, представляющий собой автоматизированное рабочее место диспетчера, где аккумулируется и соответствующим образом обрабатывается вся необходимая мониторинговая информация о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП.

Заключение

Опоры воздушных ЛЭП в значительной степени определяют надежность и долговечность ЛЭП в целом. Диагностика их состояния позволяет избежать возникновения аварийных ситуаций из-за их разрушений, приводящих к большим затратам, связанным с

восстановлением ЛЭП и перерыву в электроснабжении. Одним из наиболее достоверных и информативных способов диагностики является количественная оценка состояния опор ЛЭП, полученная с помощью вибродиагностики, где рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП при их эксплуатации, возникающие под воздействием естественных возмущающих факторов в виде ветровых потоков и колебаний почвы под основанием опор ЛЭП. Для решения этой задачи разработан ДВ соленоидного типа с новым принципом действия, предназначенный для измерения низкочастотных динамических процессов. В работе рассмотрены основные физические процессы, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения, а также приведено теоретическое обоснование работоспособности предложенного варианта ДВ. Конструктивной особенностью предложенного ДВ является отсутствие катушки возбуждения, причем его функциональные элементы образуют полноценный измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным коаксиально внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами проволочных обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что гарантирует даже при минимальных значениях рабочих токов максимальное значение напряжений на измерительных катушках. Это обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого датчика в целом, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

На базе разработанного датчика предложена концепция построения системы мониторинга целостности опор ЛЭП, которая фактически является распределенной сенсорной сетью реального времени, использующей существующие ЛЭП в качестве физической среды передачи данных, т.е. реализующей технологию PLC. ДВ каждого сенсорного модуля регистрирует микровибрации конструктивных элементов соответствующей опоры ЛЭП, вызванные рабочими воздействиями, и преобразует их в информационный электрический сигнал, который составляет основу мониторинговой информации о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП. В качестве диагностических признаков могут быть использованы различные характеристики вибрационного состояния ЛЭП, которое отражает в свою очередь соответствующие происходящие деградационные процессы в структуре материала ее конструктивных элементов.

Литература

1. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надёжность, безопасность, экономичность, живучесть. М.: Энергоатомиздат, 2009. 332 с.
2. Ведерников А. С., Гольдштейн В. Г., Халилов Ф. Х. Повышение надежности и энергоэффективности двухцепных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 2010. 272 с.
3. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Review from the Perspective of Contactless Technologies // Sensing and imaging. 2017, volume18, number1, pp. 1-18.
4. Хамидуллин И. Н., Ильин В. К. К вопросу о надежности воздушных линий электропередачи 35-500 КВ // Электротехнические комплексы и системы, 2016, №1, т. 12. С. 45-53.
5. Zhi-xiong Liu, Xiao-bo Feng. A Real-Time Reliable Condition Assessment System for 500kV Transmission Towers Based on Stress Measurement. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 8 pp.
6. Seale, R.D., R. Shmulsky, E.D. Entsminger, et al. Field test of a novel nondestructive testing device on wood distribution poles. // Journal of Wood and Fiber Science 2016, 48(3):156-161.
7. Kliukas R., Daniūnas A., Gribniak V., et al. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessment. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 14 (1).
8. Соловьёв С.В. Контроль технического состояния металлических опор воздушных линий электропередач // В сборнике: Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 171-174.
9. Mahmoudi_A., Jafari_M.A., Nasrollahzadeh K. Reliability-based approach to fragility analysis of lattice transmission tower in the type test_Engineering, 2022, 29(3), pp. 1125-1141.

10. Привалов, Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ-Д, 2015. 226 с.
11. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередач. Новосибирск: Наука, 2009. 137 с.
12. Ashraf M., Ahmad H.M., Siddiqi Z.A. A study of power transmission poles // Asian journal of civil engineering (building and housing), 2005, vol. 6, no. 6, pp. 511-532.
13. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Горячев М.П., и др. Анализ современных методов оценки состояния воздушных линий электропередачи по механическим параметрам проводов (обзор) // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2021, том 85, № 11. С. 1600-1606.
14. Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. Методика контроля механических параметров воздушных линий электропередачи на основе улучшенного инклинометрического метода. Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2019;21(3):160-171.
15. Колодий А. Диагностика оборудования воздушных линий электропередач. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. 38 с.
16. Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А. Анализ напряженно-деформированного состояния опоры воздушных линий электропередачи под действием ветровых нагрузок на провода электросети // В сборнике: Наука Промышленность Оборона. Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции. В 4-х томах. Под редакцией С.Д. Саленко. 2018. С. 51-54.
17. Гунгер Ю.Р., Чернев В.Т. Диагностика опор и фундаментов воздушных линий электропередачи. Современные методы оценки. // Новости электротехники, № 2. 2006. С. 134-136.
18. Белозеров Б.К., Лиманов И.Я., Белалами С. Краткий анализ диагностических приборов контроля состояния опор воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С. 128-131.
19. Бурнышева Т.В., Кожевников А.Н. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 2 (110). С. 1-12.
20. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надёжность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
21. Кожевников А., Сафонов О., Тарасов А. Экспресс-оценка работоспособности опор воздушных линий электропередачи по динамическим параметрам // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S3 (22). С. 27-29.
22. Белалами С., Попов Д. В. Акустический контроль опор линий электропередачи (ЛЭП) // Контроль. Диагностика. 2015, №7. С. 26-32.
23. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.
24. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. М: Машиностроение, 1987. 256 с.
25. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
26. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 228-234.
27. Брякин, И.В. Электродинамический акселерометр // Проблемы автоматики и управления, 2012, №2. С.154-148.
28. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 39-49.
29. Брякин И.В., Гришин В.М. Система мониторинга технического состояния зданий // Проблемы автоматики и управления, 2014, № 1 (26). С. 144-155.
30. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Корякин С.В. Способ передачи информации по сетям электропитания / Патент РФ на изобретение № 2749963. 21.06.2021, Бюл. № 18.
31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshin V.R., et al. Device for Data Communication along Power Lines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Pp. 7-12.

Авторы публикации

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, заведующий лабораторией «Информационно-измерительные системы», Институт машиноведения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской республики, г. Бишкек, E-mail: bivas2006@yandex.ru.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электромеханика», Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек. E-mail: elmech@mail.ru.

References

1. Skopintsev V.A. The quality of electric power systems: reliability, safety, economy, survivability. M.: Energoatomizdat, 2009. 332 p.
2. Vedernikov A. S., Goldstein V. G., Khalilov F. Kh. Improving the reliability and energy efficiency of double-circuit transmission lines. M.: Energoatomizdat, 2010. 272 p.
3. Khawaja A.H., Huang Q., Khan Z.H. Monitoring of Overhead Transmission Lines: A Re-view from the Perspective of Contactless Technologies. Sensing and imaging. 2017, volume18, number1, pages 1-18. DOI:10.1007/s11220-017-0172-9.
4. Khamidullin I. N., Ilyin V. K. On the issue of the reliability of overhead power lines 35-500 kV // Electrotechnical complexes and systems, 2016, No. 1, vol. 12. P. 45-53. (In Russ).
5. Zhi-xiong Liu, Xiao-bo Feng. A Real-Time Reliable Condition Assessment System for 500kV Transmission Towers Based on Stress Measurement. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 8 pp. doi.org/10.1155/2019/3241897.
6. Seale, R.D., R. Shmulsky, E.D. Entsminger, et al. Field test of a novel nondestructive test-ing device on wood distribution poles. // Journal of Wood and Fiber Science 2016, 48(3):156-161.
7. Kliukas R., Daniūnas A., Gribniak V., et al. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessmen. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 14(1), DOI:10.1080/15732479.2017.1402068.
8. Solovyov S.V. Control of the technical condition of metal supports of overhead power lines // In the collection: Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific-practical conference. 2018. S. 171-174. (In Russ).
9. Mahmoudi A., Jafari M.A., Nasrollahzadeh K. Reliability-based approach to fragility analysis of lattice transmission tower in the type test. Engineering, 2022, 29(3), pp. 1125-1141.
10. Privalov, E.E. Diagnostics of electric power equipment. Stavropol: Publishing house PARAGRAPH-D, 2015. 226 p.
11. Arbuzov R.S., Ovsyannikov A.G. Modern methods for diagnosing overhead power lines. Novosibirsk: Nauka, 2009. 137 p.
12. Ashraf M., Ahmad H.M., Siddiqi Z.A. A study of power transmission poles // Asian journal of civil engineering (building and housing), 2005, vol. 6, no. 6, pp. 511-532.
13. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Goryachev M.P., et al. Analysis of modern methods for assessing the state of overhead power lines by the mechanical parameters of wires (review) // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Physical series. 2021, Volume 85, No. 11. S. 1600-1606. (In Russ). DOI:10.31857/s0367676521110326.
14. Goryachev M.P., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Method for controlling the mechanical parameters of overhead power lines based on an improved inclinometric method. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2019; 21(3):160-171. (In Russ). doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-160-171.
15. Kolodiy A. Diagnostics of equipment for overhead power lines. Stavropol: PARAGRAPH Publishing House, 2014. 38 p.
16. Kozhevnikov A.N., Krasnorutsky D.A. Analysis of the stress-strain state of the support of overhead power lines under the influence of wind loads on the wires of the power grid // In the collection: Science Industry Defense. Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference. In 4 volumes. Edited by S.D. Salenko. 2018. S. 51-54. (In Russ).
17. Gunger Yu.R., Chervnev V.T. Diagnostics of supports and foundations of overhead power lines. Modern assessment methods. // News of electrical engineering, No. 2. 2006. P. 134-136.
18. Belozarov B.K., Limanov I.Ya., Belalami S. Brief analysis of diagnostic devices for monitoring the state of overhead transmission line supports. Transfer and distribution. 2020. No. 1 (58). pp. 128-131. (In Russ).

19. Burnysheva T.V., Kozhevnikov A.N. Methodology for assessing the technical condition of overhead power transmission line supports, taking into account typical operational defects // Engineering Journal: Science and Innovations. 2021. No. 2 (110). pp. 1-12. (In Russ). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-2-2053.
20. Yurkevich V.V., Skhirtladze A.G. Reliability and diagnostics of technological systems. M.: Publishing Center "Academy", 2011. 304 p.
21. Kozhevnikov A., Safonov O., Tarasov A. Express-assessment of the performance of overhead power transmission line supports by dynamic parameters // Electricity. Transmission and distribution. 2021. No. S3 (22). pp. 27-29. (In Russ).
22. Belalami S., Popov D. V. Acoustic control of transmission line supports (TL) // Control. Diagnostics. 2015, No. 7. pp. 26-32. DOI: 10.14489/td.2015.07.
23. Fedotov A.V. Theory and calculation of inductive displacement sensors for automatic control systems. Omsk: Publishing house of OmGTU, 2011. 176 p.
24. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevsky M.L. Electromagnetic sensors of mechanical quantities. M: Mashinostroenie, 1987. 256 p.
25. Karimi H. (Ed.) Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.
26. Guo A. A Vibration Sensor Design Research. Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, 2014, pp. 228-234.
27. Bryakin, I.V. Electrodynamic accelerometer // Problems of automation and control, 2012, no. 2. pp.154-148. (In Russ).
28. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R. Electrode-inductive vibration sensor with capacitive coupling // Electrotechnical systems and complexes. 2021. No. 4(53). pp. 39-49. (In Russ). doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-39-49.
29. Bryakin I.V., Grishin V.M. The system for monitoring the technical condition of buildings // Problems of automation and control, 2014, No. 1 (26). pp. 144-155. (In Russ).
30. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Koryakin S.V. Method for transmitting information over power networks / Patent RUS № 2749963. 06.21.2021, Byul. № 18.
31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., et al. Device for Data Communication along Power Lines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Pp. 7-12. (In Russ). DOI 10.1109/UralCon49858.2020.9216280.

Authors of the publication

Ivan V. Bryakin – Institute of Mechanical Science and Automation of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan.

Igor V. Bochkarev – Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan.

Получено

11.07.2022 г.

Отредактировано

03.08.2022 г.

Принято

04.08.2022 г.

УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Довгун В.П.¹, Егоров Д. Э.¹, Новиков В. В.¹, Синяговский А. Ф.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Серьезной проблемой конденсаторных установок, используемых в системах электроснабжения для компенсации реактивной мощности, является резонансное усиление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, а также перенапряжения, возникающие при коммутациях в сети. Для защиты установок от перенапряжений и влияния гармоник последовательно с батареями конденсаторов (БК) включают демпфирующие звенья. В статье рассмотрены установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями в форме лестничного LC-четырёхполюсника. Помимо компенсации реактивной мощности установки осуществляют фильтрацию гармоник и демпфирование переходных процессов, вызванных коммутациями в сети. МЕТОДЫ. Разработана процедура расчета демпфирующих звеньев лестничной структуры для установок поперечной емкостной компенсации, основанная на оптимизации частотной характеристики в пространстве параметров элементов демпфирующего звена. Определены условия, при которых звено обеспечивает демпфирование резонансных режимов, возникающих в параллельном контуре, образованном компенсирующим конденсатором и индуктивностью сети. С помощью предложенной процедуры расчета определены параметры звеньев различного порядка, осуществляющих демпфирование переходных процессов при коммутациях и фильтрацию гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. РЕЗУЛЬТАТЫ. Сравнительный анализ характеристик компенсирующих установок с различными вариантами демпфирующих звеньев показал, что установки с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют тяжелые переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети, а также обеспечивают фильтрацию гармоник в широком диапазоне частот. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В системах электроснабжения с большой долей нелинейных нагрузок необходимы установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов и ослабление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. Эти функции выполняют демпфирующие звенья, включаемые последовательно с батареями конденсаторов. В статье рассмотрены новые варианты демпфирующих звеньев в форме реактивных четырёхполюсников, ослабляющих перенапряжения при переходных процессах и уменьшающих гармонические искажения токов и напряжений.

Ключевые слова: установки поперечной емкостной компенсации; гармоники; резонансные режимы в системах электроснабжения.

Для цитирования: Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В.В., Синяговский А.Ф. Установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-77-89.

SHUNT POWER FACTOR CORRECTION DEVICES FOR DAMPING OF HARMONIC RESONANCE IN INDUSTRIAL POWER SYSTEMS

Dovgun VP¹, Egorov DE¹, Novikov VV¹, Sinjagovsky AF¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Harmonic resonance has become a serious problem of shunt capacitor banks for reactive power and voltage support. Effective solution to damp out the

capacitor-caused resonance is the series connection of capacitor bank with harmonic damping network. This paper presents a general design method for shunt capacitive compensating units with damping networks. The damping unit is designed in such a way that it provides harmonic filtering and adequate damping of the transient oscillations. **METHODS.** The method was developed for designing damping network in the form of ladder LC-two-port. The design is based on minimization of voltage total harmonic distortion (VTHD) in the point of common coupling. Normalized element parameters of the different order damping networks have been determined. **RESULTS.** Comparative study of transient behavior of shunt capacitive compensating units with damping networks illustrate the effectiveness of the propose structure. It has been observed that there is a significant reduction of transient overvoltage in switching of capacitor bank with damping network. **CONCLUSION.** This paper presents a new design method for capacitive compensating units with damping networks for industrial power systems with powerful nonlinear loads. The paper illustrates superior performance characteristics of proposed shunt capacitive compensating units by computer simulations.

Key words: shunt power correction devices; harmonics; resonance in power systems.

For citation: Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Sinjagovsky AF. Shunt power factor correction devices for damping of harmonic resonance in industrial power systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-77-89.

Введение

Конденсаторные установки (КУ) являются простыми и экономичными устройствами, используемыми для коррекции коэффициента мощности. В тех случаях, когда не требуется высокое быстродействие, переключаемые КУ используют для дискретного регулирования реактивной мощности и напряжения в точке подключения.

Серьезный недостаток конденсаторных установок заключается в том, что они имеют повышенную чувствительность к искажениям напряжений и токов, возникающих под влиянием нелинейных нагрузок. Потери мощности в конденсаторах пропорциональны частоте приложенного напряжения, поэтому гармонические искажения напряжения вызывают дополнительный нагрев и преждевременный выход конденсаторов из строя [1, 2]. Кроме того, несинусоидальная форма токов и напряжений сети вызывает снижение компенсирующего эффекта конденсаторных установок [3].

Другая проблема состоит в том, что конденсаторные установки образуют параллельные резонансные контуры с индуктивностью сети, которые могут вызвать усиление отдельных гармоник, а также перенапряжения при переходных процессах, сопровождающих коммутации в системе электроснабжения.

Для защиты конденсаторов от перегрузки токами высших гармоник последовательно с ними включают антирезонансные дроссели. Узкополосный фильтр, образованный батареей конденсаторов и дросселем, настраивают на частоту, близкую к частоте наиболее мощной гармоники. Однако сопротивление узкополосного фильтра имеет индуктивный характер на частотах, превышающих резонансную. Включение в сеть узкополосных фильтров приводит не к подавлению резонансных максимумов сопротивления сети, а к их смещению в область высоких частот.

В работах [4 - 8] предложено использовать устройства поперечной емкостной компенсации, включающие батарею конденсаторов и последовательно включенное демпфирующее звено, имеющее частотно-зависимое активное сопротивление $R(\omega)$. В качестве такого звена в [4, 6, 7, 9, 10] использован двухполосник, образованный параллельным соединением резистора и последовательного резонансного контура, настроенного на частоту основной гармоники (на рис. 1, а демпфирующий двухполосник выделен пунктиром). Компенсирующая установка (рис. 1, а) повторяет конфигурацию широкополосного фильтра С-типа, используемого для ослабления гармоник и коррекции частотных характеристик сети [5, 6, 9 - 12]. В [5, 8] установки поперечной емкостной компенсации на рисунке 1 названы демпфированными конденсаторами (damped capacitor). Частотная характеристика сопротивления широкополосного фильтра показана на рис. 1, б. Здесь ω_H – частота настройки, на которой сопротивление широкополосного фильтра имеет минимальное значение.

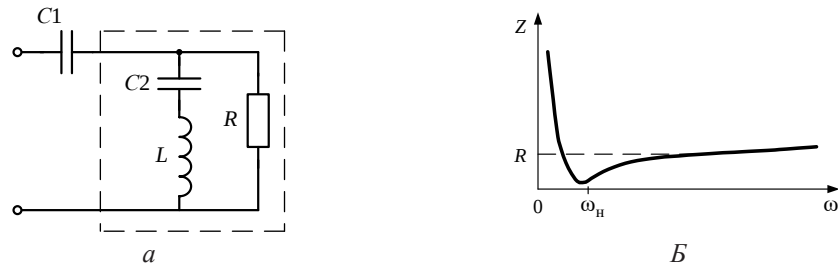


Рис. 1. Установка поперечной емкостной компенсации с демпфирующим звеном C-типа (а). Частотная характеристика широкополосного фильтра (б)

Fig. 1. Shunt capacitor with C-type damping unit (a). Broad-band filter frequency response (b)

Установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями, рассмотренные в [4 - 8], не обладают достаточной селективностью для одновременного подавления мощных низкочастотных гармоник и демпфирования резонансных режимов системы электроснабжения (СЭС). Кроме того, они имеют значительные потери в элементах демпфирующего звена [11]. Для СЭС, питающих мощные нелинейные нагрузки, необходимы более эффективные варианты устройств поперечной емкостной компенсации, обладающие достаточной селективностью для фильтрации гармоник, создаваемых нагрузкой, и коррекции частотных характеристик сети.

В статье рассмотрены новые конфигурации демпфирующих звеньев для установок поперечной емкостной компенсации в форме LC-четырёхполюсников лестничной структуры. Предложена процедура расчета параметров демпфирующих звеньев, основанная на оптимизации частотной характеристики КУ в пространстве параметров элементов звена. С ее помощью определены параметры нормированных демпфирующих звеньев второго-четвертого порядка. Установки обеспечивают компенсацию реактивной мощности, фильтрацию гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, демпфирование переходных процессов, вызванных коммутациями в сети. Анализ характеристик предлагаемых устройств показал, что они обладают существенными технико-экономическими преимуществами по сравнению с известными конфигурациями демпфированных конденсаторов на основе фильтров C-типа.

Литературный обзор

Конденсаторная установка и индуктивность сети образуют параллельный колебательный контур, способный вызвать резонансное усиление гармоники, частота которой определяется выражением [12]

$$f_h = f_1 \sqrt{\frac{S_{K3}}{S_{KY}}}, \quad (1)$$

где S_{KY} – мощность КУ, S_{K3} – мощность трехфазного короткого замыкания сети, h – порядковый номер гармоники.

Установка поперечной емкостной компенсации с демпфирующим звеном на рис. 1 представляет собой широкополосный силовой фильтр, осуществляющий компенсацию реактивной мощности, ослабление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, а также демпфирование резонансных режимов в сети. Для снижения потерь мощности на частоте основной гармоники ω_1 активное сопротивление демпфирующего звена $R(\omega_1)$ должно иметь минимальное значение. В то же время в диапазоне высокочастотных гармоник значение $R(\omega)$ должно быть достаточно большим для демпфирования резонансных режимов в системе внешняя сеть–компенсирующее устройство.

Комплексное сопротивление демпфирующего звена в фильтре C-типа (рис. 1, а) определяется выражением

$$Z_d(j\omega) = \frac{-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}}{-\omega^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC_2}} R.$$

Поскольку контур LC_2 настроен в резонанс на частоту основной гармоники, модуль сопротивления $Z_d(j\omega)$ имеет минимальное значение на этой частоте. В диапазоне высоких частот сопротивление демпфирующего звена определяется сопротивлением резистора R .

В [13 - 16] рассмотрены процедуры расчета широкополосных фильтров С-типа, предназначенных для компенсации реактивной мощности и ослабления гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. Мощность компенсирующей установки определяется емкостью основного конденсатора C_1 . Расчет демпфирующего звена на рис. 1, а сводится к определению индуктивности реактора L , емкости вспомогательного конденсатора C_2 и сопротивления демпфирующего резистора R . Емкость вспомогательного конденсатора

$$C_2 = C_1 \left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right).$$

Индуктивность реактора демпфирующего звена определяется по формуле

$$L = \frac{1}{\omega_1 C_1}.$$

В [16] предложено простое соотношение для определения сопротивления демпфирующего резистора

$$R = \frac{\omega_H L}{Q}.$$

Здесь Q – добротность широкополосного фильтра.

Проектирование фильтров С-типа, осуществляющих, помимо коррекции коэффициента мощности и ослабления гармоник, демпфирование резонансных режимов, рассмотрено в [5, 6, 9, 10]. В [5, 6] для оценки демпфирующих свойств широкополосных фильтров предложено использовать коэффициент усиления гармоник (harmonic amplification ratio – HAR), определяемый выражением

$$HAR(\omega) = \left| \frac{U_{KY}(j\omega)}{U_{KY}^0(j\omega)} \right| = \left| \frac{Z_{KY}(j\omega)}{Z_C(j\omega) + Z_{KY}(j\omega)} \right|. \quad (2)$$

Здесь $U_{KY}^0(j\omega)$, $U_{KY}(j\omega)$ – напряжение в точке общего присоединения соответственно до и после подключения компенсирующего устройства;

$Z_C(j\omega) = R_C(\omega) + jX_C(\omega)$ – комплексное сопротивление сети;

$Z_{KY}(j\omega) = R_{KY}(\omega) + jX_{KY}(\omega)$ – комплексное сопротивление компенсирующего устройства.

Коэффициент усиления гармоник, определяемый формулой (2), равен модулю коэффициента передачи тока нагрузки во внешнюю сеть:

$$K_I(\omega) = \frac{I_C}{J} = \left| \frac{Z_{KY}(j\omega)}{Z_C(j\omega) + Z_{KY}(j\omega)} \right|.$$

В [5] показано, что максимальное значение модуль коэффициента усиления гармоник принимает в том случае, если сопротивление сети имеет индуктивный характер и выполняется условие

$$X_C(\omega) = -X_{KY}(\omega).$$

При этом максимальное значение коэффициента усиления гармоник:

$$HAR_{worst}(\omega) = \sqrt{1 + \left(\frac{X_{KY}(\omega)}{R_{KY}(\omega)} \right)^2}. \quad (3)$$

Согласно (3) коэффициент усиления гармоник на частоте ω зависит от отношения реактивного и активного сопротивлений компенсирующего устройства.

Детальный анализ характеристик фильтров С-типа, проведенный в [5, 9], показал, что они обеспечивают демпфирование резонансных режимов на частотах, превышающих ω_H , если реактивное сопротивление $X_{KY}(\omega_H) = 0$ и выполняется условие

$$C_2 \geq \frac{\left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right)}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2} C_1.$$

Сопротивление демпфирующего резистора вычисляется по формуле

$$R = \frac{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1}{\omega_H \sqrt{\left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1\right) C_1 C_2 - C_2^2}}.$$

Частотную характеристику сопротивления фильтра С-типа можно варьировать с помощью единственного параметра – сопротивления демпфирующего резистора R . На рисунке 2 частотные характеристики $Z_{КУ}(j\omega)$ построены для двух значений R , равных 500 и 1000 Ом.

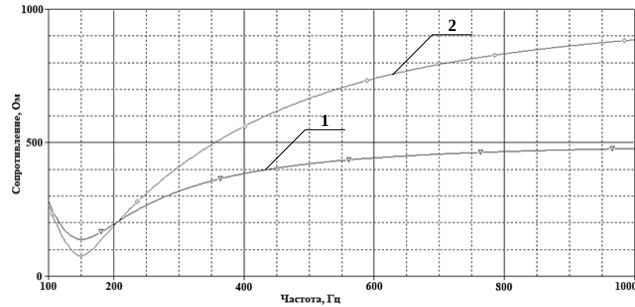


Рис. 2. Частотные характеристики фильтра С-типа: 1 – при $R = 500$ Ом; 2 – при $R = 1000$ Ом. *Fig. 2. Frequency response of the C-type filter*

При больших значениях сопротивления демпфирующего резистора обеспечивается фильтрация низкочастотных гармоник, однако это достигается за счет менее эффективного подавления гармоник в диапазоне высоких частот. Таким образом, фильтр С-типа с простейшим демпфирующим звеном первого порядка не обладает достаточной селективностью для одновременной компенсации мощных низкочастотных гармоник и коррекции частотной характеристики сети в широком диапазоне частот. Другим существенным недостатком фильтров С-типа является большая суммарная емкость конденсаторов и, соответственно, большая стоимость. Необходимы более сложные конфигурации демпфирующих звеньев, обеспечивающих фильтрацию мощных низкочастотных гармоник и коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения.

Метод расчета демпфирующих звеньев

В качестве базовой структуры демпфирующего звена рассмотрим односторонне нагруженный реактивный четырехполюсник лестничной структуры. Увеличение порядка звена дает дополнительные степени свободы и позволяет получить требуемые характеристики. Такое представление позволяет использовать для расчета методы оптимального синтеза пассивных цепей и получить новые варианты демпфирующих звеньев различного порядка. В качестве примера на рис. 3 показано демпфирующее звено в форме лестничного четырехполюсника четвертого порядка.

Активная проводимость четырехполюсника и его передаточная функция связаны соотношением [17, 18]

$$\operatorname{Re}\{Y(j\omega)\} = G |T_{21}(j\omega)|^2.$$

Здесь $T_{21}(j\omega) = U_2(j\omega)/U_1(j\omega)$ – передаточная функция четырехполюсника,

$Y_{\text{вх}}(j\omega) = 1/Z_{\text{вх}}(j\omega)$ – его входная проводимость.

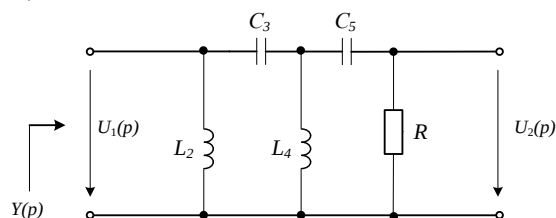


Рис. 3. Реактивный четырехполюсник лестничной структуры *Fig. 3. Ladder LC-two-port*

Для реализации демпфирующих звеньев удобно использовать пассивные LC -четырёхполюсники, реализующие с последовательно включенным основным конденсатором передаточную функцию фильтра верхних частот Баттерворта. Такая компенсирующая установка имеет монотонную частотную характеристику входного сопротивления. Методы синтеза пассивных фильтров хорошо разработаны, поэтому расчет демпфирующего звена заключается в масштабировании элементов нормированного фильтра Баттерворта по заданным частоте настройки и реактивной мощности [19].

Частотные характеристики активного и реактивного сопротивления демпфирующих звеньев 2 и 4 порядка, полученных путем масштабирования элементов фильтров Баттерворта, показаны на рисунке 4, *а*, *б* соответственно.

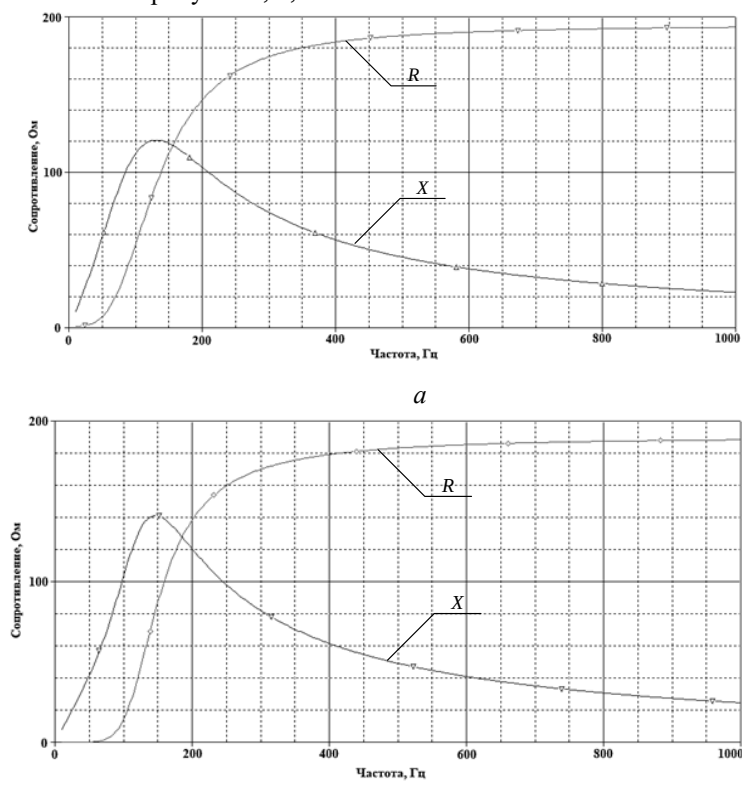


Рис. 4. Частотные характеристики активного и реактивного сопротивления: *а* – демпфирующего звена 2 порядка, *б* – демпфирующего звена 4 порядка.

Fig. 4. Frequency response of damping networks (separate R - X plot) *a* – 2-nd order, *b* – 4-th order

Сравнение характеристик показывает, что увеличение порядка демпфирующего звена сопровождается уменьшением активного сопротивления и снижением потерь мощности на частоте основной гармоники. Можно варьировать селективность частотной характеристики компенсирующей установки, изменяя порядок демпфирующего звена.

Определим параметры демпфирующего звена, при которых исключается резонанс в параллельном контуре, образованном индуктивностью сети и компенсирующей установкой. Из рис 4 *а*, *б* следует, что сопротивление демпфирующего звена на частотах, превышающих ω_H , имеет активно-индуктивный характер. Поскольку в диапазоне высокочастотных гармоник реактивное сопротивление звена невелико, им можно пренебречь и рассматривать компенсирующую установку как широкополосный RC -фильтр первого порядка (на рис. 5 выделен пунктиром).

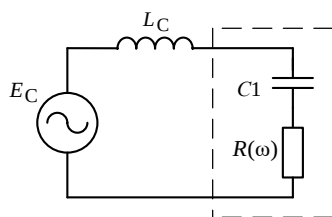


Рис. 5. Модель внешней сети и широкополосного фильтра

Индуктивность сети, конденсатор и демпфирующий двухполюсник в эквивалентной схеме на рисунке 5 образуют параллельный колебательный контур, резонансная частота которого

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_C C_1 - R_{KY}^2(\omega_0) C_1^2}}. \quad (4)$$

Согласно формуле (4) для исключения резонанса в параллельном контуре, образованном индуктивностью сети и емкостью компенсирующего устройства необходимо выполнение условия

$$R_{KY}(\omega) \geq \sqrt{\frac{L_C}{C_1}}. \quad (5)$$

Компенсирующие установки с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют переходные процессы, возникающие в системе при коммутациях. Однако КУ, устанавливаемые в системах электроснабжения промышленных предприятий, должны не только демпфировать резонансные максимумы частотной характеристики сети, но и обеспечивать эффективную фильтрацию гармоник, создаваемых мощными нелинейными электроприемниками. При проектировании компенсирующих установок необходимо учитывать уровень спектральных составляющих тока, а также характеристики внешней сети.

Для определения параметров демпфирующих звеньев, обеспечивающих фильтрацию гармоник и ослабление резонансных режимов, целесообразно использовать методы оптимизации. В качестве главного критерия, подлежащего минимизации, используем суммарный коэффициент гармоник напряжения в точке подключения компенсирующей установки

$$\Phi(\bar{x}) = \frac{|Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x}) Z_c(j\omega_k)|^2}{|Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i, R\}. \quad (6)$$

Здесь $Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x})$ – комплексное сопротивление КУ, $Z_c(j\omega_k)$ – сопротивление сети, J_k – действующее значение тока k -й гармоники. Критерий, определяемый формулой (6) позволяет учитывать при оптимизации спектральный состав тока нелинейной нагрузки и частотные характеристики сети.

Расчет демпфирующего звена заключается в определении параметров реактивных элементов, при которых достигается минимум критерия (6), и одновременно выполняются ограничения, определяющие активную мощность, потребляемую звеном, и способность компенсирующей установки демпфировать резонансные режимы:

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{BX}(j\omega_1)\}}{|Y_{BX}(j\omega_1)|} \leq \eta_0, \\ R_{KY}(\omega) \geq \sqrt{\frac{L_C}{C_1}}.$$

Параметр η_0 определяет предельное значение коэффициента мощности компенсирующей установки.

Оптимизация проводилась с помощью пакета Optimization Toolbox программного комплекса *MatLab*. Были определены нормированные значения параметров демпфирующих звеньев второго-четвертого порядка. Отношение мощности короткого замыкания сети и реактивной мощности КУ было выбрано равным 50. Относительные значения гармоник тока, создаваемых нелинейной нагрузкой, приведены в табл. 1. В качестве начального приближения использованы параметры фильтров верхних частот Баттерворта соответствующего порядка.

Таблица 1

Относительные значения токов гармоник (в процентах к основной)							
Номера гармоник	3	5	7	13	17	19	23
Значения токов	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5	1,0	0,9

Компенсирующие установки с демпфирующими звеньями, рассчитанными с помощью рассмотренной процедуры оптимизации, ослабляют переходные процессы,

возникающие при коммутациях, а также обеспечивают минимальное значение действующего значения гармонических составляющих напряжения в точке подключения.

Значения элементов нормированных звеньев 2 и 4 порядка, полученных с помощью рассмотренной процедуры оптимизации, представлены в таблице 2. Нормированная емкость основного конденсатора равна 1 Ф. Частота настройки компенсирующей установки с демпфирующим звеном равна 3 рад/с.

Таблица 2.

Нормированные параметры демпфирующих звеньев 2 и 4 порядка					
Порядок звена	L_2 , Гн	C_3 , Ф	L_4 , Гн	C_5 , Ф	R, Ом
2	0,084	0,211	-	-	0,364
4	0,0753	0,132	0,132	1	0,279

Нормированные параметры демпфирующих звеньев являются основой для расчета компенсирующих устройств, имеющих заданную реактивную мощность и реализующих требуемые частотные характеристики. Расчет КУ заключается в масштабировании элементов прототипа по заданным основной частоте и величине реактивной мощности.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния демпфирующих звеньев на характеристики компенсирующих установок рассмотрим следующие варианты КУ:

1. Батарея конденсаторов без демпфирующего звена.
2. Компенсирующая установка на основе фильтра C-типа (рис. 1, а).
3. Батарея конденсаторов с демпфирующим звеном второго порядка, имеющим монотонную частотную характеристику.
4. Батарея конденсаторов и демпфирующее звено второго порядка с оптимизированной частотной характеристикой.

Значения элементов демпфирующих звеньев приведены в табл. 3. Емкость основного конденсатора C_1 у всех компенсирующих установок одинакова и равна 3,79 мкФ. Частота настройки широкополосных фильтров, образованных основным конденсатором и демпфирующим звеном, равна 150 Гц. Отношение мощности короткого замыкания внешней сети к реактивной мощности КУ равно 50. Согласно формуле (1) индуктивность сети и компенсирующая установка образуют параллельный контур, резонансная частота которого составляет примерно 350 Гц. Отношение реактивного и активного сопротивлений сети $X_C/R_C = 10$.

Таблица 3.

Параметры демпфирующих звеньев			
Вариант	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	R, Ом
2	334,5	30,32	1000
3	164,0	11,3	195
4	235,7	1,0	300

Рассмотрим влияние демпфирующих звеньев на переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети.

На рисунке 6 показаны переходные процессы в сети при подключении батарей конденсаторов без демпфирующего звена (кривая 1) и фильтра C-типа (кривая 2). Компенсирующая установка включается в сеть в момент времени 5 мс. Анализ показывает, что включение батареи конденсаторов без демпфирующих звеньев вызывает тяжелый переходный процесс, сопровождающийся значительными перенапряжениями.

Кривые напряжения при включении компенсирующих установок с демпфирующими звеньями лестничной структуры показаны на рисунке 7. Использование демпфирующих звеньев позволяет исключить резонансные перенапряжения, возникающие при коммутациях в сети. Наибольший эффект дает использование демпфирующего звена с монотонной частотной характеристикой, так как оно уменьшает и коммутационные перенапряжения на основном конденсаторе. Для иллюстрации сказанного на рисунке 8 показаны кривые напряжений на конденсаторе C_1 в схемах КУ с простейшим демпфирующим звеном (рис. 1, а) и лестничным звеном второго порядка с монотонной частотной характеристикой. Во втором случае перенапряжение на основном конденсаторе при переходном процессе практически отсутствует.

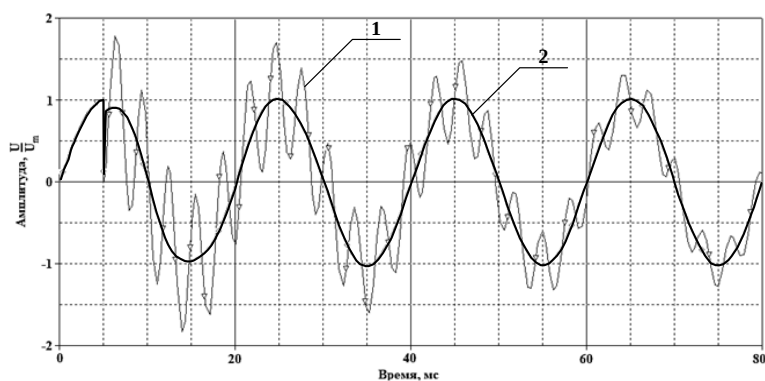


Рис. 6. Переходные процессы при включении в сеть: 1 - батареи конденсаторов, 2 - фильтра С-типа.

Fig. 6. Transient voltage in the grid during switching: 1 – capacitor bank, 2 – C-type filter

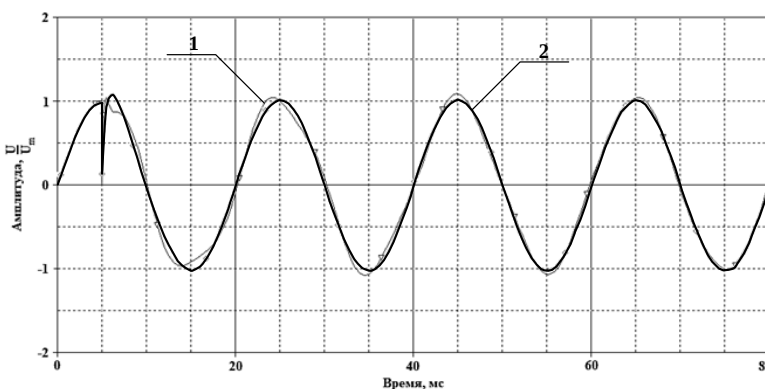


Рис. 7. Переходный процесс при включении компенсирующих установок с демпфирующими звеньями лестничной структуры: 1 - с оптимизированной характеристикой, 2 - с монотонной частотной характеристикой.

Fig. 7. Transient voltage in the grid during switching of shunt capacitor with ladder damping units: 1 – with optimized response, 2 – with monotonic response.

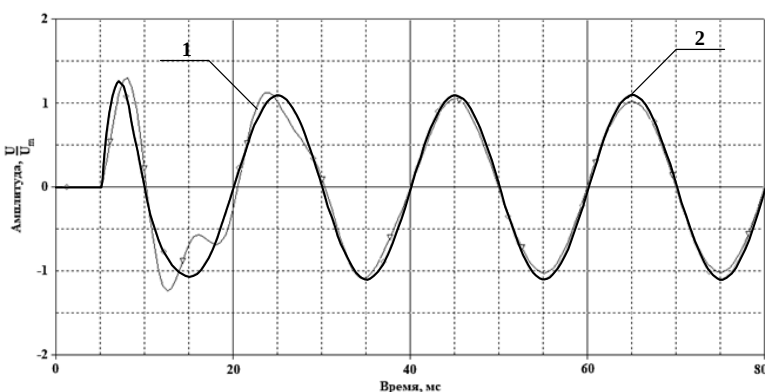


Рис. 8. Напряжение на основном конденсаторе: 1 - в фильтре С-типа, 2 - в лестничном фильтре с монотонной частотной характеристикой.

Fig. 8. Transient voltage across the main capacitor 1 – C-type filter, 2 – ladder filter with monotonic response.

Для оценки фильтрующих свойств компенсирующих установок на рисунке 9 показаны частотные характеристики сети с различными видами КУ. Эффективное ослабление мощных низкочастотных гармоник обеспечивает демпфирующее звено с оптимизированной частотной характеристикой. В таблице 4 представлены значения коэффициентов гармоник напряжения в точке подключения компенсирующей установки. Большой суммарный коэффициент гармоник в сети с батареей конденсаторов (вариант 1) вызван резонансным усилением 7-й гармоники в спектре искаженного напряжения.

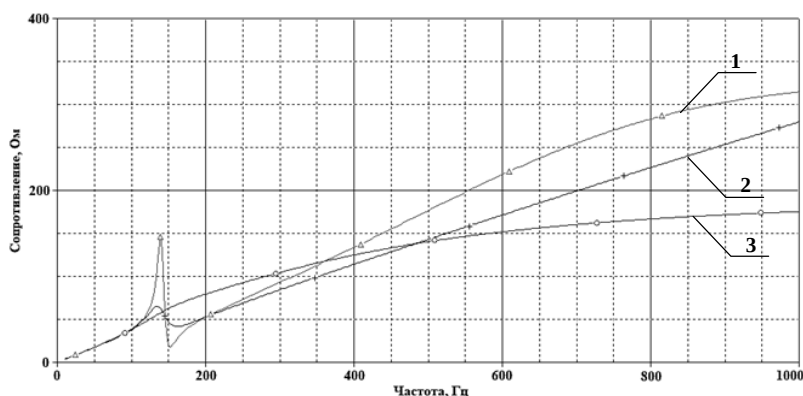


Рис. 9. Частотные характеристики сети в точке общего присоединения при включении: 1 - КУ с оптимизированной характеристикой; 2 - фильтра С-типа; 3 - КУ с монотонной характеристикой

Fig. 9. Power system frequency response: 1 – ladder filter with optimized response 2 – with C-type filter 3 – ladder filter with monotonic response

Таблица 4

Коэффициенты гармоник напряжения

Вариант схемы	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	K_U
1	10,6	19,0	180,0	6,33	1,95	0,2	181
2	7,9	7,5	4,41	3,8	2,32	0,2	12,6
3	10,5	10,0	5,1	3,9	2,1	0,25	15,96
4	3,35	8,0	5,0	4,64	2,94	0,17	11,4

Результаты проведенного анализа показывают, что установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют тяжелые переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети. Максимальный эффект дает применение демпфирующих звеньев с монотонными частотными характеристиками. Звенья с оптимизированными частотными характеристиками обеспечивают компромисс между ослаблением резонансных режимов и фильтрацией мощных низкочастотных гармоник. Их применение целесообразно в тех случаях, когда в системах с большой долей нелинейных нагрузок наблюдаются значительные искажения токов и напряжений.

Заключение

В системах электроснабжения с большой долей нелинейных нагрузок необходимы установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов и фильтрацию высших гармоник, создаваемых нагрузками. Для этого последовательно с батареей конденсаторов включают демпфирующее звено, имеющее частотно-зависимое активное сопротивление. Как правило, для демпфирования резонансных режимов используют широкополосные фильтры С-типа, состоящие из простейшего демпфирующего звена первого порядка и компенсирующего конденсатора. Однако компенсирующие установки на основе фильтров С-типа имеют недостаточную селективность для одновременного ослабления мощных гармоник и демпфирования резонансных максимумов частотной характеристики сети.

В статье рассмотрены новые конфигурации демпфирующих звеньев для установок поперечной емкостной компенсации в форме LC-четырёхполосников лестничной структуры. Такое представление демпфирующих звеньев позволяет использовать для их расчета методы оптимального синтеза линейных цепей и получить новые варианты компенсирующих установок с требуемыми характеристиками. Показано, что для коррекции частотной характеристики системы электроснабжения и эффективной фильтрации высших гармоник четырёхполосник должен иметь передаточную функцию фильтра верхних частот. Определены условия, при которых звено обеспечивает демпфирование резонансных режимов, возникающих в параллельном контуре, образованном компенсирующей установкой и индуктивностью сети. Предложена процедура расчета параметров демпфирующих звеньев, основанная на оптимизации частотной характеристики КУ в пространстве параметров элементов демпфирующего звена. С ее помощью определены нормированные параметры звеньев 2-4 порядка.

Анализ характеристик установок поперечной емкостной компенсации показал, что КУ с демпфирующими звеньями лестничной структуры имеют существенные преимущества по сравнению с демпфированными конденсаторами на основе фильтров С-типа. Увеличение порядка и изменение конфигураций демпфирующих звеньев позволяют эффективно ослабить резонансные перенапряжения при коммутациях, а также уменьшить гармонические искажения токов и напряжений, возникающие под действием нелинейных нагрузок.

Литература

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., - М., Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
2. Алферов И. В., Зырянов В. М., Митрофанов Н. А. Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019;23(1):63–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-63-74.
3. Locci N., Muscas C., Sulis S. Detrimental effects of capacitors in distribution network in the presence of harmonic pollution. IEEE Trans. Power Delivery, 2007, vol. 22, No. 1, pp. 311–315.
4. Bose R., Samanta K., Ghosh K., Bandyopadhyay R., Chatterjee S. Transient analysis of mechanically switched capacitors with and without damping network connected to AC grid. 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & communication (CIEC), pp. 274–278.
5. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-free shunt capacitors – configurations, design methods and comparative analysis, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no. 5, pp. 2287–2295.
6. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
7. Lamom, A. Ahmed Ibrahim, Balci A., Karadeniz, A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/IC&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
8. Xu S., Wang Y., Xiao X., Xu W., Wang Y. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2021, Early Access.
9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725–1734.
10. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sither E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65–72.
11. Боярская Н.П., Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В., Шандрыгин Д. А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 23, № 6, 2021, с. 42–52.
12. Enslin J., Knijp J., Jansen C., Schuld J. Impact of reactive power compensation equipment on the harmonic impedance of high voltage networks. Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna. Vol. 2, 2003, pp. 274 – 278.
13. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Aziz M. M. A., Optimal C-type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 281–289.
14. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381–394, Oct. 2017.
15. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
16. Horton, R., Dugan, R., Hallmark, D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.
17. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3–15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

18. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями. Электротехника, 2020, № 5, с. 47-51.

19. Довгун В. П., Боярская Н. П., Егоров Д. Э., Синяговский А. Ф. Синтез широкополосных фильтров гармоник / В. П. Довгун, Н. П. Боярская, Д. Э. Егоров, А. Ф. Синяговский. // Известия вузов. Проблемы энергетики – 2014. - № 5-6. - С. 85-91.

Авторы публикации

Довгун Валерий Петрович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет E-mail: vdovgun55@mail.ru, vdovgun@sfu-kras.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: denis.egorov.90@br.ru, deegorov@sfu-kras.ru.

Новиков Виктор Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: nvv@iksib.ru.

Синяговский Артем Феликсович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: asinyagovskiy@sfu-kras.ru.

References

1. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii [Higher harmonics in commercial power supply systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2010, 375 p. (In Russian).
2. Alferov I., Zyryanov V. M., Mitrofanov N. A. Analysis of accident rate and reasons of condensing unit failures in electrical energy supply system of oil and gas production. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019; 23(1): pp. 63–74. (In Russian).
3. Locci N., Muscas C., Sulis S. Detrimental effects of capacitors in distribution network in the presence of harmonic pollution. IEEE Trans. Power Delivery, 2007, vol. 22, No. 1, pp. 311–315.
4. Bose R., Samanta K., Ghosh K., Bandyopadhyay R., Chatterjee S. Transient analysis of mechanically switched capacitors with and without damping network connected to AC grid. 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & communication (CIEC), pp. 274–278.
5. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-free shunt capacitors – configurations, design methods and comparative analysis, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no. 5, pp. 2287–2295.
6. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
7. Lamlom, A. Ahmed Ibrahim, Balc A., Karadeniz, A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEE IC/ICPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
8. Xu S., Wang Y., Xiao X., Xu W., Wang Y. Adaptive Damping – An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2021, Early Access.
9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725–1734.
10. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65–72.
11. Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Shandrigin DA. Minimization of power losses in passive power filters. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(6):42–52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

12. Enslin J., Knijp J., Jansen C., Schuld J. Impact of reactive power compensation equipment on the harmonic impedance of high voltage networks. Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna. Vol. 2, 2003, pp. 274 – 278.

13. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Aziz M. M. A., Optimal C-type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 281–289.

14. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.

15. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.

16. Horton, R., Dugan, R., Hallmark, D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.

17. Egorov DE., Dovgun VP., Boyarskaya NP., Jan AW., Slyusarev AS. Power factor correction in power delivery systems with multipulse nonlinear loads. Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(6): 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15. (in Russian)/

18. Dovgun V. P., Egorov D. E., Prozorov N. R., Novikov V. V. Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. Russian Electrical Engineering, Vol. 91, No. 5, 2020, pp. 330-335.

19. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V. V., Sinyagovsky F. F. Synthesis of wideband power harmonic filters. Power engineering: research, equipment, technology. – 2014. - № 5-6. - pp. 85-91. (in Russian)

Authors of the publication

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Viktor V. Novikov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Artiom F. Sinjagovsky – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено 30.06.2022 г.

Отредактировано 04.08.2022 г.

Принято 08.08.2022 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311.26 / L94

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С КОМБИНИРОВАННЫМ СОСТАВОМ РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Червонченко С.С., Фролов В.Я.

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
sergeychervonchenko@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Проанализировать научно-техническую информацию и практический опыт особенностей функционирования автономных электротехнических комплексов с асинхронными электродвигателями в составе. Разработать математическую модель автономного электротехнического комплекса (далее - ЭТК) буровой установки с наличием в составе активного выпрямителя, инвертора с управлением широтно-импульсными сигналами, а также комбинированными источниками резервного питания – аккумуляторной батареей и дизель-генераторной установкой. Установить влияние и целесообразность использования комбинированного состава источников резервного питания на надежную работу и возможность преодоления провала напряжения, вызванного резким ростом нагрузки, в установившемся режиме работы ЭТК. *МЕТОДЫ.* Для успешного выполнения поставленных задач в работе использованы методы математического моделирования систем, электроснабжения, имитационного моделирования, применены теории автоматического управления, автоматизированного электропривода, электрических цепей. Для создания математической компьютерной модели и для обработки данных, полученных аналитическим путем, использовался программный комплекс MATLAB со встроенной средой графического моделирования Simulink. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы исследования. Приведены критерии выбора состава источников резервного питания. Разработаны математические и имитационные модели автономного ЭТК по схеме «источник питания-преобразователь частоты-промышленная нагрузка», учитывающие влияние нелинейной нагрузки на заданные показатели качества электроэнергии. Разработана структура автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом источников резервного питания, позволяющая преодолеть провал напряжения в сети, вызванный резким набросом нагрузки, с обеспечением требуемых показателей качества электроэнергии. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложена новая структура построения источников резервного питания в автономных электротехнических комплексах буровых установок, позволяющая эффективно преодолеть аварийные набросы нагрузки в электрической системе. Применение аккумуляторной батареи позволяет повысить порог перегрузки основной дизель-генераторной установки с регламентируемых ГОСТ Р 53987-2010 с 30% до 60%, а также обеспечить надежное подключение резервной дизель-генераторной установки без прерывания технологических процессов.

Ключевые слова: провал напряжения; аккумуляторная батарея; дизель-генераторная установка; автономный комплекс; активный выпрямитель; управляемый инвертор.

Благодарности: Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, номер проекта 20-38-90038.

Для цитирования: Червонченко С.С., Фролов В.Я. Исследование работы автономного электротехнического комплекса с комбинированным составом резервных источников питания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 90-104. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104.

RESEARCH OF THE OPERATION OF AN AUTONOMOUS ELECTRICAL COMPLEX WITH A COMBINED COMPOSITION OF BACKUP POWER SOURCES

SS. Chervonchenko¹, VYA. Frolov¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia
sergeychervonchenko@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To analyze scientific and technical information and practical experience of the functioning of autonomous electrical complexes with asynchronous electric motors in the composition. To develop a mathematical model of an autonomous electrical complex of a drilling rig with the presence of an active rectifier, an inverter with pulse-width control signals, as well as combined backup power sources – a battery and a diesel generator set. To establish the influence and expediency of using a combined composition of backup power sources on reliable operation and the possibility of overcoming the voltage failure caused by a sharp increase in load in the steady-state operation of an autonomous electrical complex. *METHODS.* For the successful fulfillment of the tasks set, this study applied the methods of mathematical modeling of power supply systems, methods of simulation modeling, the theories of automatic control, automated electric drive, and electrical circuits. Also, in research used the MATLAB software package with the built-in Simulink graphic modeling environment to create a mathematical computer model and to process the data obtained analytically. *RESULTS.* The article describes the relevance of the research topic. The study provides criteria for choosing the composition of backup power sources. Mathematical and simulation models of an autonomous ETC have been developed according to the “power source-frequency converter-industrial load” scheme, taking into account the influence of a non-linear load on the specified power quality indicators. The study has developed the structure of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources, which allows to overcome the voltage drop in the network caused by a sharp load surge, while ensuring the required indicators of electricity quality. *CONCLUSIONS.* The use of a rechargeable battery makes it possible to increase the overload threshold of the main diesel generator set regulated by GOST R 53987-2010 from 30% to 60%, as well as to ensure reliable connection of a backup diesel generator set without interrupting technological processes.

Keywords: Voltage failure; battery; diesel generator set; autonomous complex; active rectifier; controlled inverter.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90038.

For citation: Chervonchenko SS, Frolov VYA. Research of the operation of an autonomous electrical complex with a combined composition of backup power sources. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):90-104. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-90-104.

Введение

Автономный электротехнический комплекс – это комплекс технического оборудования, включающий в свой состав источники электрической энергии, распределительные устройства, распределительные сети и потребителей электроэнергии, объединенных общей системой управления, и выполняющий задачу обеспечения потребителей электрической энергией требуемого количества и качества во всех режимах функционирования объекта электроснабжения.

Степень разработанности темы исследования

Научным и практическим исследованиям в области устойчивой работы автономных электротехнических комплексов посвящены работы многих ученых, в том числе Абрамовича Б.Н., Пронина М.В., Сулова К.В., Меньшова Б.Г., Шонина О.Б. Также особое внимание уделяется разработкам различных инновационных методов оптимизации автономных систем электроснабжения учеными В.В. Елистратовым, И.Ю. Ивановой, Д.Н. Карамовым. Однако, несмотря на значительный объем работ в данной области, в работах всех вышеперечисленных авторов не уделяется должного внимания анализу переходных процессов в автономных системах при провалах напряжения в различных режимах (запуск либо установившийся режим), с различным составом преобразовательного устройства, а также с различными источниками резервного питания.

Научная новизна

Обоснована эффективность использования комбинированного состава источников резервного питания, а также алгоритма их использования в автономных электротехнических комплексах для наиболее эффективного преодоления провалов напряжения с учетом оптимизации технических и финансовых затрат на основе разработанных математических моделей ЭТК.

Практическая новизна

Разработана структура автономного электротехнического комплекса, позволяющая наиболее эффективно преодолеть провалы напряжения, а также обеспечить переход от основного источника питания к резервному с обеспечением непрерывности технологических процессов, а также повышением в 2 раза допустимой перегрузки системы.

Автономные электротехнические комплексы используются в отдаленных районах, куда провести централизованное электроснабжение технически сложно и экономически невыгодно [1,2]. Районы с децентрализованным (автономным) электроснабжением находятся преимущественно на севере и северо-востоке Российской Федерации и занимают порядка 60% процентов территории страны. Именно на эти территории приходится добыча около 70% нефти, 90% природного газа, 90% драгоценных металлов и камней [3]. Согласно имеющимся данным [4], в изолированных районах общее количество источников генерации составляет примерно 5000 шт., суммарной мощностью около 2500 МВт.

Системы автономного электроснабжения могут быть разделены по нескольким категориям в зависимости от критериев оценки:

1. По назначению и характеру потребителей:
 - обеспечивающие электроснабжение технологических потребителей (промышленное производство и т.п.);
 - обеспечивающие вспомогательные потребности промышленных объектов (производственные и коммунально-бытовые нужды).
2. По режиму работы:
 - основные - электростанции с наработкой за год более 3000 часов, с числом пусков за год менее 20, временем непрерывной работы более 350 часов, временем пуска и приема 100 % нагрузки до 30 минут;
 - резервные - электростанции с наработкой за год от 200 до 3000 часов, числом пусков от 20 до 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки не более 5 минут;
 - аварийные - электростанции с наработкой за год до 200 часов, числом пусков за год свыше 50 и временем пуска и приема 100 % нагрузки от 5 до 30 секунд. Предназначены для аварийного электроснабжения потребителей 1 категории (особой группы), для которых перерыв в электроснабжении допустим только на время действия АВР, при отключении основного или резервного источника питания.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ-7), электрифицированные буровые установки (с электрическим приводом основных исполнительных механизмов) при бурении на глубину более 4500 м и в сложных геологических условиях на меньшую глубину, а также буровые установки на море относятся к потребителям первой категории. Соответственно для потребителей первой и первой особой категорий должно выполняться условие по электроснабжению от двух независимых источников питания, причем перерыв в электроснабжении допускается только на время автоматического ввода резервного питания.

Особенности автономных систем электроснабжения

Автономные электротехнические комплексы – это системы, у которых электрофизические параметры источников энергии и потребителей, входящих в комплекс, соизмеримы [5].

Согласно ГОСТ Р 53987-2010 мощность автономных электростанций делится на несколько типов:

- Длительная мощность — это максимальная мощность электроагрегата при работе на постоянную нагрузку без ограничения времени работы за год с перерывами на техническое обслуживание.
- Основная мощность – это максимальная мощность электроагрегата при работе на переменную нагрузку без ограничения времени работы в течение года с перерывами на техническое обслуживание. Выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки, причем использование 100% мощности генератора ограничено по времени, на которое дополнительно накладываются перерывы на техническое обслуживание

установки.

- Аварийная резервная мощность – это максимальная полезная мощность, которую электроагрегат может развивать в определенных условиях эксплуатации при работе на изменяющуюся электрическую нагрузку и обеспечивать ее в течение 200 ч в год с перерывами на техническое обслуживание.

Автономные системы электроснабжения описываются следующими характерными условиями работы:

- неравномерность графика электрической нагрузки, которая влияет на агрегатный состав источников питания [6]. Условно-постоянная часть графика электрической нагрузки может составлять, как правило, до 30%. В связи с этим необходимо выбирать мощность и количество агрегатов электростанции таким образом, чтобы было обеспечено максимально эффективное соотношение между количеством потребителей электроэнергии и источников питания;

- ограниченные ресурсы по вариативности мощности. В централизованной энергосистеме, в отличие от автономной, присутствует значительное количество источников, что обеспечивает достаточные возможности для маневра генерирующими мощностями;

- электроагрегаты таких систем вследствие постоянной изменчивости режимов работы имеют гораздо меньший ресурс работы по сравнению с электрическими станциями большой энергетики, поэтому данные электроагрегаты, основываясь на инструкции заводов-изготовителей, требуют частого проведения технического обслуживания. А так как для потребителей в автономных системах добывающей промышленности необходимо бесперебойное электроснабжение вследствие их категоричности и непрерывности технологических процессов, то необходимо предусматривать соответствующие технические решения по обеспечению электроснабжения потребителей от других источников;

- соизмеримость величины мощности потребителей с источниками питания, что накладывает определенные ограничения на величину мощности потребителя, подключаемого к автономной системе;

- наличие мощных потребителей (асинхронных и синхронных электрических двигателей), пусковые токи которых от 2-3 до 7 раз превышают номинальный ток;

- наличие нелинейных элементов. Нелинейная нагрузка приводит к возникновению тока в нулевом проводе, что приводит к его нагреву и может быть причиной пожаров и т.п. Потому в данных электроустановках необходимо использовать нейтральный провод большего сечения, чем фазные;

- возможная несимметричность нагрузки по фазам. В автономной системе практически невозможно обеспечить симметричную нагрузку по фазам, что связано с относительно незначительным количеством потребителей и разностью их установленных мощностей. Заводы-изготовители источников питания автономных систем электроснабжения допускают перекас фаз до 20%, однако нормативно-техническая документация подразумевает допустимое отклонение коэффициента несимметрии – 2%, предельное – 4%;

- построение структуры электроснабжения автономных электротехнических комплексов (в основном радиальные схемы) [7]. Магистральные схемы не применяются из-за соизмеримой мощности нагрузки и источников, кольцевые из-за невозможности в реализации и сложности настройки защит.

Выбор количества и мощности дизель-электрических агрегатов

Выбор дизель-электрических агрегатов [8] для электротехнических комплексов с электроприводами как переменного, так и постоянного тока, как правило, должен производиться с учетом возможности автоматизированного запуска за минимально короткое время и способности агрегата работать длительное время без обслуживающего персонала, что соответствует 3 степени автоматизации дизель-электрических агрегатов.

Необходимая мощность электрического комплекса рассчитывается по общей расчетной максимальной нагрузке (1), создаваемой потребителями:

$$P_{\max}^{\text{расч}} = \frac{P_{\max} k_{\text{потерь}}}{k_{\text{с.н.}}} \quad (1)$$

где $P_{\max}$ - суммарная мощность нагрузки, кВт; $k_{\text{потерь}}$ – коэффициент потерь мощности ($k_{\text{потерь}}=1,05-1,10$); $k_{\text{с.н.}}$ – коэффициент потерь мощности на собственные нужды ($0,95 \div 0,97$).

Суммарная установленная мощность рабочих дизель-генераторов должна быть

больше или равна максимальной расчетной нагрузке $P_{\max}^{\text{расч}}$ с учетом собственных нужд станции и потерь мощности в электросетях, так как работа электростанции с большой недогрузкой недопустима. Дизельные двигатели не допускают длительную работу на нагрузках менее 25÷30% их номинальной мощности.

Общее количество дизель-генераторов, устанавливаемых в постоянно действующих ДЭС, определяется в соответствии с графиками нагрузок и принятой схемой электроснабжения, а также числом рабочих и резервных агрегатов. Мощность резервного агрегата принимается равной мощности рабочего. В отдельных случаях, при технико-экономических обоснованиях, допускается установка нескольких резервных агрегатов, либо агрегата с меньшей мощностью.

Особенности выбора и применения дизель-генераторов в автономных электротехнических комплексах:

- необходимо учитывать, что стоимость оборудования ДЭС достаточно высока, необходимо выносить потребителей I и II категории особой группы на отдельную секцию шин, чтобы минимизировать установленную мощность ДЭС и, соответственно, финансовые затраты;

- при питании от ДЭС индуктивные сопротивления ДЭС x_d и x_q гораздо больше, чем x_k трансформатора, поэтому короткие замыкания сопровождаются провалом напряжения и частоты, ударный ток КЗ гораздо меньше, соответственно, меньше и установившееся значение тока КЗ. Поэтому для таких систем должна быть предусмотрена максимальная токовая защита (МТЗ) с пуском по минимальному напряжению и автоматический выключатель должен иметь встроенный нулевой расцепитель и независимый расцепитель.

Проблемы провалов напряжения в автономных электротехнических комплексах

Одним из важнейших вопросов надежного электроснабжения является обеспечение потребителей качественной электроэнергией. От качества электрической энергии зависит производительность поставляемого оборудования и эффективность его функционирования. Все показатели качества электроэнергии в электрических сетях устанавливаются отраслевыми стандартами и другими нормативными документами. Различные показатели качества электроэнергии по-разному влияют на работу технических систем.

Согласно ГОСТ 32144-2013, провал напряжения – это временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения. Провалы напряжения бывают симметричными и несимметричными. При симметричном провале происходит одинаковое снижение напряжения в сети во всех фазах, причиной являются трехфазные короткие замыкания либо пуск мощных трехфазных потребителей. К несимметричным относятся все остальные типы провалов, в основном они вызываются неравномерным подключением нагрузки по фазам либо однофазными и двухфазными короткими замыканиями [9].

Возникновению провалов напряжения в электрических сетях способствуют множество факторов [10-12]. Это и высокий уровень загрязнения изоляции, механические повреждения, прикосновение к токоведущим частям сторонними предметами, а также природными воздействиями, такими как удары молний, ошибки обслуживающего персонала. При включении мощных потребителей электроэнергии, пуске асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором происходит снижение (провалы) частоты и напряжения источника [13]. Это отражается на характере работы остальных потребителей. Снижение напряжения в системе ниже допустимого уровня может дополнительно привести к отключению контакторов нулевой защитой (защитой по минимальному напряжению). Также провалы напряжения могут возникать из-за запуска мощных приемников на предприятии или, например, на соседнем производстве в той же распределительной сети, из-за работы устройства автоматики повторного включения, изменения нагрузки оперативными либо технологическими переключениями.

Проблема обеспечения непрерывного режима электроснабжения автономных электрических сетей ограниченной мощности в основном связана с удаленностью сложившихся перспективных месторождений от централизованных энергосистем, территориальной рассредоточенностью производственных объектов и непрерывностью основных технологических процессов.

Не всегда удается улучшить качественные характеристики сети, чтобы исключить провалы напряжения. Причем в автономных системах электроснабжения технические, технологические, экономические, географические, климатические факторы оказывают

влияние на выбор типов (технологий) применяемых источников резервного питания. Важную роль здесь играет взаимодействие и слаженная работа средств технологической автоматизации с автоматикой системы электроснабжения.

Провалы напряжения даже небольшой длительности могут приводить к огромным ущербам для предприятий и отраслей промышленности, в которых присутствуют непрерывные технологические процессы. Для производств, где основу оборудования составляют электродвигатели, провал напряжения приводит к уменьшению величины момента и скорости вращения двигателей, что особенно негативно сказывается на предприятиях с непрерывным производственным процессом. Вдобавок при временном снижении напряжения возможен перегрев обмоток двигателей вследствие повышения потребляемого тока.

Чувствительны к провалам напряжения и магнитные пускатели, точнее их катушки, которые выполняют удерживающую функцию. При провале величиной ниже 80% от номинального напряжения магнитный пускатель размыкается, тем самым прерывается электроснабжение непосредственно преобразователя и размыкается электрическая цепь.

Различают следующие устройства и способы, защищающие электрооборудование от провалов напряжения: преодоление провалов системой электропривода, устройство защиты от потери питания, маховик, статический источник бесперебойного питания (ИБП), динамический компенсатор искажений напряжения, статический компенсатор (СТАТКОМ), параллельно работающая ДЭС, повышающий преобразователь, активный фильтр и бестрансформаторный последовательный усилитель [14-16].

Материалы и методы

В качестве основной нагрузки автономного электротехнического комплекса буровой установки для исследования таких режимов взят один из наиболее распространенных в добывающей промышленности электродвигателей - 5AMH315M2, расчетные параметры которого приведены в формулах 2 – 11.

Полная мощность электродвигателя S_n , кВА (2):

$$S_n = \frac{P_n}{\cos f \cdot \frac{\eta}{100}} \quad (2)$$

где P_n - номинальная мощность электродвигателя, $P_n=250$ кВт;

$\cos f$ – коэффициент мощности, $\cos f=0,92$;

η – коэффициент полезного действия, $\eta=95,5$ %.

$$S_n = \frac{250}{0,92 \cdot \frac{95,5}{100}} = 284,5 \text{ кВА}$$

Номинальное скольжение sn (3):

$$sn = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3)$$

где n_1 – синхронная частота вращения, $n_1=3000$ об/мин;

n – номинальная частота вращения, $n=2975$ об/мин.

$$sn = \frac{3000 - 2975}{3000} = 0,0083$$

Номинальный ток обмотки статора I_{1H} , А: (4):

$$I_{1H} = \frac{P_n}{m_1 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos f} \quad (4)$$

где m_1 – число фаз, $m_1=3$;

U_1 – фазное напряжение электродвигателя, $U_1=220$ В;

$$I_{1H} = \frac{250000}{3 \cdot 220 \cdot 0,955 \cdot 0,92} = 431 \text{ А}$$

Предварительное активное сопротивление статора r_{10} , Ом: (5):

$$r_{10} = \frac{U_1 \cdot I_{1H} \cdot \cos f - \frac{M_n \cdot \omega}{m_1 \cdot p}}{I_{1H}^2} \quad (5)$$

где M_n – номинальный момент электродвигателя, $M_n=803 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
 ω – угловая частота, $\omega=314 \text{ рад/с}$;
 p – количество пар полюсов, $p=1$.

$$r_{10} = \frac{220 \cdot 431 \cdot 0,92 - \frac{803 \cdot 314}{3 \cdot 1}}{431^2} = 0,017 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление ротора r_2 , Ом: (6):

$$r_2 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot sn}{M_n \cdot \omega \cdot c_1^2} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{3 \cdot 1 \cdot 220^2 \cdot 0,0083}{803 \cdot 314 \cdot 1,034^2} = 0,0043 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение sm : (7):

$$sm = \frac{sn}{A} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - A}) \quad (7)$$

где A – расчетный коэффициент, $A=0,907$;

λ – коэффициент магнитной проводимости, $\lambda=2,5$;

$$sm = \frac{0,0083}{0,907} \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 0,907}) = 0,044$$

Активное сопротивление статора r_1 , Ом: (8):

$$r_1 = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega \cdot \lambda \cdot M_n} - \frac{c_1 \cdot r_2}{sm} \quad (8)$$

$$r_1 = \frac{3 \cdot 1 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \cdot 2,5 \cdot 803} - \frac{1,054 \cdot 0,0043}{0,044} = 0,012 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статора x_k , Ом: (9):

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{c_1 \cdot r_2}{sm}\right)^2 - r_1^2} \quad (9)$$

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{1,054 \cdot 0,0043}{0,044}\right)^2 - 0,012^2} = 0,102 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания x_m , Ом: (10):

$$x_m = \frac{1}{c_1 \cdot I_{1H} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos f^2}{U_1} - b(sn)}} \quad (10)$$

где $b(sn)$ – реактивная составляющая комплексной проводимости, $b(sn)=0,301$;

$$x_m = \frac{1}{1,054 \cdot 431 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0,92^2}{220} - 0,301}} = 1,968 \text{ Ом}$$

Индуктивность цепи намагничивания L_μ , Гн: (11):

$$L_\mu = \frac{x_m}{\omega} \quad (11)$$

$$L_\mu = \frac{1,968}{314} = 0,0063 \text{ Гн}$$

Произведем выбор емкости аккумуляторной батареи САБ, Ач (12):

$$C_{AB} \geq \frac{I_{AB} \cdot t_{AB}}{K_g \cdot K_p} \quad (12)$$

где I_{AB} – ток, потребляемый от АБ в период нагрузки, А;

t_{AB} – время работы АБ в период нагрузки, $t_{AB} = 0,5 \text{ ч}$, учитывая особенности работы и ответственность потребителей, а также время запуска резервной дизель-генераторной установки;

Kg – коэффициент доступной емкости, 0,9...1 о.е.;

Kp – коэффициент глубины разряда аккумулятора, 0,5...0,7 о.е.

Величина тока, потребляемого от АБ в период нагрузки I_{AB} , А (13):

$$I_{AB} = \frac{P_{нагр}}{\eta_{и} \cdot U_{AB}} \quad (13)$$

где $P_{нагр}$ – средняя мощность нагрузки, Вт;

$\eta_{и}$ – КПД преобразования постоянного тока в переменный с помощью инвертора, 0,9...0,95;

U_{AB} – номинальное напряжение АБ, В.

$$I_{AB} = \frac{500000}{0,93 \cdot 380} = 1414,8 \text{ А}$$

$$C_{AB} \geq \frac{1414,8 \cdot 0,5}{0,95 \cdot 0,6} = 1241 \text{ Ач}$$

Исходя из полученного значения необходимой величины емкости аккумуляторной батареи 1241 Ач, принимается ближайшее значение из каталогов заводов-изготовителей в 1500 Ач (12 OPzS 1500).

Согласно ГОСТ Р 53987-2010, номинальная (основная) мощность генераторов переменного тока выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки. Так как в качестве обобщенной нагрузки автономного электротехнического комплекса буровой установки принимаются два электродвигателя 5AMH315M2, суммарной мощностью 500 кВт. Следовательно, номинальная мощность основного источника питания должна быть не меньше 650 кВт.

Процесс провала напряжения, что соответствует застреванию оборудования в глубоких слоях земли, моделируется блоком «Step», который подает в определенный период времени сигнал на наброс нагрузки на электродвигатели. Величина задаваемой нагрузки различна и зависит от показателей трех измеряемых параметров: ток статора, скорость вращения ротора и электромагнитный момент на валу ротора.

Для исследования провалов напряжения и поиска оптимального состава источников резервного питания в программном комплексе *MATLAB/Simulink* строится математическая модель автономного электротехнического комплекса, представленная на рисунке 1. Модель состоит из следующих основных элементов:

- основной источник питания – дизель-генераторная установка;
- резервные источники питания – аккумуляторная батарея и дизель-генераторная установка;
- активный выпрямитель с системой управления;
- управляемый инвертор с ШИМ;
- нагрузка – два асинхронных электродвигателя с измерительными блоками.

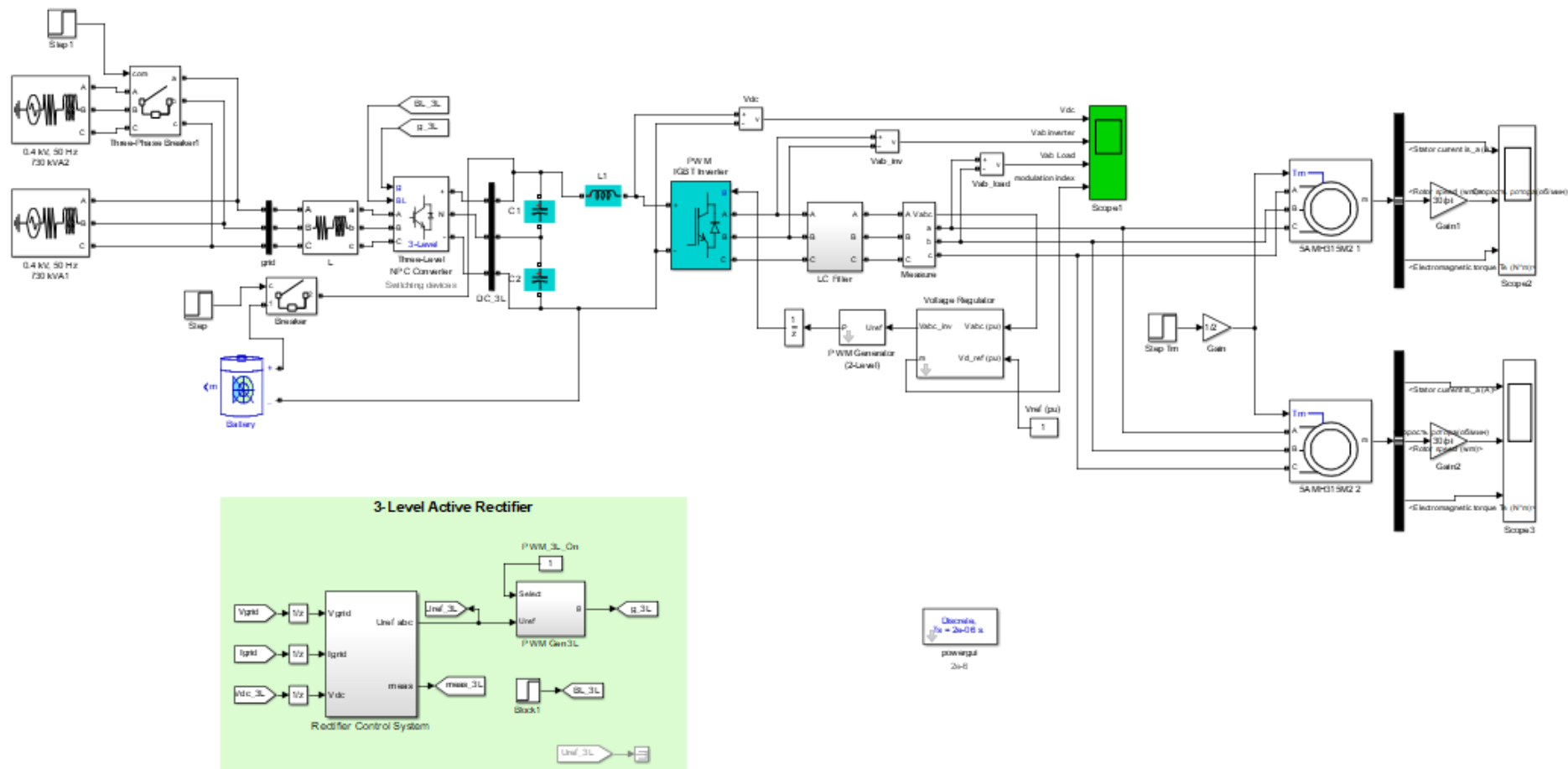


Рис. 1. Модель автономного электротехнического комплекса с двумя электродвигателями и резервными источниками питания и активным выпрямителем напряжения.

Fig. 1. Model of an autonomous electrical complex with two electric motors and backup power sources and an active voltage rectifier.

Результаты и обсуждение

В начальный момент времени происходит запуск двух электродвигателей основной нагрузки 5AMH315M2, которые выходят на номинальную скорость вращения примерно через 2 секунды и продолжают работать в таком режиме ещё 1 секунду для исключения влияния каких-либо колебаний переходных процессов на результаты моделирования. В момент времени $t=3$ секунды от блока «Step» поступает управляющее воздействие на наброс нагрузки в виде увеличения электромагнитного момента на валу двух электродвигателей. В тот же момент времени $t=3$ секунды происходит подключение аккумуляторной батареи, а также команда на запуск резервной дизель-генераторной установки. Процесс запуска и разгона ДГУ имитируется блоком задержки, подключение в сеть происходит в момент времени $t=5$ секунд и режим работы продолжается до временной отметки $t=8$ секунд. Результаты моделирования представлены на рисунках 2-5.

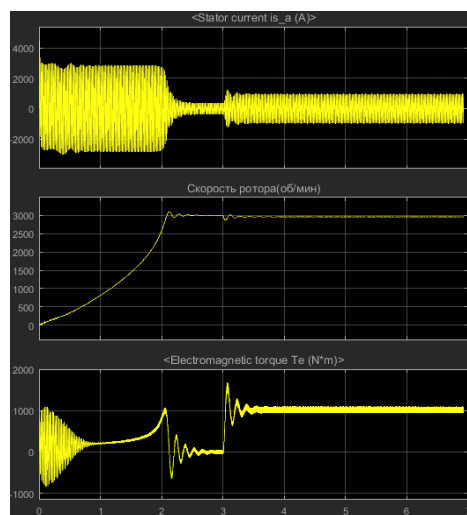


Рис. 2. Наброс нагрузки $T_m=1000$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 2. Load surge $T_m=1000$ N·m at time $t=3$ seconds.

Верхний график на рисунке 2 показывает изменение величины силы тока на статоре. Видно, что во время разгона двигателя ток максимальный, затем снижается до номинального значения и в момент наброса нагрузки при $t=3$ секунды происходит увеличение до значения примерно 1200 А. На втором графике представлена скорость вращения ротора электродвигателя, и так как скорость держится на уровне 3000 об/мин, можно сделать вывод об успешном преодолении наброса нагрузки величиной $T_m=1000$ Н·м. Нижний график показывает величину электромагнитного момента, приложенного к электродвигателю.

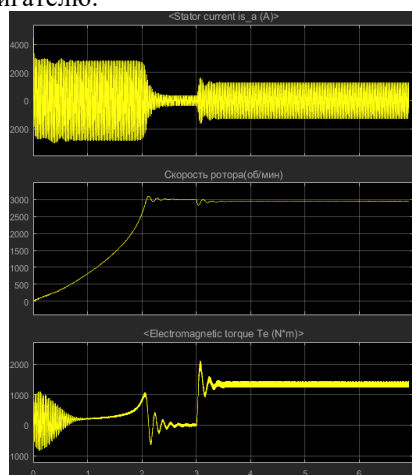


Рис. 3. Наброс нагрузки $T_m=1300$ Н·м в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 3. Load surge $T_m=1300$ N·m at time $t=3$ seconds.

На верхнем графике видно, что ток статора во время наброса нагрузки 130% от номинальной мощности двигателя достигает значения порядка 1750 А. Скорость

вращения двигателя остается в пределах номинального значения. Соответственно система успешно преодолела данный наброс нагрузки.

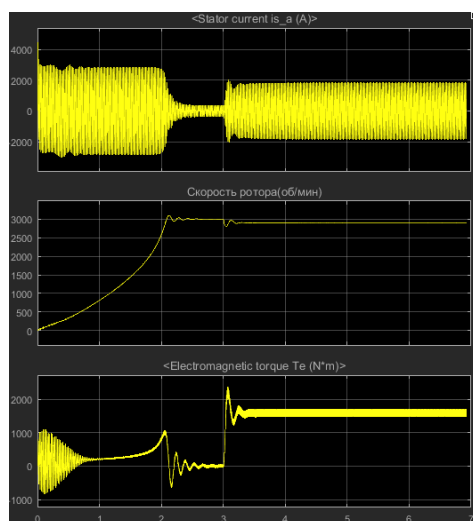


Рис. 4. Наброс нагрузки $T_m=1600 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 4. Load surge $T_m=1600 \text{ N}\cdot\text{m}$ at time $t=3$ seconds.

Первый график показывает, что ток статора в установившемся режиме с дополнительной нагрузкой $T_m=1600 \text{ Н}\cdot\text{м}$ составляет приблизительно 2000 А. Скорость вращения ротора немного уменьшилась, но система в целом проходит данный утяжеленный режим.

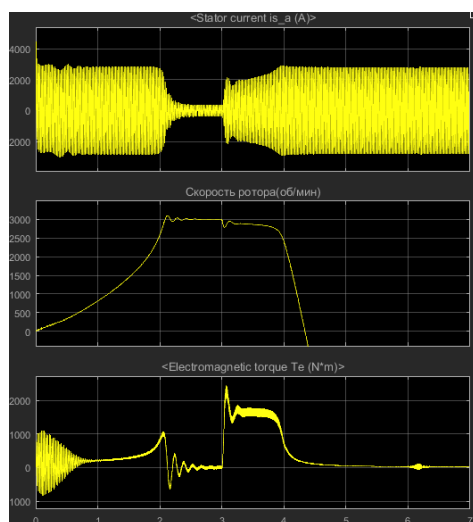


Рис. 5. Наброс нагрузки $T_m=1700 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в момент времени $t=3$ секунды.

Fig. 5. Load surge $T_m=1700 \text{ N}\cdot\text{m}$ at time $t=3$ seconds.

На первом графике видно, что после наброса нагрузки ток статора начинает увеличиваться к пусковым значениям, тем самым показывая, что системе не хватает мощности для нормальной работы с соответствующей нагрузкой. Скорость вращения ротора уже через секунду после наброса нагрузки показывает резкое падение к нулевым значениям, что характерно режиму с застреванием нагрузочных технологических механизмов. Соответственно такая величина нагрузки является критичной для комбинированного состава источников резервного питания с предложенными техническими характеристиками.

Сравнение проведенных расчетов режимов (рис. 2-5) в соответствии с выбранным алгоритмом действий и предложенным составом источников резервного питания показывает, что работа аккумуляторной батареи в переходный процесс переключения между основной и резервной дизель-генераторными установками позволяет преодолеть провал напряжения, вызванный резким набросом нагрузки.

Согласно представленным ранее расчетам АБ емкость аккумуляторной батареи

выбирается на непродолжительный режим работы, процесс активного разряда принимается длительностью $t=0,5$ ч, для обеспечения непрерывности технологического процесса при переключениях между источниками питания, длительность которого несколько секунд, но требует от АБ высоких емкостных характеристик. И как видно из рисунков, наибольшая нагрузка на валу двигателя во время разгона составляет примерно $T_m=1000$ Н·м, принимаем что это величина соответствует номинальной мощности нагрузки, так как именно пусковой режим является наиболее тяжелым для электродвигателей. Согласно ГОСТ Р 53987-2010, номинальная (основная) мощность генераторов переменного тока выбирается с запасом 30% по отношению к мощности нагрузки. Как видно из рисунка 3, увеличение мощности нагрузки на 30% не приводит к провалу напряжения, что отобразилось бы на снижении скорости вращения электродвигателя нагрузки. В момент наброса нагрузки $t=3$ секунды происходит некоторое снижение скорости вращения, однако включение аккумуляторной батареи предотвращает дальнейшее ухудшение режима.

Согласно графикам, представленным на рисунке 4, предлагаемый комбинированный состав источников резервного питания помогает преодолеть наброс нагрузки в 60% от номинальной мощности системы, что в два раза выше чем предельная заявленная перегрузочная способность генераторов. Как видно из второго графика на рисунке 4, снижение скорости вращения электродвигателя, а равно как и провал напряжения в системе, останавливается, а затем и компенсируется работой аккумуляторной батареи, которая поддерживает нормальный режим в течение 2 секунд перегрузки, пока запускается резервный дизель-генератор, и который потом берет на себя всю основную нагрузку.

В то же время повышение нагрузки выше 60 % (рис. 5) является критичным для аккумуляторной батареи, емкость которой уже не способна обеспечить требуемые параметры системы, и батарея разряжается быстрее чем за 2 секунды, не успевая «передать» нагрузку на резервную дизель-генераторную установку.

Сравнение результатов данного исследования с результатами аналогичных исследований

В работе (Шонин О.Б., Иванова Т.С. Обеспечение устойчивой работы частотно-регулируемого привода шахтной подъемной установки при провалах напряжения / О.Б. Шонин, Т.С. Иванова // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 6. С. 53-67) для преодоления провалов напряжения оборудования добывающей промышленности предлагается к использованию суперконденсатор с системой управления. Данное устройство рассчитано на поддержание рабочего состояния нагрузки мощностью 315 кВт. Длительность провала напряжения взята 100 мс или 0,1 секунду. Однако в большинстве случаев в добывающей промышленности из-за особенностей работы провалы напряжения более длительные, а нагрузка при этом может превышать примерно в 2 раза установленную мощность электродвигателей. Применительно использования суперконденсатора в текущей работе можно сделать вывод, что данное устройство не сможет обеспечить требуемые параметры по мощности в системе, учитывая переходный режим длительностью 2 секунды при переключении между основной и резервной дизель-генераторными установками.

В другой работе (Шонин О.Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети / О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 11(2). С. 507-519) предлагается преодолевать провалы напряжения с помощью использования модернизированной системы управления асинхронного электропривода. Исследуется провал напряжения в установившемся режиме, после разгона электродвигателя. Данный способ позволяет компенсировать провал напряжения величиной 100% и длительностью 1 секунда. Однако в текущей работе исследуются провалы напряжения в более мощных двигателях, и такое техническое решение для высокомоментных двигателей применимо только как дополнительный способ совместно с резервным источником питания.

Выводы

Предложена новая структура построения источников резервного питания в автономных электротехнических комплексах буровых установок, позволяющая эффективно преодолеть аварийные набросы нагрузки в системе, которые приводят к провалам напряжения.

Применение аккумуляторной батареи позволяет повысить порог перегрузки основной дизель-генераторной установки с регламентируемых ГОСТ 30% до 60%, а также

обеспечить надежное подключение резервной дизель-генераторной установки без прерывания технологических процессов.

Применительно к автономным электротехническим комплексам добывающей промышленности такая комбинированная структура источников резервного питания подходящих аналогов не имеет, редко встречается применение схожих систем для питания бытовых потребителей.

Представлено сравнение предложенного состава источников питания и способа преодоления провалов напряжения с другими известными и предлагаемыми вариантами, доказана большая универсальность и эффективность.

Литература

1.Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П. Развитие малой энергетики на северо-востоке России: проблемы, эффективность, приоритеты // Труды Международной научно-практической конференции «Малая энергетика – 2006», 21-24 ноября 2006 г., Москва. М.: ОАО «Малая энергетика», 2006. 370 с.

2.Tan Y., Meegahapola L., Muttaqi K. M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. V.38. pp. 876–889.

3.Башмаков И.А. Повышение эффективности энергоснабжения в северных регионах России // Энергосбережение. 2017. № 2. С. 46-53.

4.Елистратов В. В. Энергетическое снабжение изолированных территорий России // Академия энергетики. 2015. № 4(66). С.26-33.

5.Mazidi P., Sanz Bobi M.A. Strategic maintenance scheduling in an islanded microgrid with distributed energy resources // Electric Power Systems Research. 2017. V. 148. pp. 171-182.

6.Черемисин В.В. Исследование и построение суточных графиков активных нагрузок на шинах подстанции // Прорывные научные исследования как двигатель науки. Уфа: ООО «Агентство международных исследований». 2017. С. 214-216.

7.Akbari K., Rahmani E., Abbasi A., et al. Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2016. V.30. pp.1077-1086.

8.Дмитриенко В.Н., Лукутин Б.В. Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса // Фундаментальные исследования. 2015. № 4. С. 61-66.

9.Ma L., Zhou Q. Voltage Dip Evaluation Index Based on Voltage Dip Matrix // 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 2017, pp. 1327-1330, doi: 10.1109/ICISCE.2017.276.

10.Червонченко С.С., Фролов В.Я. Анализ провала напряжения буровой установки, подключенной к локальной энергетической сети // VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. Санкт-Петербургский горный университет. 2020. С. 630-634.

11.Bagheri A., Bollen M.H.J., Gu I.Y.H. Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model // Electric Power Systems Research. 2018. (154). pp. 319–328.

12.Chervonchenko S.S., Frolov V. YA. Analysis of the voltage drop of a drilling rig connected to a local energy network // Journal of Physics: Conference Series. 2021. №1753.

13.Besselmann T.J., Cortinovis A., Van de Moortel S., et al. Increasing the Robustness of Large Electric Driven Compressor Systems During Voltage Dips // IEEE Transactions on Industry Applications, V. 54. no. 2. pp. 1460-1468, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2781638.

14.Kadu A.D., Debre P., Juneja R, et al. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique // 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118013.

15.Katic V.A., Stanisavljevic A.M. Novel voltage dip detection algorithm using harmonics in the dip's transient stage // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017, pp. 351-356, doi: 10.1109/IECON.2017.8216063.

16.Ngom I., Member S., Badara A., et al. An Improved Control for DC-Link Fluctuation during Voltage Dip based on DFIG // 2018 9th International Renewable Energy

Авторы публикации

Червонченко Сергей Сергеевич – аспирант, инженер-исследователь Высшей школы электроэнергетических систем, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого.

Фролов Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, профессор Высшей школы электроэнергетических систем, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого.

References

1. Ivanova IYu, Tuguzova TF, Popov S.P. Razvitie maloi energetiki na severo-vostoke Rossii: problemy, effektivnost', priority. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Malaya energetika – 2006»*, 21-24 noyabrya 2006, Moskva. M.: OAO «Malaya energetika», 2006: 370.
2. Tan Y, Meegahapola L, Muttaqi K M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. V.38. pp. 876–889.
3. Bashmakov IA. Povyshenie effektivnosti energosnabzheniya v severnykh regionakh Rossii. *Energoberezhenie*. 2017; 2:46-53.
4. Elistratov VV. Energeticheskoe snabzhenie izolirovannykh territorii Rossii. *Akademiya energetiki*. 2015; 4(66):26-33.
5. Mazidi P, Sanz Bobi M A. Strategic maintenance scheduling in an islanded microgrid with distributed energy resources. *Electric Power Systems Research*. 2017. V.148. pp. 171-182.
6. Cheremisin VV. Issledovanie i postroenie sutochnykh grafikov aktivnykh nagruzok na shinakh podstantsii. Proryvnye nauchnye issledovaniya kak dvigatel' nauki. Ufa: OOO «Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy». 2017:214-216.
7. Akbari K, Rahmani E, Abbasi A, et al. Optimal placement of distributed generation in radial networks considering reliability and cost indices. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2016. V.30. pp.1077-1086.
8. Dmitrienko VN, Lukutin BV. Vybór moshchnosti generiruyushchego oborudovaniya avtonomnoi solnechno-dizel'noi elektrostantsii megavattного класса. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;4: 61-66.
9. Ma L, Zhou Q. Voltage Dip Evaluation Index Based on Voltage Dip Matrix. *2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, 2017, pp. 1327-1330, doi: 10.1109/ICISCE.2017.276.
10. Chervonchenko SS, Frolov VYA. Analysis of the voltage fall of a drilling rig connected to a local energy network. VII International Scientific and Practical Conference “Innovations and Prospects for the Development of Mining Engineering and Electromechanics: IPDME-2020. St. Petersburg Mining University. 2020; 630-634.
11. Bagheri A, Bollen MHJ, Gu IYH. Improved characterization of multi-stage voltage dips based on the space phasor model. *Electric Power Systems Research*. 2018. (154). pp. 319–328.
12. Chervonchenko S.S., Frolov V.YA. Analysis of the voltage drop of a drilling rig connected to a local energy network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. №1753.
13. Besselmann TJ, Cortinovis A, Van de Moortel S, et al. Increasing the Robustness of Large Electric Driven Compressor Systems During Voltage Dips. *IEEE Transactions on Industry Applications*, V. 54. no. 2, pp. 1460-1468, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2781638.
14. Kadu AD, Debre P, Juneja R, et al. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique. *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118013.
15. Katic VA, Stanisavljevic AM. Novel voltage dip detection algorithm using harmonics in the dip's transient stage. *IECON 2017. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 351-356, doi: 10.1109/IECON.2017.8216063.
16. Ngom I, Member S, Badara A, et al. An Improved Control for DC-Link Fluctuation

during Voltage Dip based on DFIG. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC.2018.8362458.

Authors of the publication

Sergey S. Chervonchenko –Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Vladimir Ya. Frolov – Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Получено

07.06.2022 г.

Отредактировано

27.06.2022 г.

Принято

08.07.2022 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Савенко А.Е., Савенко П.С.

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть применение автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. Исследовать возможности расширения функций таких автоматических систем управления для повышения качества электроэнергии с точки зрения устранения обменных и синфазных колебаний мощности. МЕТОДЫ. Исследования дизель-генераторных агрегатов, параллельно работающих в локальных электрических системах, проведены методами математического моделирования. В математической модели учтено наличие явления «люфта» в контурах регулирования частоты вращения. РЕЗУЛЬТАТЫ. Отмечена целесообразность применения в локальных электрических системах аккумуляторных батарей, выпрямительных и инверторных преобразователей. Экспериментальные исследования в локальной электрической системе выявили существование обменных и синфазных колебаний мощности. Математическое моделирование также подтвердило возникновение в локальной электрической системе обменных колебаний мощности из-за «люфта» в контуре регулятора частоты, а также синфазных колебаний мощности из-за различия коэффициентов передачи регуляторов частоты у параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов. Получена карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта и карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности от значений коэффициента усиления регулятора частоты. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлена возможность устранения обменных и синфазных колебаний мощности уменьшением и обеспечением равенства коэффициентов передачи регуляторов частоты. Добавление функции устранения обменных и синфазных колебаний мощности в системы автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах обеспечивает поддержание необходимого качества электроэнергии в квазиустановившихся режимах работы.

Ключевые слова: локальные электрические сети; энергосистема; обменные колебания мощности; синфазные колебания мощности; рассредоточенные источники электроэнергии.

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 105-115. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115.

USE AND IMPROVEMENT OF AUTOMATIC SYSTEMS FOR CONTROL OF REDUCED ELECTRIC POWER SOURCES IN LOCAL ELECTRIC NETWORKS

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
savenko-70@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider the use of automatic systems for controlling reduced sources of electricity in local electrical networks. Explore the possibilities of expanding the functions of such automatic control systems to improve the quality of electricity in terms of eliminating power exchange and common-mode oscillations. METHODS. Studies of diesel

generator units operating in parallel in local electrical networks were carried out using mathematical modeling methods. The mathematical model takes into account the presence of the "backlash" phenomenon in the speed control loops. **RESULTS.** The expediency of using batteries, rectifier and inverter converters in local electrical networks is noted. Experimental studies in the local electrical network revealed the existence of power exchange and common-mode oscillations. Mathematical modeling also confirmed the occurrence of power exchange oscillations in the local electrical network due to the "backlash" in the frequency controller circuit, as well as power common-mode oscillations due to the difference in the frequency controller transmission coefficients for diesel generator units operating in parallel. A map of the dependence of the amplitude of power exchange oscillations on backlash gaps and a map of the dependence of the amplitude of power common-mode oscillations on the values of the gain of the frequency controller are obtained. **CONCLUSION.** The possibility of eliminating power exchange and common-mode oscillations by reducing and ensuring equality of the transmission coefficients of frequency controllers has been established. Adding the function of eliminating power exchange and common-mode oscillations to automatic control systems for reduced sources of electricity in local electrical networks ensures that the required quality of electricity is maintained in quasi-steady operating modes.

Keywords: local electric network; power system; power exchange oscillations; power common-mode oscillations; reduced electric power sources.

For citation: Savenko AE, Savenko PS. Use and improvement of automatic systems for control of reduced electric power sources in local electric networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):105-115. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-105-115.

Введение

Как показывает опыт эксплуатации различных электроэнергетических объектов, в том числе электростанций, наилучшим образом это достигается применением автоматизированных систем управления (АСУ) [1, 2].

Для моделирования оптимальных режимов работы групп рассредоточенных источников электроэнергии (РИЭ), объединенных функциональными связями, можно найти целый ряд методов и подходов, нашедших широкое применение в традиционной электроэнергетике [3, 4].

Результаты моделирования оптимальных траекторий изменения состояний для объединенных групп РИЭ с применением принципа максимума Понтрягина и теории подобия позволили получить обобщения, которые, в свою очередь, дают возможность сформировать алгоритмы оптимального планирования совместной эксплуатации таких источников [5, 6]. Для совокупности разнотипных РИЭ, работающих в одной распределительной сети, например солнечной и гидроэлектростанции, получены условия оптимальности и разработаны алгоритмы согласования их функционирования. Важным преимуществом разработанных математических методов и алгоритмов является их ориентированность на постепенный переход к оперативному управлению функционированием РИЭ в электрических сетях (ЭС) с привлечением современных средств автоматизации [7-9].

Учитывая приведенные выше особенности, а также пространственную удаленность объекта управления (отдельные группы РИЭ объединены распределительными электрическими сетями) согласовать их функционирование для выполнения совместной задачи без применения средств автоматического управления является сложным и малоэффективным [10-12]. Для организации автоматизированной системы управления необходимо идентифицировать взаимосвязи между объектами и условия оптимальности процессов, происходящих в рамках управляемой системы [13].

На сегодняшний день в литературных источниках [1, 2, 4] содержится крайне мало информации о локальных электротехнических комплексах с точки зрения взаимного влияния рассредоточенных источников электроэнергии и колебаний мощности. А результатов экспериментальных исследований практически нет совсем, в том числе и о качестве электроэнергии на них [5, 6, 10]. Между тем, это очень важный вопрос для любого электротехнического комплекса, а тем более локальной электрической системы в условиях работы соизмеримых по мощности источников и потребителей электроэнергии [13]. Большую помощь в решении этой задачи может оказать опыт эксплуатации электротехнических комплексов морских судов [14, 15, 16]. Конечно, при этом необходимо учитывать доминирующее применение дизель-генераторных агрегатов на морских судах в

отличие от береговых локальных электрических систем, где применяются источники различные по своей природе. Вместе с тем, в обоих случаях автономные локальные системы имеют режимы работы с централизованной системой электроснабжения и без таковой. Изучение особенностей работы локальных электрических систем и улучшение характеристик ее работы является чрезвычайно важными задачами при освоении Арктических территорий в условиях Западных санкций против Российской Федерации.

Научная значимость работы заключается в выявлении новых факторов, влияющих на качество работы рассредоточенных источников в локальных электрических системах. Предложено ввести функцию устранения обменных и синфазных колебаний мощности в устройства управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. А также ввести в структуру локальных электрических систем аккумуляторные батареи, выпрямительные и инверторные блоки.

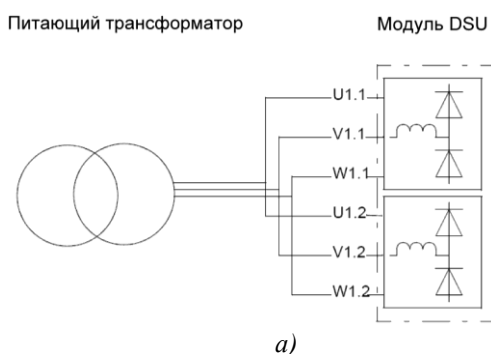
Практическая значимость исследования состоит в том, что в работе использованы результаты реальных экспериментов в локальной электрической системе.

Результаты исследования могут быть применены в разрабатываемых и существующих системах автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах путем их допрограммирования и введением дополнительных линий связи.

Материалы и методы

Потребители в локальных электрических системах с рассредоточенными источниками электроэнергии являются обычными устройствами, как и в централизованной электрической системе бесконечной мощности. Поэтому, в локальных электрических системах с рассредоточенными источниками электроэнергии необходимо обеспечить выполнение всех требований к качеству электрической энергии. Источниками электрической энергии в локальных электрических системах могут быть дизель-генераторные агрегаты, ветровые и солнечные электрогенерирующие мощности, малые гидроэлектростанции, аккумуляторные батареи, приливные электростанции, когенерационные установки, парогазовые и газотурбинные установки и другие. Учитывая такое разнообразие рассредоточенных источников электроэнергии, становится понятным важность и специфика обеспечения качества электрической энергии в локальных электрических системах, а также необходимость применения систем автоматического управления.

Для интегрирования рассредоточенных источников из состава локальной электрической системы, частота которых зависит от природных факторов и которые не имеют регуляторов частоты, возможно предусмотреть применение шестипульсных или двенадцатипульсных диодных выпрямителей (рис. 1) и дальнейшего инвертирования постоянного напряжения в переменное. Напряжения и токи после инверторов формируются с максимально идеальными параметрами близкими к системным и не подвержены возникновению в них каких-либо колебаний мощности в квазиустановившихся режимах работы. Кроме того, целесообразно предусмотреть наличие в локальной электрической системе значительных по емкости аккумуляторных батарей, которые будут работать на сеть через инверторы. Аккумуляторные батареи позволят компенсировать недостаток электрической энергии во время уменьшения ее выработки рассредоточенными источниками локальной электрической сети, что может происходить в случае зависимости от природных факторов таких как, солнце, ветер, волнение водной поверхности и т.д. Кроме того, аккумуляторные батареи могут накапливать рекуперлируемую энергию, поступающую в локальную сеть от ее потребителей в некоторых режимах работы. А в случае наличия периодической резкопеременной нагрузки аккумуляторные батареи смогут поставлять накопленную энергию, в том числе и рекуперлируемую, в локальную электрическую сеть практически мгновенно, тем самым исключая провалы и дефицит мощности до запуска резервных источников или увеличения производительности работающих мощностей.



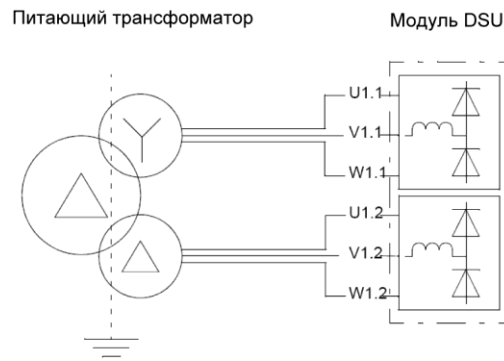


Рис. 1. Схемы а) шести и б) двенадцатипульсного соединения.

Fig. 1. Diagrams of the a) 6- and b) 12-piece connection.

Наибольший интерес с точки зрения влияния на параметры электрической энергии в локальной электрической сети представляют дизель-генераторные агрегаты. Для исследования проведем математическое моделирование и натурный эксперимент.

Синхронные генераторы моделируются уравнениями Парка-Горева в d и q координатах неподвижных относительно ротора:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} &= \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \\ \frac{d\psi_{sq}}{d\tau} &= -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \\ \frac{d\psi_f}{d\tau} &= u_f - r_f i_f,\end{aligned}$$

где ψ_{sd}, ψ_{sq} - проекции векторов потокосцеплений статора на оси d, q ; u_{sd}, u_{sq} - проекции вектора напряжения; r_s - сопротивление статорной обмотки; i_{sd}, i_{sq} - проекции вектора тока; ψ_f, i_f, u_f, r_f - потокосцепление, ток, напряжение и сопротивление обмотки возбуждения; τ - относительное время:

$$\psi_{sd} = (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_f,$$

$$\psi_{sq} = (L_q + L_{sq})i_{sq},$$

$$\psi_f = L_d i_{sd} + L_f i_f,$$

где L_{sd}, L_{sq} - индуктивности рассеяния статорной обмотки; L_d, L_q - индуктивности главного контура намагничивания по осям d, q ; L_f - индуктивность обмотки возбуждения.

Бесщеточный синхронный генератор имеет в своем составе возбудитель и пропорциональный регулятор напряжения, которые описаны следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{du_f}{dt} = [-u_f + K_f(U_0 - u_m)]/T_B,$$

где K_f - коэффициент передачи регулятора, $u_m = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2}$, U_0 - задание по напряжению.

В математической модели используется уравнение дизеля, который является приводным двигателем агрегата:

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g,$$

$$M_d = K_m h, \quad M_g = \psi_{sq} i_{sd} - \psi_{sd} i_{sq},$$

где J_m - приведенный момент инерции вала дизеля и ротора генератора, M_d - механический момент дизеля, M_g - электромагнитный момент сопротивления, развиваемый генератором, h - положение топливной рейки, K_m - коэффициент усиления дизеля по частоте вращения.

Отдельным уравнением описан регулятор частоты вращения дизеля, который представлен аperiodическим звеном первого порядка:

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h,$$

где T_{ω} - постоянная времени исполнительного механизма, K_{ω} - коэффициент усиления регулятора, U_{ε} - сигнал рассогласования между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля:

$$U_{\varepsilon} = \begin{cases} U_{\varepsilon} = \text{const для } |U_{\varepsilon} - k\varepsilon| \leq D_n \\ k \left(\varepsilon - D_n \text{sign} \left(\frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \neq 0 \end{cases},$$

где k - коэффициент передачи, D_n - зазор люфта регулятора, ε - рассогласование между заданной ω_{r0} и действительной ω_r частотами вращения дизеля.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим локальную автономную электроэнергетическую систему морского судна на примере парома «Ейск» (рис. 2). В качестве основных источников электроэнергии используются три дизель-генератора 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450M6 800кВА, 390В, 50Гц, $\cos \varphi = 0.8$, 1184А. Гребные двигатели постоянного тока (Д1, Д2) типа МП2-М-630-152-8МЗ, получают электрическую энергию через сглаживающие дроссели ДР3 и ДР4 от тиристорных преобразователей ПТР1, ПТР2, перед которыми установлены сдвоенные реакторы ДР1 и ДР2. Для обеспечения электроэнергией судовых потребителей возможна параллельная работа двух или трех генераторов переменного тока (Г1-Г3). Экспериментальные исследования, проведенные в локальной электрической системе с рассредоточенными источниками электроэнергии на пароме «Ейск», выявили существование низкочастотных колебаний мощности. Причем, на зафиксированных осциллограммах (рис. 3 и рис. 4), видно, что колебания мощности имеют различный характер. В одних случаях (рис. 3) это обменные колебания, а в других случаях (рис. 4), это синфазные колебания мощности. Наличие таких явлений отрицательно влияет на коэффициенты полезного действия источников и потребителей электроэнергии, сроки их эксплуатации, снижают надежность работы локальных электрических систем и могут приводить к аварийным ситуациям.

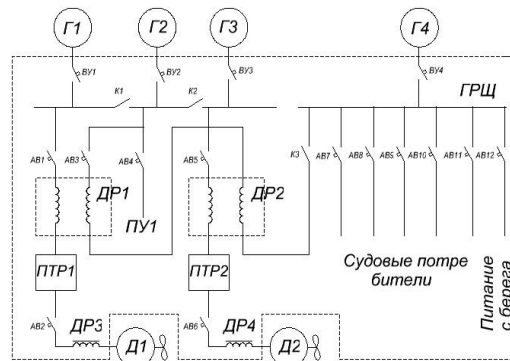


Рис. 2. Структурная схема судовой электростанции парома «Ейск».

Fig. 2. Schematic diagram of the "Eisk" ship's power plant.

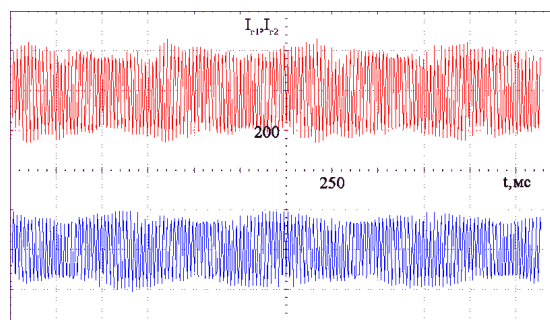


Рис. 3. Токи двух параллельно работающих генераторов в квазиустановившемся режиме.

Fig. 3. Currents of two parallel operating generators in quasi-fixed mode.

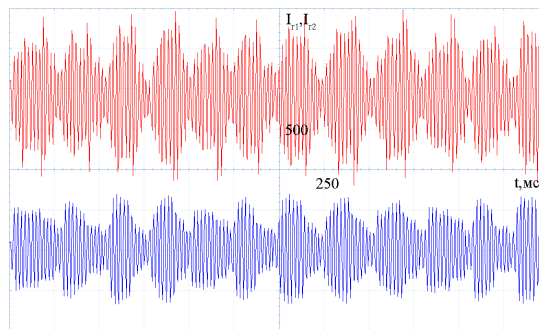


Рис. 4. Токи двух параллельно работающих генераторов при работающих гребных двигателях. *Fig. 4. Currents of two parallel operating generators with operating propulsion engines.*

В современных системах автоматического управления генераторами в локальных системах, например, *DECS-100*, *Selco C 6200* отсутствует функция, которая бы отвечала за устранение колебаний мощности генератора в квазиустановившемся режиме работы.

Проведенные исследования с использованием методов математического моделирования также выявили существование (рис. 5 и рис. 6) и причины существования таких колебаний мощности. Так для обменных колебаний это наличие люфта в регуляторах частоты вращения, а для синфазных колебаний разница в настройках тех же регуляторов.

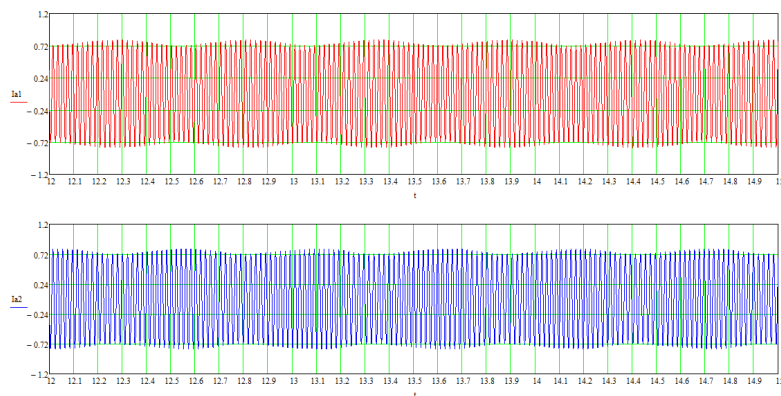


Рис. 5. Результаты моделирования, $Dn_1=0,002$, $Dn_2=0,01$, $K\omega_1=50$, $K\omega_2=50$, $\omega r_{01}=1$, $\omega r_{02}=1$. *Fig. 5. Modeling results, $Dn_1=0.002$, $Dn_2=0.01$, $K\omega_1=50$, $K\omega_2=50$, $\omega r_{01}=1$, $\omega r_{02}=1$.*
 IA_1 , IA_2 – токи параллельно работающих генераторов *IA_1 , IA_2 - parallel operating generator currents*

Результаты математического моделирования показали, что устойчивая работа судового электротехнического комплекса возможна при значениях зазоров люфта от 0 до 0,02. Поэтому, именно в этих диапазонах изменения зазоров люфта, с шагом 0,002 проведены вычисления и определены соответствующие амплитуды обменных колебаний мощности. Результаты представлены в таблице 1, по данным которой представлена графическая визуализация на рисунке 7.

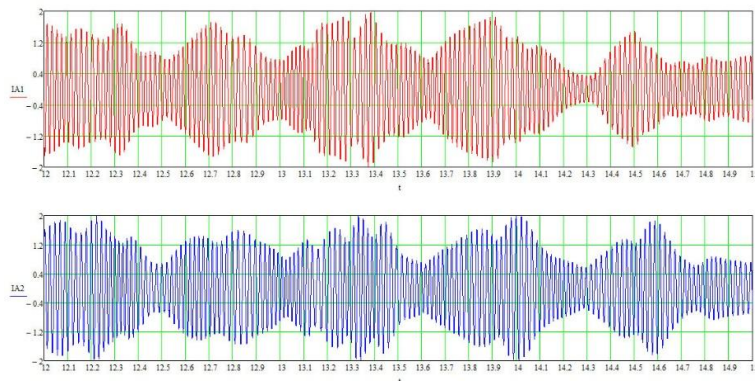


Рис. 6. Результаты моделирования, $Dn_1=0,002$, $Dn_2=0,01$, $K\omega_1=40$, $K\omega_2=80$, $\omega r_{01}=1$, $\omega r_{02}=1$. *Fig. 6 Modeling results, $Dn_1=0.002$, $Dn_2=0.01$, $K\omega_1=40$, $K\omega_2=80$, $\omega r_{01}=1$, $\omega r_{02}=1$.*
 IA_1 , IA_2 – токи параллельно работающих генераторов *IA_1 , IA_2 - parallel operating generator currents*

Таблица 1

Зависимость амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта

$Dn1/Dn2$	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,011	0,021	0,031	0,04	0,052	0,065	0,071	0,083	0,095	0,1
0,002	0,01	0,0015	0,011	0,021	0,033	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09	0,1
0,004	0,02	0,01	0,002	0,012	0,021	0,035	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09
0,006	0,028	0,018	0,007	0,003	0,013	0,024	0,034	0,048	0,057	0,07	0,081
0,008	0,04	0,03	0,02	0,0065	0,0025	0,0135	0,024	0,036	0,048	0,058	0,068
0,01	0,05	0,04	0,03	0,018	0,0075	0,0062	0,0145	0,024	0,039	0,048	0,058
0,012	0,065	0,051	0,038	0,028	0,0165	0,007	0,004	0,015	0,025	0,038	0,048
0,014	0,075	0,063	0,052	0,04	0,028	0,015	0,006	0,004	0,015	0,027	0,039
0,016	0,09	0,08	0,063	0,051	0,04	0,0255	0,015	0,0045	0,006	0,015	0,027
0,018	0,1	0,09	0,075	0,06	0,051	0,036	0,027	0,015	0,045	0,0075	0,015
0,02	0,117	0,1	0,086	0,075	0,062	0,05	0,04	0,027	0,015	0,006	0,0065

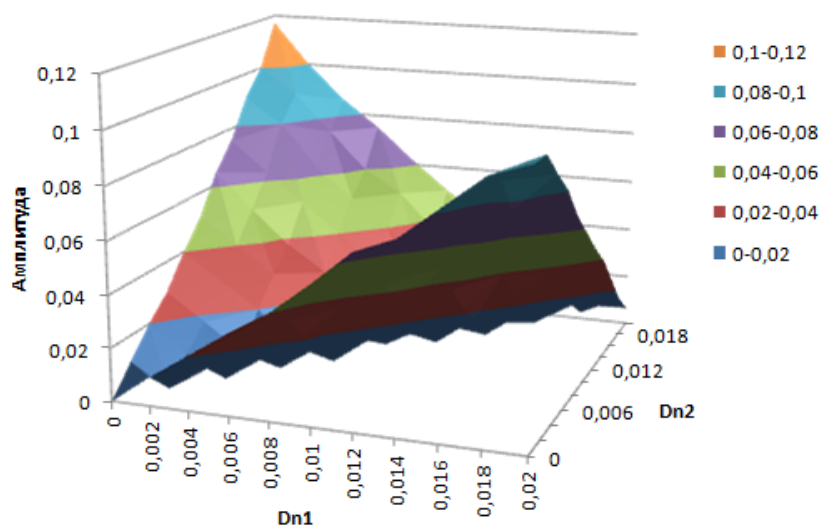


Рис. 7. Карта зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта. Dn_1 и Dn_2 — зазоры люфта первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig. 7. Map of the dependence of the amplitude of the power exchange fluctuations on the gap of the backlash. Dn_1 and Dn_2 - Backlogs of the first and second parallel diesel generator, respectively

На карте зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от зазоров люфта видно, что при отсутствии люфта обменные колебания мощности отсутствуют. Однако, известно, что полное отсутствие люфта делает систему регулирования частотой неработоспособной. Обменные колебания мощности минимальны при равных зазорах люфта регуляторов частоты параллельно работающих генераторов. По понятным причинам, такая ситуация является редким частным случаем. А вот наличие различных по величине зазоров люфта в регуляторах частоты приводит к возникновению значительных по амплитуде обменных колебаний мощности.

Математическое моделирование параллельной работы дизель генераторных агрегатов, коэффициентов передачи регуляторов которых не равны, подтвердило предположение о возникновении синфазных колебаний в таком режиме работы (рис. 6). В таблице 2 и на рисунке 8 представлены результаты математического регулирования по амплитуде синфазных колебаний мощности при различающихся по значениям коэффициентам передачи регуляторов частоты. Здесь видно, что при равных значениях коэффициентов передачи амплитуды колебаний минимальны и обусловлены существованием обменных колебаний мощности из-за люфта, причем уменьшение коэффициента передачи регуляторов частоты практически сводит их к нулю. А при увеличении разницы между коэффициентами передачи регуляторов частоты на существующие обменные колебания мощности накладываются значительные по амплитуде синфазные колебания мощности.

Таблица 2.

Зависимость амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты

$K_{\omega 1}/K_{\omega 2}$	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
10	0,01	1,1	1	0,9	0,75	1,1	0,3	0,25	0,25	0,25	0,25
20	0,95	0,015	1,1	1	1,1	0,85	1,1	1,1	0,8	0,85	0,85
40	0,9	0,85	0,02	0,9	1,05	1,05	1,1	1,25	1,05	1,1	1,05
60	1,1	0,85	1,1	0,03	0,3	0,9	0,7	0,95	1	0,95	1,05
80	0,95	1	0,8	0,2	0,04	0,2	0,9	1,2	0,9	1,2	1,1
100	0,7	0,9	1,2	1	0,25	0,05	0,16	0,8	1,05	0,8	1,25
120	0,55	0,75	1,1	0,9	0,9	0,15	0,06	0,13	1,25	0,8	1,3
140	0,75	1,2	1,1	0,9	0,9	0,22	0,15	0,062	0,13	0,7	1,1
160	1,1	1,2	1,2	0,9	0,9	0,75	0,3	0,12	0,065	0,11	0,65
180	1,1	1,2	1,2	1,05	1,05	0,75	0,7	0,23	0,14	0,067	0,1
200	1,1	1	0,9	1,05	1,1	0,75	0,7	0,6	0,2	0,13	0,07

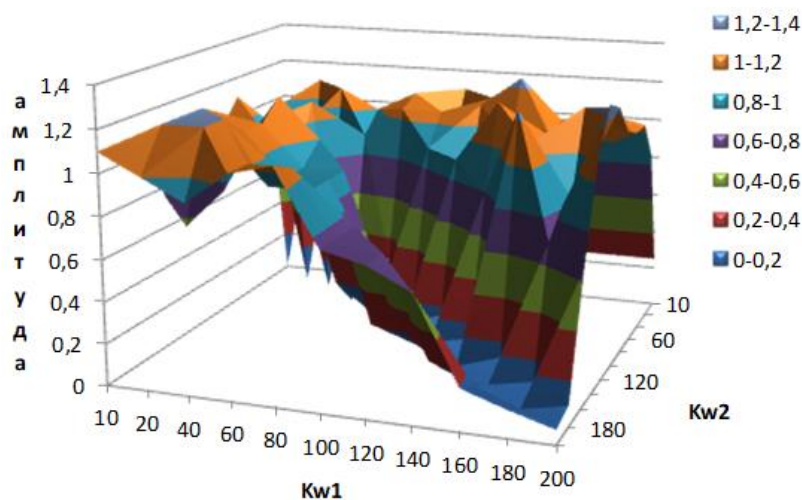


Рис. 8. Карта зависимости амплитуды синфазных колебаний мощности первого дизель-генератора от значений коэффициента усиления регулятора частоты. $K_{\omega 1}$ и $K_{\omega 2}$ - коэффициенты усиления регулятора первого и второго параллельно работающего дизель-генератора соответственно

Fig. 8. Map of the dependence of amplitude of the phase power fluctuations of the first diesel generator from the values of the gain factor of the frequency regulator. and - the gain factors of the regulator of the first and second parallel diesel generator respectively

Исследования показывают возможность обеспечения качества электрической энергии в локальных системах с точки зрения возникновения в них перетоков мощности вызванных обменными и синфазными колебаниями. Для этого необходимо обеспечить взаимосвязь между системами управления генераторов и при обнаружении превышения амплитудами колебаний допустимых величин производить автоматическую адаптивную подстройку и коррекцию параметров настройки регуляторов частоты рассредоточенных источников в локальной электрической системе. Математическое моделирование показало, что уменьшение коэффициентов передачи регуляторов частоты приводит к уменьшению амплитуды обменных колебаний, а поддержание равенства уставок частоты и коэффициентов передачи регуляторов частоты избавляет локальную систему от синфазных колебаний. Автоматические устройства управления работой источников электрической энергии в локальных системах имеют возможность контролировать параметры, необходимые для выявления и удаления колебаний мощности всех типов. Основными величинами, которые необходимо контролировать, являются токи источников электроэнергии с точки зрения поддержания постоянства идеальности синусоидальности их формы в смысле отсутствия обменных и синфазных колебаний мощности. Таким образом, обеспечив обмен такими параметрами между системами управления источниками в локальной электрической системе, возможно ввести дополнительную функцию по обеспечению стабильности работы рассредоточенных источников в квазиустановившемся режимах в смысле их чистоты от обменных и синфазных колебаний мощности.

Заключение

Формирование оптимальных режимов работы РИЭ в составе локальной электрической системы является сложной задачей и требует учета не только параметров генерирования отдельных РИЭ, но также показателей энергопотребления распределительных сетей и взаимосвязей между ними. Исходя из этого система управления совокупностью РИЭ должна строиться по иерархическому принципу, что позволяет повысить уровень интеграции управления вводом элементов более высокого уровня, предотвратить дублирование, разделить сложные задачи на подзадачи, которые решаются при ограниченных технических возможностях каждого иерархического уровня.

Известные из литературы исследования электроснабжения в локальных электрических системах посвящены в основном их взаимосвязям с системой централизованного электроснабжения, улучшению экологических характеристик, построению стоимостных моделей и критериев оптимальности. В отличие от рассмотренных в литературном обзоре результатов данное исследование заключается в экспериментальном выявлении новых факторов, влияющих на обеспечение качества электроэнергии в локальных электрических системах, выявлении вызывающих их причин и совершенствованию систем автоматического управления для устранения таких явлений. Добавление функции устранения обменных и синфазных колебаний мощности в системы автоматического управления рассредоточенными источниками электроэнергии обеспечивает адаптивное изменение настроек регуляторов частоты, направленное на обеспечение постоянства синусоидальности напряжения в квазиустановившихся режимах работы.

Литература

1. Jiang, J., Peyghami, S., Coates, C., Blaabjerg, F. A Decentralized Reliability-Enhanced Power Sharing Strategy for PV-Based Microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021;36(6):7281–7293, 9272881.
2. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices . International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
3. Савенко А.Е., Рыбин А.Г. Оптимизация схемы присоединения рассредоточенных источников электроэнергии к распределительным электрическим сетям Темрюкского района. Вестник КГЭУ.2022;1(53): 76–85.
4. Лежнюк П.Д., Нетребский В.В., Никиторович А.В. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе / Технічна електродинаміка. 2012;2:38-39.
5. Lezhniuk, P., Komar, V., Rubanenko, O. Information Support for the Task of Estimation the Quality of Functioning of the Electricity Distribution Power Grids with Renewable Energy Source. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 – Proceedings. 2020:168–171, 9159965.
6. Lezhniuk, P., Komar, V., Kravchuk, S. Regimes Balancing in the Local Electric System with Renewable Sources of Electricity. 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. CPEE 2019, 8949118.
7. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ.2018;4(40):53-65.
8. Грачева Е.И., Садыков Р.Р. Исследование вероятностных характеристик систем электроснабжения / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.2017;1-2:95–101.
9. Martinez, M.S., Nozik, A.J., Beard, M.C. Theoretical limits of multiple exciton generation and singlet fission tandem devices for solar water splitting. Journal of Chemical Physics. 2019;151(11),114111.
10. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(5):87-96.
11. Sangwongwanich, A., Blaabjerg, F. Monte Carlo Simulation with Incremental Damage for Reliability. Assessment of Power Electronics IEEE Transactions on Power Electronics. 2021,36(7):7366–7371, 9293165.
12. Banin U., Waiskopf N., Hammarström L., Batista V.S., Brudvig G.W. Nanotechnology for catalysis and solar energy conversion. Nanotechnology. 2020;32(4),042003.

13. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, 2015. №3(61). С. 36-38.

14. Губанов Ю.А., Калинин И. М., Корнев А.С., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.

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

16. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. Savenko-70@mail.ru

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Jiang J., Peyghami S., Coates, C., Blaabjerg F. A Decentralized Reliability-Enhanced Power Sharing Strategy for PV-Based Microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics. 2021;36(6):7281–7293, 9272881.

2. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.

3. Savenko A.E., Rybin A.G. Optimization of the scheme of connection of reduced electric power sources to the distribution electric networks in Temryuk region. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2022;1(53):76–85.

4. Lezhnyuk P.D., Netrebskiy V.V., Nikitorovich A.V. Optimizatsiya raspredeleniya nagruzki mezhdu rassredotochennymi istochnikami energii v lokal'noy elektricheskoy sisteme. Tekhnichna elektrodinamika. 2012;2:38-39.

5. Lezhniuk, P., Komar, V., Rubanenko, O. Information Support for the Task of Estimation the Quality of Functioning of the Electricity Distribution Power Grids with Renewable Energy Source. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020. Proceedings. 2020:168–171, 9159965.

6. Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S. Regimes Balancing in the Local Electric System with Renewable Sources of Electricity. 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. CPEE 2019, 8949118.

7. Gracheva E.I., Alimova A.N., Abdullazjanov R.Je. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoj moshhnosti i jelektrojenergii v nizkovol'tnyh cehovyh setjah. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2018;4(40):53–65.

8. Gracheva E.I., Sadykov R.R. Issledovanie veroyatnostnykh kharakteristik sistem elektrosnabzheniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. 2017;1-2:95-101.

9. Martinez M.S., Nozik A.J., Beard M.C. Theoretical limits of multiple exciton generation and singlet fission tandem devices for solar water splitting. Journal of Chemical Physics. 2019;151(11),114111.

10. Sangwongwanich A., Blaabjerg F. Monte Carlo Simulation with Incremental Damage for Reliability. Assessment of Power Electronics IEEE Transactions on Power Electronics. 2021;36(7):7366–7371, 9293165.

11. Gracheva E.I., Shakurova Z.M., Abdullazyanov R.E. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial networks. Power engineering: research, equipment, technology. 2019;21(5):87-96.

12. Banin U., Waiskopf N., Hammarström L., Batista V.S., Brudvig G.W. Nanotechnology for catalysis and solar energy conversion. Nanotechnology. 2020;32(4),042003.

13. Meshherjakov VN, Cherkasova VS, Meshherjakova OV. Korrekcija sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym jelektrivodom. *Sistemy upravlenija iinformacionny etehnologii*. 2015;3(61):36-38

14. Gubanov Y.A., Kalinin I.M., Kornev A.S., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Directions of improvement for ship unified power systems. *Marine Intelligent Technology*, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.

15. Savenko A.E., Golubev A.N. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksakh. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskij universitet imeni V.I. Lenina*. Ivanovo, 2016. 172 p.

16. Savenko A.E., Savenko P.S. *Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing*. Proceedings-2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru.

Pavel S. Savenko - marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

Получено

11.06.2022 г.

Отредактировано

11.07.2022 г.

Принято

28.07.2022 г.



ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ БЕЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Майоров¹ А.А., Сафин² А.Р.

¹ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань, Россия

²Казанский Государственный Энергетический Университет,
г. Казань, Россия

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Использование редкоземельных постоянных магнитов в электродвигателях стало обычным явлением. Применение редкоземельных магнитов в электродвигателях, таких как неодим (NdFeB), дает значительные прирост в характеристиках электродвигателя. Цены на электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов сильно зависят от цен на магниты. Так в 2012 году резко возросли цены на редкоземельные магниты, что в свою очередь привело к резкому увеличению стоимости электродвигателей. Тяжелая ситуация в мире, а также возможный новый скачок цен на редкоземельные магниты вызывает беспокойство. Поэтому необходимо рассмотреть возможность применения альтернатив редкоземельным постоянным магнитам. Целью исследования является изучение и сравнение различных альтернативных вариантов редкоземельным постоянным магнитам. Провести сравнение различных видов электродвигателей. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач производился сравнительный анализ магнитов из различных материалов, которые могли бы заменить неодимовые магниты, наиболее часто применяемых в электродвигателях. Также производилось сравнение различных видов электродвигателей. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность рассматриваемой темы. Рассмотрены проблемы, связанные с применением редкоземельных магнитов. Рассмотрены альтернативные варианты редкоземельным магнитам, которые применяются в электродвигателях. Рассмотрены различные виды электродвигателей, приведены плюсы и минусы различных видов электродвигателей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье описаны причины, по которой необходимо отказаться от применения в электродвигателях редкоземельных магнитов (наиболее распространенные неодимовые магниты). Описаны негативные моменты использования редкоземельных магнитов в электродвигателях. Описаны альтернативные варианты применения редкоземельным магнитам в электродвигателях. Так описывается возможность восстановления редкоземельных магнитов, а также возможности применения различных материалов для создания постоянных магнитов. После изучения проблем с применением редкоземельных магнитов в электродвигателях, пришли к выводу, что необходимо рассматривать различные варианты электродвигателей, в которых использовались бы магниты без применения редкоземельных элементов. Или рассматривать различные виды электродвигателей, в которых не применяются постоянные магниты. Так на замену применяемых повсеместно неодимовых магнитов, может прийти ферритовые магниты.

Ключевые слова: электродвигатели; ферритовые магниты; неодимовые магниты; редкоземельные магниты; реактивные электродвигатели; синхронные электродвигатели.

Для цитирования: Майоров А.А., Сафин А.Р. Возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 116-130. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-116-130.

THE POSSIBILITY OF USING PERMANENT MAGNETS WITHOUT RARE EARTH ELEMENTS IN ELECTRIC MOTORS

AA. Maiorov¹, AR. Safin²

¹REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

mayorov19977@mail.ru, sarkazan@bk.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The use of rare earth permanent magnets in electric motors has become commonplace. The use of rare earth magnets in electric motors, such as neodymium (NdFeB), gives a significant increase in the characteristics of the electric motor. The prices of permanent magnet motors made of rare earth elements are highly dependent on the prices of magnets. So in 2012, prices for rare earth magnets increased sharply, which in turn led to a sharp increase in the cost of electric motors. The difficult situation in the world, as well as a possible new price hike for rare earth magnets, is worrying. Therefore, alternatives to rare earth permanent magnets should be considered. The aim of the study is to study and compare various alternatives to rare earth permanent magnets. Compare different types of electric motors. *METHODS.* When solving the tasks set, a comparative analysis of magnets made of various materials was carried out, which could replace neodymium magnets, which are most often used in electric motors. A comparison of different types of electric motors was also made. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic under consideration. The problems associated with the use of rare earth magnets are considered. Alternative options for rare-earth magnets, which are used in electric motors, are considered. Various types of electric motors are considered, the pros and cons of various types of electric motors are given. *CONCLUSION.* The article describes the reasons why it is necessary to abandon the use of rare earth magnets in electric motors (the most common neodymium magnets). The negative aspects of the use of rare earth magnets in electric motors are described. Alternative applications of rare-earth magnets in electric motors are described. This describes the possibility of restoring rare earth magnets, as well as the possibility of using various materials to create permanent magnets. After studying the problems with the use of rare earth magnets in electric motors, they came to the conclusion that it is necessary to consider various options for electric motors that would use magnets without the use of rare earth elements. Or consider different types of electric motors that do not use permanent magnets. So to replace the widely used neodymium magnets, ferrite magnets can come.

Keywords: electric motors; ferrite magnets; neodymium magnets; rare earth magnets; reactive electric motors; synchronous electric motors.

For citation: Maiorov AA, Safin AR. The possibility of using permanent magnets without rare earth elements in electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):116-130. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-116-130.

Введение

Первый магнитотвердый материал из спеченного неодима, железа и бора (NdFeB) был разработан в 1983 году компанией *Sumioto Special Metals*. Такие магниты обладают высокими характеристиками по сравнению с другими магнитами. Сравним магнитные энергии постоянных магнитов из различных материалов. На рисунке 1 показано сравнение магнитной энергии ферритового магнита (30PA190), неодимового магнита (N50), альникового магнита (Alnico 9), самариевого магнита (Sm-Co).

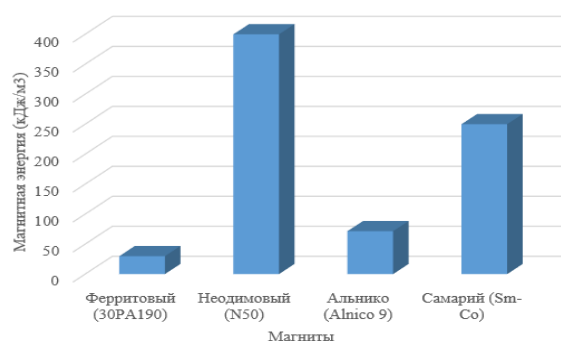


Рис. 1. Сравнение магнитной энергии ферритового магнита (30PA190), неодимового магнита (N50), альникового магнита (Alnico 9), самариевого магнита (Sm-Co).

Магнитная энергия – это энергия, заключенная в электромагнитном поле.

Для того что бы неодимовые магниты ($NdFeB$) могли работать при высоких температурах окружающей среды в них добавляют диспрозий [1]. Диспрозий – это тяжелый редкоземельный элемент, являющимся ферримагнитном. Добавление диспрозия позволяет повысить коэрцитивные силы. Добавление такого элемента сыграло важную роль, возможности применения неодимовых магнитов в условиях высокой температуры, например, применение электродвигателей с неодимовыми магнитами в электромобилях.

Применение в электродвигателях неодимовых магнитов ($NdFeB$) позволяет достичь сильного магнитного поля при маленьком размере магнитов, следовательно, при маленьких размерах электродвигателя. Если сравнивать неодимовый магнит ($NdFeB$) толщиной 3 мм и катушку с 220 витками медного провода, по которому проходит ток равным 13А, то они производят одинаковое количество магнитного поля. Сравним теперь площадь, если в проводнике предполагается плотность тока 10 А/мм^2 , то эквивалентная электромагнитная катушка будет иметь в 5-6 раз больше площадь поперечного сечения чем неодимовый магнит ($NdFeB$). Потери же в медной обмотке составит примерно 50 Вт и более на один метр обмотки электродвигателя, возникающий из-за сопротивления проводника.

В настоящее время из-за энергетических, и экологических проблем, и быстрого истощения полезных ископаемых электротранспортная промышленность получило бурное развитие. В электротранспорте на сегодняшний день в большинстве применяются синхронные двигатели с постоянными магнитами. Такие электродвигатели используются в качестве тяговых двигателей, в которых применяются магниты из редкоземельных элементов. В настоящее время в тяговых двигателях применяются постоянные магниты из неодима ($Nd-Fe-B$). У неодимовых магнитов есть следующие недостатки:

- 1) Отсутствие стойкости к физическим нагрузкам;
- 2) Отсутствие стойкости к высоким температурам;
- 3) Относительно высокая скорость размагничивания;
- 4) Сложность производства;
- 5) Постоянное увеличение цены [2].

В последнее годы цена на неодимовые магниты резко возросло. Поэтому необходимо разработать альтернативные двигатели, которые не зависят от редкоземельных магнитов.

Применяемые редкоземельные материалы в электродвигателях, таких как неодим ($NdFeB$), обладает преимуществом в производительности [3]. Главным поставщиком редкоземельных материалов для электродвигателей в мире является Китай. Китай производит примерно 90-95 % редкоземельных элементов [4]. Так в 2011 и 2012 годах Китай угрожал прекратить поставки редкоземельных элементов, это очень сильно обеспокоило все другие страны. После такого заявления цены на редкоземельные материалы резко возросли, причем цены на неодим возросли в несколько раз. На сегодняшний день цены восстановились и вернулись приблизительно к уровню 2011-2012 года. После такого скачка многие организации начали искать и открывать новые шахты.

Необходимо отказаться от применения редкоземельных магнитов в электродвигателях, отказ от таких магнитов приведет к уменьшению стоимости электродвигателя. Однако нужно учесть, что применение другого вида магнита может привести к изменению конструкции электродвигателя, что может привести к дополнительным тратам. Однако удаление редкоземельных магнитов из электродвигателя может привести к нерентабельности.

Одним из основных особенностей электродвигателей с редкоземельными магнитами является то, что редкоземельные магниты (и другие типы постоянных магнитов) всегда включены, вне зависимости работает ли электродвигатель или нет. Это означает, что, когда редкоземельные магниты (или другие типы магнитов) вращаются даже при отсутствии электрического тока магнитный поток будет все еще создаваться в электродвигателе. Это приводит к ряду нежелательных эффектов.

Одним из нежелательных эффектов является высокое магнитно-индуцированное напряжение на клеммы электродвигателя, если электрические клеммы электродвигателя разомкнуты, или высокие токи через обмотки электродвигателя, если клеммы электродвигателя замкнуты.

Поговорим о так называемом процессе «ослабление поля» [5]. Когда магниты вращаются они индуцируют напряжение на обмотках, вследствие этого возникает обратная электродвижущая сила. При использовании постоянных магнитов в электродвигателях размер обратного ЭДС прямо пропорционально скорости вращения электродвигателя. Поэтому при достижении достаточной скорости вращения электродвигателем, обратная ЭДС становится настолько большой, что больше не позволяет увеличивать скорость вращения электродвигателя. Чтобы «смягчить» этот эффект необходимо ослабить поле электродвигателя. Это можно сделать введением дополнительного тока в обмотки двигателя определенным образом, чтобы уменьшить магнитный поток [6]. Применение такого метода позволит увеличить скорость вращения электродвигателя в несколько раз, примерно от 3 до 5 раз. Однако требуя подачи дополнительного тока в обмотки электродвигателя, это приведет к увеличению резистивных потерь и это приведет к уменьшению эффективности электродвигателя.

Применение редкоземельных магнитов в электродвигателях позволяют разрабатывать электродвигатели высоким крутящим моментом и высоким магнитным потоком [7]. Замена редкоземельных магнитов в электродвигателях позволит уменьшить стоимость электродвигателя, уменьшить негативное влияние на окружающую среду и увеличение списка потенциальных поставщиков материалов для электродвигателя, что несомненно положительно отразится на стоимости электродвигателя.

Научная значимость заключается в развитии конструкции ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами, основанная на моделировании и топологической оптимизации, и позволяющая получить не просто результаты замены редкоземельных магнитов на ферритовые, но и определить оптимальное расположение магнитов, с целью минимизации потерь КПД и вращающего момента. А практическая значимость – получение новых типов двигателей с меньшей стоимостью, сохранением рабочих параметров, и возможный отказ от редкоземельных магнитов.

Материалы и методы исследования

Приведенные выше недостатки применения в электродвигателях неодимовых магнитов (NdFeB) заставляет рассмотреть альтернативы редкоземельным магнитам в электродвигателях. Необходимо рассмотреть альтернативы редкоземельным магнитам используемых в электродвигателях.

На основании проведенных исследований на возможность применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных магнитов были рассмотрены:

1) альтернативные варианты редкоземельным магнитам. Рассмотрены наиболее эффективные способы, материалы, оборудование, которое позволило бы избежать применения в электродвигателях постоянных магнитов из редкоземельных элементов.

2) проведен сравнительный анализ различных электродвигателей, в котором описаны плюсы и минусы электродвигателей и область их применения.

Изучение вопроса возможности применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных магнитов проводилось с метода моделирования и изучения. С помощью программного обеспечения COMSOL были спроектированы различные виды электродвигателей, с различными материалами постоянных магнитов. В этом же программном обеспечении, COMSOL, были произведены необходимые расчеты, для определения различных характеристик электродвигателей.

Результаты

Рассмотрим альтернативные варианты постоянным магнитам из редкоземельных материалов:

1) Восстановленные редкоземельные элементы [8]. В этой области сосредоточены в основном на двух альтернативных подходах. Во-первых, производители магнитов стремятся уменьшить количество редкоземельных элементов в магнитах, при этом стараясь сохранить или улучшить характеристики магнита. Так, например, одни разрабатывают

магниты, в которых снижают содержание диспрозия по сравнению с обычными магнитами. Процесс производства таких магнитов связан с использованием нового процесса, который заключается в диффузии диспрозия в материалах магнита. Другие же стремятся уменьшить размер зерна магнитов до наномасштабов. Таким образом, они надеются значительно увеличить характеристики магнита [9].

Во-вторых, использование переработанных редкоземельных материалов. В компьютерной промышленности уже много лет используют переработанные редкоземельные магниты [10]. Однако есть опасения, что восстановление редкоземельных магнитов могут уменьшить качество и характеристики магнитов [11].

Так же была проделана большая работа по разработке электродвигателей, в которых используются менее редкие земные магниты. В таких двигателях старались сохранить характеристики или улучшить их. Наиболее эффективным подходом в этом направлении стало применение так называемых гибридных моторных технологий. В таких электродвигателях используется меньшее количество встроенных магнитных материалов. Такие электродвигатели применяются в электромобилях *BMW*.

2) Прочие магнитные материалы. Вопросом разработки магнитных материалов без использования неодима занимается большое количество компаний. На данный момент разработано большое количество магнитных материалов с хорошими характеристиками, например, нитрид железа и так далее. Были рассмотрены магнитные материалы, разработанные до появления неодима, такие как:

- Алюминий никель-кобальт. Данный материал был разработан в 1930-ом году. Плюсами такого магнита можно назвать высокая температурная стойкость, высокая плотность остаточного потока [12]. Минусы такого магнита высокий риск размагничивания, относительно не высокие магнитные свойства [13]. Из-за большого риска размагничивания данный материал не получил популярности для использования в электродвигателях.

- Самарий-кобальтовые магниты. Данный материал магнита был разработан в 1970-ом году [14]. Самарий-кобальтовые магниты широко используются в автомобильной, аэрокосмической, оборонной и промышленной сфере в различном оборудовании, аппаратах и приборах, таких как электродвигатели, электрогенераторы, электромагнитные муфты, микрофоны, динамики, в устройствах распыления для вакуумного нанесения покрытий, датчиках Холла, ускорителях частиц и многих других устройствах [15]. Однако данный магнит дороже, чем неодимовые магниты и содержит редкоземельные материалы Самарий и кобальт.

- Ферритовые магниты. Применять ферритовые магниты начали с 1950-ого года. Ферритовые магниты изготавливаются из оксида железа в сочетании со стронцием, барием или кобальтом [16]. Основной проблемой электродвигателей с ферритовыми магнитами является низкая плотность магнитного потока и низкая коэрцитивная сила. Магниты из феррита примерно в 10 раз хуже, чем неодимовые, по магнитным характеристикам: коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и магнитной энергии. Для получения конкурентоспособной плотности, крутящего момента требуется существенно изменить конструкцию электродвигателя. Однако одним из преимуществ ферритовых магнитов является то, что их коэрцитивная сила увеличивается с температурой, делая их менее чувствительные к внезапному размагничиванию [17]. В последнее время было проведено много различных исследований по использованию ферритовых магнитов в электродвигателях. Исследование на данный момент все еще продолжает, но уже можно сделать первоначальные выводы, что электродвигатели с ферритовыми магнитами являются надежной машиной и стоимость таких электродвигателей будет меньше чем у других.

3) Индукционные электродвигатели. Применение индукционных электродвигателей распространено в промышленной автоматизации, а применение их в качестве тяговых двигателей крайне редко. Исключением стала компания «*Tesla Motor Corporation*». Именно эта компания заявила о применении в своих электромобилях индукционных электродвигателей [18].

Однако индукционные электродвигатели несут потери в проводниках ротора. Как правило, эти потери в два-три раза выше, чем в электродвигателях с постоянными магнитами. Появление высоких потерь в роторе нежелательны, потому что это приведет к нагреву ротора, а охладить вращающийся ротор на много труднее, чем неподвижный статор. Возникновение больших потерь в роторе означает не только то, что это тип электродвигателя может быть менее эффективным, чем другие варианты, но также и то, что в процессе эксплуатации этот электродвигатель может быстро перегреться. Для снижения температуры электродвигателя понадобится разработать специальную схему управления,

которая позволяла бы при достижении какой-то определённой температуры ограничить мощность электродвигателя, чтобы уменьшить его температуру.

Но компания «*Tesla Motor Corporation*» для уменьшения потерь в роторе использовала медный ротор, вместо алюминиевого. Однако, применение медного ротора увеличило стоимость этого электродвигателя. Так же из-за применения меди пришлось изменить схему управления электродвигателем, также вес электродвигателя увеличился [19].

4) Электродвигатели с фазным ротором. Такие электродвигатели применяются в производстве электроэнергии, подъемных кранах, лифтовых приводах, станках и так далее. Принцип работы такого электродвигателя заключается в том, что в область обмотки статора подается электрический ток и возникает магнитный поток [20]. Так же одновременно на ротор подается ток, и в каждом механизме появляется магнитное поле, они взаимодействуют друг с другом и ротор вращается. Для передачи электрического тока на ротор требуется специальный механизм. Для этого части используют контактные кольца. Применение контактных колец оказалось ненадежным, из-за быстрого износа щеток. Еще одним из недостатков такого электродвигателя является необходимость дополнительных коммутационных устройств, который необходим для обеспечения контролируемого тока в роторе [21]. Также отвод тепла от проводников ротора может стать ограничивающим фактором, при этом снова требуется тщательный контроль для предотвращения перегрева.

Рассмотрим различные виды электродвигателей и выделим их достоинства:

1) Электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов. Такие электродвигатели выделяются такими характеристиками, как высокой плотностью мощности, высокой эффективностью, легкостью управления в широком диапазоне скорости. Именно поэтому такие электродвигатели используются повсеместно [26].

2) Асинхронные электродвигатели. Рассмотрим отдельно асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Это бесщеточные электродвигатели переменного тока, работающего на переменном синусоидальном напряжении, которые широко применяются в промышленности и в других сферах. Асинхронные электродвигатели обладают высокой надежностью, простотой конструкции, низкой стоимостью, простотой обслуживания и способностью работать в тяжелых условиях. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором так же применяются в электромобилях, электробусах и в легких грузовиках. Например, такие электродвигатели применялись в электромобилях компании *Tesla*, *Mercedes-Benz*, *Toyota* и так далее. Компания *Smith Electric Vehicles* разработала грузовик *Newton*, в котором применялся асинхронный электродвигатель.

Асинхронные электродвигатели являются асинхронными машинами, то есть скорость вращения поля, создаваемого обмотки статора и скорость вращения ротора отличаются [27]. Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором имеют простую конструкцию по сравнению с другими видами электродвигателей, это облегчает проектирование и производства таких электродвигателей [28].

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором обладают следующими недостатками:

- сложностью управления при низких скоростях;
- низким коэффициентом мощности, при малых нагрузках;
- высокими пусковыми токами;
- низким КПД.
- имеют меньшую плотность крутящего момента, чем у других видов электродвигателей [29].

3) Синхронные электродвигатели. Синхронные электродвигатели имеют ротор с постоянными магнитами. В большинстве случаев применяются постоянные магниты из редкоземельных материалов. Применение магнитов из редкоземельных материалов позволяют получить высокие характеристики синхронного электродвигателя. Синхронные электродвигатели с магнитами из редкоземельных материалов обладают высокими характеристиками, такими как, высокой плотностью крутящего момента, высокой эффективностью, точностью регулирования крутящего момента [30]. В тоже время синхронные электродвигатели обладают такими недостатками как, ограниченная способность ослабления поля, ограниченная область постоянной мощности, это характерно для синхронных электродвигателей, у которых магниты установлены на поверхности ротора [31]. Но это не так критично для синхронных электродвигателей, у которых магниты расположены внутри ротора. Также есть возможность размагничивания, это может быть

связано с повышением температуры или может быть последствием короткого замыкания [32].

Магниты, которые располагаются не на поверхности ротора, являются более защищенными от механических воздействий и магнитных [33]. Поэтому синхронные электродвигатели, в которых магниты расположены не на поверхности ротора, являются более надежными. Такие электродвигатели генерируют более высокую плотность потока в воздушном зазоре и применяются в условиях, когда нужно длительное время поддерживать постоянную нагрузку [34]. Однако такие электродвигатели имеют более высокую стоимость, по сравнению синхронными электродвигателями, у которых постоянные магниты расположены на поверхности ротора, из-за сложности производства [35].

В настоящее время синхронные машины с постоянными магнитами из редкоземельных материалов являются наиболее используемыми в электромобилях, поскольку использование редкоземельных магнитов позволяет разрабатывать более лёгкие электродвигатели с более высокими характеристиками [36]. Однако применения редкоземельных магнитов сильно увеличивает стоимость электродвигателя. Поэтому предпринимается много попыток для замены редкоземельных магнитов. Наиболее важными критериями при проектировании электродвигателей без редкоземельных магнитов является мощность, крутящий момент, простота конструкции, надежность [37].

Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами гибридного возбуждения [38]. Такие электродвигатели обеспечивают высокую эффективность в широком диапазоне переменных скоростей [39]. Одним из главных минусов таких электродвигателей является высокая стоимость [40].

4) Синхронный реактивный двигатель. Такие электродвигатели обладают относительно низкой стоимостью [41]. Недостатками такого электродвигателя является сложность конструкции, сложностью управления, низкий коэффициент мощности при работе с ослаблением поля [42]. Для того чтобы мощность синхронного реактивного двигателя была сопоставима с мощностью синхронного электродвигателя с постоянными магнитами необходимо увеличить размеры первого или увеличить мощность источника питания, что приводит к увеличению стоимости синхронного реактивного двигателя [43].

Стоимость редкоземельных магнитов, применяемых в электродвигателях, может достигать до 60 % от общей стоимости материалов. Поэтому, заменив редкоземельные магниты ферритовыми магнитами, затраты на материалы может сократиться на 50%.

Плотность крутящего момента и возможность создания крутящего момента в синхронных реактивных электродвигателях могут быть увеличены за счет включения магнитов в ротор, что приводит к созданию синхронных реактивных электродвигателей с ферритовым усилителем [44]. Из-за больших затрат и возможными проблемами поставками редкоземельных магнитов, разрабатываются синхронные реактивные электродвигатели с ферритовым усилителем, с применением ферритовых магнитов. Такие электродвигатели сочетает в себе функции электродвигателей с ферритовыми магнитами и реактивных электродвигателей. Такой электродвигатель имеет высокий коэффициент мощности, широкий диапазон мощностей, является надежным [45]. Синхронные реактивные электродвигатели с ферритовым усилителем использует меньшее количество ферритовых магнитов, чем синхронные электродвигатели с ферритовым магнитом, что приводит к снижению обратной ЭДС и снижению токов короткого замыкания.

5) Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами из феррита. Такой электродвигатель уступает синхронному электродвигателю с редкоземельными магнитами в максимальной производительности по крутящему моменту [46]. Преимуществом синхронных электродвигателей с постоянными магнитами из феррита является низкая стоимость, обладает большой эффективностью в области высоких скоростей и низкой нагрузки.

Таким образом, можно сделать следующий вывод, что у каждого электродвигателя есть свои плюсы и минусы. В настоящее время в качестве тяговых двигателей применяются электродвигатели с постоянными магнитами из редкоземельных элементов, но в зависимости от различных технических требований могут применяться и другие виды электродвигателей [47].

Рассмотрим применение в электродвигателях вместо неодимовых магнитов более дешёвый и экологически чистые магниты. Такими магнитами могут стать ферритовые. Ферритовые магниты являются наилучшими кандидатами для замены неодимовых магнитов. Ферритовые магниты также обладают очень высоким электрическим сопротивлением, что сводит к минимуму потери на вихревые токи. Так же ферритовые магниты являются не дорогими магнитами. Изготовление ферритовых магнитов является

довольно простым процессом. Применение ферритовых магнитов позволит удешевить производство электродвигателей.

В программном обеспечении COMSOL был разработан электродвигатель с ферритовыми магнитами. На рисунке 2 представлен общий вид, разработанного электродвигателя.

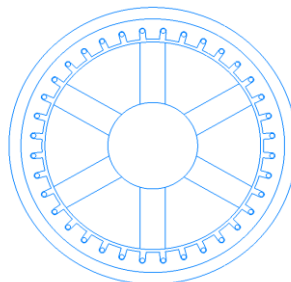


Рис. 2. Общий вид электродвигателя с ферритовыми магнитами.

Fig. 2. General type of electric motor with ferrite magnets.

Для сравнения характеристик электродвигателей, таких как распределение магнитного поля и крутящего момента, был разработан общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами. На рис.3 представлен общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами.

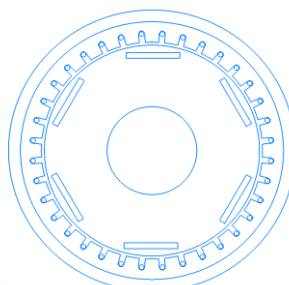


Рис. 3. Общий вид электродвигателя с неодимовыми магнитами.

Fig. 3. The general appearance of an electric motor with neodymium magnets.

В результате моделирование, электродвигателей с ферритовыми и неодимовыми магнитами, в программном обеспечении COMSOL были получены следующие результаты:

1) Распределение магнитного поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами, представлен на рисунке 4, а в электродвигателе с неодимовыми магнитами на рисунке 5.

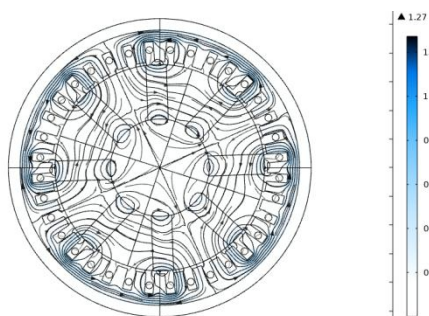


Рис. 4. Распределение магнитного поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами.

Fig. 4. Magnetic field distribution in ferrite magnet motor.

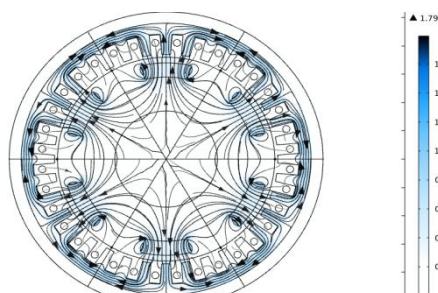


Рис. 5. Распределение магнитного поля в электродвигателе с неодимовыми магнитами.

Fig. 5. Magnetic field distribution in neodymium magnet electric motor.

Как видно из результатов расчета, распределение магнитного поля в электродвигателях отличается на 30%.

2) График крутящего момента поля в электродвигателе с ферритовыми магнитами, представлен на рисунке 6, а в электродвигателе с неодимовыми магнитами представлен на рисунке 7.

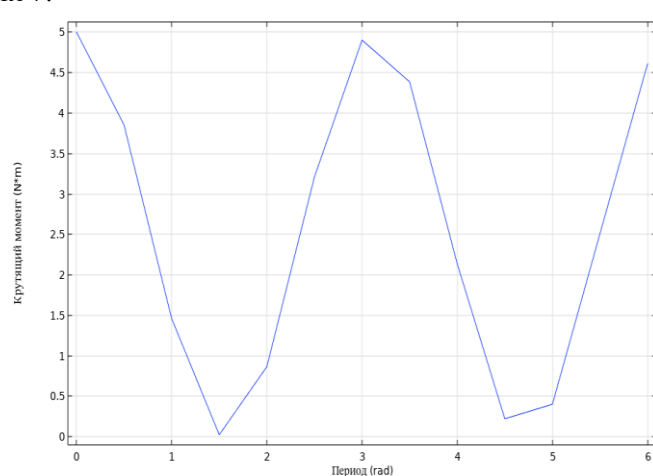


Рис. 6. График крутящего момента в электродвигателе с ферритовыми магнитами. *Fig. 6. Torque graph in ferrite magnet electric motor.*

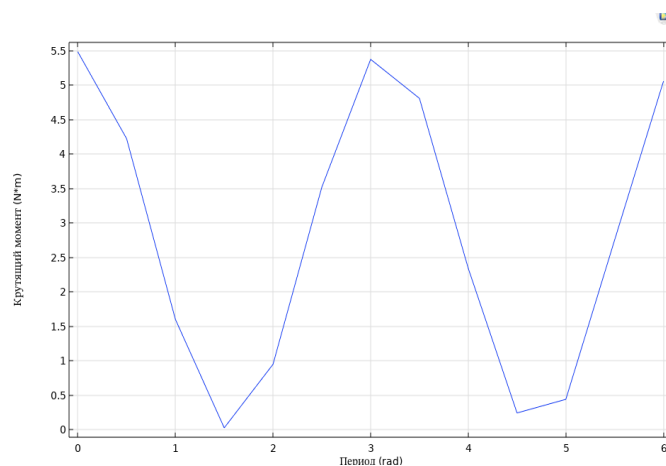


Рис. 7. График крутящего момента в электродвигателе с неодимовыми магнитами. *Fig. 7. Torque graph in neodymium electric motor*

Как видно из результатов расчета крутящий момент для электродвигателей с неодимовыми магнитами и ферритовыми магнитами отличается только на 9 процентов.

Несмотря на то, что остаточная плотность потока ферритового магнита составляет примерно одну треть от плотности потока редкоземельного магнита, электродвигатели с ферритовыми магнитами может генерировать крутящий момент, эквивалентный 90 % крутящего момента электродвигателя с неодимовыми магнитами, и получить более широкий диапазон постоянной выходной мощности.

В результате этих оценок электродвигатели с ферритовыми магнитами может достичь плотности выходной мощности, эквивалентной электродвигателям с неодимовыми магнитами, даже несмотря на то, что максимальный крутящий момент при том же токе немного ниже. Поэтому, можно предположить, что разработанный электродвигатель с ферритовыми магнитами можно применить вместо электродвигателей с неодимовыми магнитами.

Обсуждение

Для замены редкоземельным магнитам может быть использованы ферритовые магниты. Ферритовые магниты имеют более низкую электропроводность, чем магниты из редкоземельных материалов (NdFeB), поэтому они имеют более низкие потери из-за вихревых токов, что снижает вероятность размагничивания [48]. Ферритовые магниты имеют гораздо меньше поле остаточной индукции и максимальный продукт энергии, чем магниты из редкоземельных материалов (NdFeB). Поэтому ферритовые магниты не могут напрямую заменить магниты из редкоземельных материалов (NdFeB) в электродвигателях с

постоянными магнитами, поскольку ферритовые магниты генерируют гораздо меньшую плотность магнитного потока [49]. Однако существует возможность создания конкурентоспособного электродвигателя с ферритовыми магнитами, который будет иметь примерно такой же крутящий момент и мощность, как у электродвигателя с редкоземельными магнитами, при этом размеры самого электродвигателя не изменяться. Так не давно немецкая компания *Infineon Technologies* разработал синхронный электродвигатель со спицевым ротором, в котором используется ферритовые магниты. Такой электродвигатель смог составить конкуренцию асинхронному электродвигателю [50]. Электродвигатели с ферритовыми магнитами наиболее хорошо подходят для замены электродвигателей с редкоземельными магнитами (NdFeB), чем асинхронные электродвигатели или синхронные электродвигатели.

Большинство электродвигателей в настоящее время используют магниты с редкоземельными магнитами, хотя существует различные возможности для разработки электродвигателей без редкоземельных магнитов [51].

Заключение

Редкоземельный магнитный материалы, неодим, железо, бор, образуют основу электродвигателей, используемых во многих сферах. Применение таких магнитов в электродвигателях позволяют получить в проектируемых электродвигателях высокую плотность крутящего момента, высокий коэффициент полезного действия, делать электродвигатели более компактными и легкими.

Однако применять все время редкоземельные магниты в электродвигателях невозможно. Это связано как с тем, что цена на редкоземельные магниты очень высока, так и тем, что количество редкоземельных элементов используемых при производстве магнитов ограничено.

Даже если эти факторы можно несколько смягчить, тем не менее, есть веские аргументы в пользу исследования и эксплуатации других двигателей, которые не нуждаются в редкоземельных магнитных материалах. Многие производители электромобилей уже используют электродвигатели, в которых не используются редкоземельные элементы. Реактивные электродвигатели и электродвигатели, в которых не применяют редкоземельные магниты, а используют постоянные магниты из феррита, возможно, станут основой для всех электродвигателей с еще более высокими характеристиками в будущем.

В данной работе был проведен обзор литературы в области возможности применения в электродвигателях постоянных магнитов без редкоземельных элементов. В настоящее время большой интерес вызывает этот вопрос из-за проблем с увеличением стоимости редкоземельных магнитов, с риском ограничения поставок редкоземельных магнитов. Результаты исследования показывают, что существует возможность разработки электродвигателей без редкоземельных магнитов, которые могут достичь также характеристик, как аналогичные электродвигатели с редкоземельными магнитами. Так же были рассмотрены уже разработанные на данный момент электродвигателей с магнитами без применения редкоземельных магнитов. Эти электродвигатели обладают интересными особенностями и обладают более низкой стоимостью, более высокой температурой эксплуатации, меньшей вероятностью размагничивания, лучшим КПД и повышенной эффективностью. Такие электродвигатели являются более привлекательными для применения в электромобилях и в других сферах.

Литература

1. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты, энциклопедический справочник. В 5 томах, том 1, магниты и магнитные системы. Санкт-Петербург: ЛИК, 2004. 361 с.
2. Вонсовский С.В., Магнетизм. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. 1027 с.
3. Иродов И.Е., Электромагнетизм. Основные законы. 7-е изд. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 319 с.
4. Карташов Е.Ю. История открытия и области применения постоянных магнитов на основе РЗМ. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Северск, 2006. Доступно по: https://studopedia.net/16_33095_istoriya-otkritiya-i-oblasti-primeneniya-postoyannih-magnitov-na-osnove-rzm.html. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
5. Менушенков В.П. Новые магнитотвердые материалы вопросы использования и область применения // Электротехника. 1999. №10. с.1-4.

6. Лихачев В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 240 с.
7. Barba P., Savini A., Wiak S. Field Models in Electricity and Magnetism. Springer Science+Business Media, LCC, 2008.
8. Буйновский П.А. Получение магнитных сплавов на основе РЗМ и магнитов из них. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск, 2001. Доступно по: <https://tekhnosfera.com/view/383853/a/#?page=1>. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
9. Юшина Т.И., Петров И.М., Гришаев С.И., и др. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №1. с. 577-608.
10. Нагата Х., Сингаки Й. Способ переработки отходов магнитов. Патент РФ на изобретение №2446497. 27.03.2012. Доступно по: <http://allpatents.ru/patent/2446497.html>. Ссылка активна на 10 апреля 2022.
11. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020 №5. с. 68-84.
12. Перельман Ф.М., Зворыкин А.Я. Кобальт и никель. М.: Наука, 1975. 215 с.
13. Мин. П.Г., Вадеев В.Е., Пискороский В.П., и др. Разработка технологии выплавки сплавов системы РЗМ-Fe-Co-B с высокой чистотой по примесям для термостабильных магнитов // Труды ВИАМ. 2016. №1. с. 3-9.
14. Розин П.А., Акимов А.В. Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. №2(20). С. 12-18.
15. Volyanskaya Ya. B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017. No.4. pp. 26-33.
16. Coey J.M.D. Magnetism and magnetic materials. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2010. pp. 633.
17. Бербиренков И.А., Лохнин В.В. Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2011. №2. С. 10-12.
18. Веселовский О.Н., Годкин М.Н. Индукционные электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом. М.: Информэлектро. 1974. 48 с.
19. Мумиков А.Д., Сентюрихин Н.И. Линейные индукционные электрические машины // Вопросы науки и образования. 2018. №8. С. 7-9.
20. Петриков Л.В., Корначенко Г.Н. Асинхронные электродвигатели: Обмоточные данные. Ремонт. Модернизация. М.: Энергоатомиздат. 2000. 496 с.
21. Bobazhanov M.K., Fayziev M.M., Mustaev R.A., et al. Applying the non-contact devices for starting a single-phase asynchronous electric motor. Вестник науки и образования. 2021. №10(113). pp. 31-35.
22. Кутупов И.И., Садыков Д.А., Тимеев А.А. Электроприводы с новыми типами синхронных реактивных машин // Вестник науки. 2021. №7(40). С. 88-91.
23. Нгуен М.Т., Нгуен Ч.Х. Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями. Известия Тульского государственного университета // Техника науки. 2014. №8. С. 184-187.
24. Самосейко В.Ф., Шарашкин С.В. Анализ преимуществ реактивных электрических машин при построении гребной электрической установки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. №2(17). С. 14-22.
25. Гельвер Ф.А. Конструкции реактивных электрических машин. Характеристики, достоинства и недостатки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. №1(391). С. 140-150.
26. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020. №5. С. 68-84.
27. Enrico L. Electric Machines. Design. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003. pp. 53-68.
28. Pollefiet J. Electric Machines. Power Electronics. 2018. pp. 16.1-16.76.
29. Lukaszczuk M. Improving efficiency in electric motors. World Pumps. 2014. №1. pp. 36-41.
30. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Петров А.А., и др. Синхронный электродвигатель с повышенной скоростью вращения и сбалансированным ротором // Вестник Чувашского университета. 2021. №1. С. 19-26.

31. Yang Y., Qiang H., Chunyun F., et al. Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. *Energy*. 2020. №213.
32. Shen Y., Wei W. Study on the flux-weakening capability of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle. *Mechatronics*. 2016. №38. pp. 115-120.
33. Zhifu W., Jingzhe Y., Chuang C., et al. Phase-phase Short Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles. *Energy Procedia*. 2016. №88. pp. 915-920.
34. Hamler A., Gorican V., Sustarsic B., et al. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor. *Jornal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. №2(304). pp. 816-819.
35. Silva P.C., Matos D.S., Nied A., et al. Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model. *ISA Transactions*. 2021. №111. pp. 223-230.
36. Zheming F., Guangwei L., Shi J., et al. Comparative study on torque characteristics of permanent magnet synchronous reluctance motors with different axial hybrid rotors. *Energy Reports*. 2022. №5(8). pp. 1349-1359.
37. Мартынов Л.Н. Синхронный гибридный электродвигатель // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». 2011. С. 492-493.
38. Смирнов А.Ю. Вопросы классификации электрических машин для бесконтактного синхронного привода // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2011. №2(87). С. 162-169.
39. Pyrkín A., Isidori A., Borisov O. Output Robust Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. №14(54). pp. 197-202.
40. Adly A.A., Huzayyin A. The impact of demagnetization on the feasibility of permanent magnet synchronous motors in industry applications. *Journal of Advanced Research*. 2019. №17. pp. 103-108.
41. Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Казакбаев В.М., и др. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». 2015. С. 19-22.
42. Шрейнер Р.Т., Шилин С.И., Медведев А.В. Математическое моделирование синхронных реактивных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода // Труды международной семнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». 2018. с. 58-63.
42. Gennaro M., Jurgens J., Zanon A., et al. Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessment*. 2019. №31. pp. 86-101.
43. Кузнецов М.И. Основы электротехники. Москва: Высшая школа, 1970. 368 с.
44. Коршунов А.И. Электромагнитный момент синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известие высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. №1(58). С. 61-66.
45. Jani N.S., Jamnani G.J. Performance analysis and comparison of PM-Assisted synchronous reluctance motor with ferrites and Rare-earth magnet materials. *Materialstoday: PROCEEDINGS*. 2022.
46. Kuznetsov V., Zykov N., Ivanov M. Technique of Evolutionary Optimization Permanent-magnet Synchronous Motors. *Procedia Computer Science*. 2017. №103. pp. 198-204.
47. Кондратьев В.Б. Глобальный рынок редкоземельных металлов // Горная промышленность. 2017. №4 (134). С. 48-54.
48. Breton J-M.L. Ferrite Magnets: Properties and Applications. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. №3. pp. 206-216.
49. Galíoto S.J., Reddy P.B., El-Refaie A.M., et al. Effect of Magnet Types on Performance of High-Speed Spoke Interior-Permanent-Magnet Machines Designed for Traction Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. №3(51). pp. 2148-2160.
50. Сафин А.Р., Грачева Е.И., Ranjan K.B., Петров Т.И. Использование ферритовых магнитов в синхронных двигателях с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 47-55. EDN FBPZWP.

Авторы публикаций

Майоров Андрей Александрович – аспирант, инженер ЗАО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ», г. Казань.

Сафин Альфред Робертович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань.

References

1. Kunevich A.V., Podol'skii A.V., Sidorov I.N. *Ferrity, entsiklopedicheskii spravochnik. V 5 tomakh, tom 1, magnity i magnitnye sistemy. Sankt-Peterburg: LIK; 2004.*
2. Vonsovskii S.V., *Magnetizm. Moskva: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury izd-va «Nauka»; 1971.*
3. Irodov I.E., *Elektromagnitizm. Osnovnye zakony. 7-e izd. M.: BINOM. Laboratoriya znanii; 2009.*
4. Kartashov E.Yu. *Istoriya otkrytiya i oblasti primeneniya postoyannykh magnitov na osnove RZM. Dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. Seversk; 2006.* Available at: https://studopedia.net/16_33095_istoriya-otkrytiya-i-oblasti-primeneniya-postoyannih-magnitov-na-osnove-rzm.html. Accessed: 10 Apr 2022.
5. Menushenkov V.P. *Novye magnitotvrednye materialy voprosy ispol'zovaniya i oblast' primeneniya. Elektrotehnika. 1999;10: 1-4.*
6. Likhachev V.L. *Spravochnik obmotchika asinkhronnykh elektrodvigateli. Moscow: SOLON-Press; 2004.*
7. Barba P., Savini A., Wiak S. *Field Models in Electricity and Magnetism. Springer Science+Business Media, LCC; 2008.*
8. Buinovskii P.A. *Poluchenie magnitnykh splavov na osnove RZM i magnitov iz nikh. Dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. Tomsk; 2001.* Available at: <https://tekhnosfera.com/view/383853/a#?page=1>. Accessed: 10 Apr 2022.
9. Yushina T.I., Petrov I.M., Grishaev S.I., i dr. *Obzor rynka RZM i tekhnologii pererabotki redkozemel'nogo syr'ya. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). 2015; 1: 577-608.*
10. Nagata Kh., Singaki I. *Sposob pererabotki otkhodov magnitov. Patent RUS na izobretenie №2446497. 27.03.2012.* Available at: <http://allpatents.ru/patent/2446497.html>. Accessed: 10 Apr 2022.
11. Kryukov V.A., Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. *Redkozemel'naya promyshlennost' realizovat' imeyushchiesya vozmozhnosti. Gornaya promyshlennost'. 2020; 5: 68-84.*
12. Perel'man F.M., Zvorykin A.Ya. *Kobal't i nikel'. Moscow: Nauka; 1975.*
13. Min. P.G., Vadeev V.E., Piskoroskii V.P., et al. *Razrabotka tekhnologii vyplavki splavov sistemy RZM-Fe-Co-B s vysokoi chistotoi po primesyam dlya termostabil'nykh magnitov. Trudy VIAM. 2016; 1:3-9.*
14. Rozin P.A., Akimov A.V. *Primenenie magnitotvrednykh materialov v elektricheskikh mashinakh na transportnykh sredstvakh./ Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2014; 2(20):12-18.*
15. Volyanskaya Ya. B., Volyanskiy S.M., Onischenko O.A. *Brushless valve electric drive with minimum equipment excess for autonomous floating vehicle. Electrical Engineering & Electromechanics. 2017; 4:26-33.*
16. Coey J.M.D. *Magnetism and magnetic materials. Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York. 2010; 633.*
17. Berbirenkov I.A., Lokhnin V.V. *Tyagovye dvigateli na postoyannykh magnitakh v elektroprivode avtomobilya./ Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. 2011; 2:10-12.*
18. Veselovskii O.N., Godkin M.N. *Induktsionnye elektrodvigateli s razomknutym magnitoprovodom. Moscow.: Informelektro. 1974.*
19. Mumikov A.D., Sentyurikhin N.I. *Lineinye induktsionnye elektricheskie mashiny. Voprosy nauki i obrazovaniya. 2018; 8:7-9.*
20. Petrikov L.V., Kornachenko G.N. *Asinkhronnye elektrodvigateli: Obmotochnye dannye. Remont. Modernizatsiya. Moscow: Energoatomizdat. 2000.*
21. Bobazhanov M.K., Fayziev M.M., Mustaev R.A., et al. *Applying the non-contact devices for starting a single-phase asynchronous electric motor. Vestnik nauki i obrazovaniya. 2021; 10(113): 31-35.*

22. Kutupov I.I., Sadykov D.A., Timeev A.A. *Elektroprivody s novymi tipami sinkhronnykh reaktivnykh mashin.* Vestnik nauki. 2021; 7(40):88-91.
23. Nguen M.T., Nguen Ch.Kh. *Osnovnye dostoinstva reaktivno-ventil'nykh elektrodvigatelei po sravneniyu s traditsionnymi elektrodvigateleyami.* Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnika nauki. 2014; 8:184-187.
24. Samoseiko V.F., Sharashkin S.V. *Analiz preimushchestv reaktivnykh elektricheskikh mashin pri postroenii grebnoi elektricheskoi ustanovki.* Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2017; 2(17):14-22.
25. Gel'ver F.A. *Konstruktsii reaktivnykh elektricheskikh mashin. Kharakteristiki, dostoinstva i nedostatki.* Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra. 2020; 1(391): 140-150.
26. Kryukov V.A., Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. *Redkozemel'naya promyshlennost' – realizovat' imeyushchiesya vozmozhnosti.* Gornaya promyshlennost'. 2020; 5:68-84.
27. Enrico L. *Electric Machines. Design.* Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition). 2003; 53-68.
28. Pollefiet J. *Electric Machines. Power Electronics.* 2018; 16.1-16.76.
29. Lukaszczyk M. *Improving efficiency in electric motors.* World Pumps. 2014;1: 36-41.
30. Afanas'ev A.Yu., Makarov V.G., Petrov A.A., et al. *Sinkhronnyi elektrodvigatel' s povyshennoi skorost'yu vrashcheniya i sbalansirovannym rotorom.* Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2021; 0: 19-26.
31. Yang Y., Qiang H., Chunyun F., et al. *Efficiency improvement of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles.* Energy. 2020; 213.
32. Shen Y., Wei W. *Study on the flux-weakening capability of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle.* Mechatronics. 2016; 38: 115-120.
33. Zhifu W., Jingzhe Y., Chuang C., et al. *Phase-phase Short Fault Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles.* Energy Procedia. 2016; 8: 915-920.
34. Hamler A., Gorican V., Sustarsic B., et al. *The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2006; 2(304): 816-819.
35. Silva P.C., Matos D.S., Nied A., et al. *Reduction of synchronous reluctance motor currents with minimization of direct and cross saturation magnetic model.* ISA Transactions. 2021; 111: 223-230.
36. Zheming F., Guangwei L., Shi J., et al. *Comparative study on torque characteristics of permanent magnet synchronous reluctance motors with different axial hybrid rotors.* Energy Reports. 2022; 5(8): 1349-1359.
37. Martynov L.N. *Sinkhronnyi gibridnyi elektrodvigatel'. XVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Sovremennye tekhnika i tekhnologii».* 2011: 492-493. (In Russ).
38. Smirnov A.Yu. *Voprosy klassifikatsii elektricheskikh mashin dlya beskontaktnogo sinkhronnogo privoda.* Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva. 2011; 2(87): 162-169.
39. Pyrkin A., Isidori A., Borisov O. *Output Robust Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors.* IFAC-PapersOnLine. 2021;14(54): 197-202.
40. Adly A.A., Huzayyin A. *The impact of demagnetization on the feasibility of permanent magnet synchronous motors in industry applications.* Journal of Advanced Research. 2019; 17: 103-108.
41. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A., Kazakbaev V.M., et al. *Eksperimental'noe sravnenie asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo elektrodvigatelei.* Trudy Mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka». 2015: 19-22.
42. Shreiner R.T., Shilin S.I., Medvedev A.V. *Matematicheskoe modelirovanie sinkhronnykh reaktivnykh dvigatelei v sostave chastotno-reguliruemogo elektroprivoda.* Trudy mezhdunarodnoi semnadsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka. 2018: 58-63.
43. Gennaro M., Jurgens J., Zanon A., et al. *Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications.* Sustainable Energy Technologies and Assessment. 2019; 31: 86-101.
44. Kuznetsov M.I. *Osnovy elektrotekhniki.* Moscow: Vysshaya shkola; 1970.
45. Korshunov A.I. *Elektromagnitnyi moment sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami.* Izvestie vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie. 2015; 1(58): 61-66.
46. Jani N.S., Jamnani G.J. *Performance analysis and comparison of PM-Assisted synchronous reluctance motor with ferrites and Rare-earth magnet materials.* Materialstoday: PROCEEDINGS; 2022.

47. Kuznetsov V., Zykov N., Ivanov M. *Technique of Evolutionary Optimization Permanent-magnet Synchronous Motors. Procedia Computer Science*. 2017; 103: 198-204.

48. Kondrat'ev V.B. *Global'nyi ryok redkozemel'nykh metallov. Gornaya promyshlennost'*. 2017; 4 (134): 48-54.

49. Breton J-M.L. *Ferrite Magnets: Properties and Applications. Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021; 3: 206-216.

50. Safin A.R., Gracheva E.I., Ranjan K.B., Petrov T.I. *Ispol'zovanie ferritovykh magnitov v sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022; 1(53): 47-55. EDN FBPZWP.

Authors of the publication

Andrei A. Maierov – Engineer REC CJSC «INCOMSYSTEM», Kazan, Russia.

Al'fred R. Safin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **16.06.2022 г.**

Отредактировано **20.06.2022 г.**

Принято **27.06.2022 г.**



АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ НИЗКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Романова¹ В.В., Хромов¹ С.В., Батухтин¹ А.Г., Суслов² К.В.

¹Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>, batuhitina_ir@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Резюме: ЦЕЛЬ. Актуальность исследования заключается в комплексном обосновании вопросов, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки в условиях некачественного питающего напряжения. Целью работы является исследование влияния несимметрии питающего напряжения на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Основное внимание уделено динамике изменения срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей различных серий в зависимости от уровня несимметрии напряжений. В качестве объекта исследования выделены асинхронные электродвигатели классической серии (4А, АИ) и модернизированной (5А, АИ'). Как известно, эффективное и надёжное функционирование электродвигателей характеризуется сроком службы изоляции обмоток. Количественная оценка эксплуатационной надёжности АД определяется точностью прогнозирования реального срока их службы. Именно поэтому, становится очевидным, задача адекватной оценки эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих в условиях некачественного питающего напряжения, напрямую зависит от комплекса исследований такого внешнего воздействующего фактора, как несимметрия питающего напряжения. МЕТОДЫ. Достижение задач исследования осуществлено с использованием пакета программ «SimPowerSystems» интерактивной среды программирования Matlab/Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследования выполнены на асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором: классической серии (4А132S4, АИР160S8), модернизированной серии (5А132М6, АИР132S4) с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин. Моделирование физических процессов исследуемых электродвигателей производилось путём изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) от 0 до 5% с шагом в 1%. На основании полученных результатов моделирования построены диаграммы изменения срока службы АД от величины воздействующего фактора. Исследования, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили спрогнозировать изменения срока службы АД, оценить границы допустимых значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, сравнить исследуемые электродвигатели по уровню устойчивости к внешнему воздействующему фактору. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Комплексное решение вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, является одним из приоритетных направлений, главным образом, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой. В процессе исследования выполнена детальная оценка и анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Проведено обсуждение полученных результатов исследования, сформулированы рекомендации по применению асинхронных электродвигателей в условиях наличия несимметрии питающего напряжения.

Ключевые слова: компьютерное моделирование на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink; асинхронный электродвигатель; несимметрия питающего напряжения; эксплуатационная надёжность асинхронного электродвигателя.

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации научного гранта Совета по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» №349 – ГР от 03.02.2022 г.

Для цитирования: Романова В.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 131-141. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.

ANALYSIS OF THE DEGREE OF INFLUENCE OF SUPPLY VOLTAGE ASYMMETRY ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF LOW-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

VV. Romanova¹, SV. Khromov¹, AG. Batukhtin¹, KV. Suslov²

¹Trans-Baikal State University, Chita, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<http://orcid.org/0000-0002-3465-4315>, romanova181@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-1234-9934>, sergeixrom@inbox.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>, batukhtina_ir@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0484-2857>, souslov@istu.edu

Abstract: THE PURPOSE. The relevance of research is that the comprehensive substantiation of issues aimed at ensuring the effective functioning of the electrical complex with the presence of an electric motor load in conditions of low-quality supply voltage. The aim of the work is to study the effect of the asymmetry of the supply voltage on the service life of an asynchronous motor with a short-circuited rotor. The main attention is paid to the dynamics of changes in the service life of low-voltage asynchronous electric motors of various series, depending on the level of voltage asymmetry. Asynchronous electric motors of the classic series (4A, AI) and the upgraded (5A, AI') are identified as the object of research. As is known, the efficient and reliable operation of electric motors is characterized by the service life of the insulation of the windings. A qualitative assessment of the operational reliability of AM is determined by the accuracy of forecasting the real life of their service. That is why, it becomes obvious, the task of an adequate assessment of the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors operating under conditions of low-quality supply voltage directly depends on the complex of studies of such an external influencing factor as the asymmetry of the supply voltage. METHODS. The realization of the research objectives was carried out using the software package "SimPowerSystems" of the interactive programming environment Matlab/Simulink. RESULTS. The research was carried out on asynchronous motors with a short-circuited rotor: classic series (4A132S4, AIR160S8), upgraded series (5A132M6, AIR132S4) with $P_H = 7,5$ kW, rated speed $n = 1500$ rpm. Modeling of the physical processes of the studied electric motors was carried out by changing the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence (K_{2U}) from 0 to 5% in increments of 1%. Based on the obtained simulation results, diagrams of the change in the service life of AM from the magnitude of the influencing factor are constructed. The studies performed using computer modeling based on the "SimPowerSystems" software package of the Matlab/Simulink system made it possible to predict changes in the service life of AM, estimate the limits of permissible values of the voltage asymmetry coefficient in the reverse sequence, compare the studied electric motors by the level of resistance to an external influencing factor. CONCLUSION. A comprehensive solution to issues related to improving the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors is one of the priority areas, mainly aimed at ensuring the effective functioning of the electrical complex with an electric motor load. In the course of the study, a detailed assessment and analysis of the degree of influence of the asymmetry of the supply voltage on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors was carried out. The results of the study were discussed, recommendations for the use of asynchronous electric motors in the presence of asymmetry of the supply voltage were formulated.

Keywords: computer modeling based on the software package "SimPowerSystems" of the Matlab/Simulink system; asynchronous electric motor; operational reliability of an asynchronous electric motor.

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the implementation of the scientific grant of the Council for Scientific and Innovative Activities of the Trans-Baikal State University № 349 – GR dated 03.02.2022.

For citation: Romanova VV., Khromov SV., Batukhtin AG., Suslov KV. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):131-141. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.

Введение

В современных условиях рыночных отношений первоочередным фактором принятия технических решений, направленных на повышение энергоэффективности электротехнических комплексов (ЭТК) предприятий, является минимизация издержек производственного процесса. Эффективное функционирование ЭТК предприятий напрямую зависит от надёжной и стабильной работы отдельных его элементов, связанных общностью технологического процесса. Соответственно, чем больше срок службы электрооборудования ЭТК предприятий, тем меньше эксплуатационные издержки на реновацию оборудования.

В электротехнических комплексах и системах различного назначения широко используется асинхронный электропривод с большим диапазоном номинальных мощностей электродвигателей. Основной парк низковольтных общепромышленных асинхронных электродвигателей (АД) составляют электродвигатели классической серии (4А, АИ) и пришедшие им на замену АД модернизированной серии (5А, АИ') [1].

Следует отметить, что срок службы асинхронных электродвигателей зависит как от условий их эксплуатации, так и от качества проектирования и изготовления. В процессе эксплуатации электродвигателей на их надёжность и долговечность оказывают влияние различные факторы, такие как: условия окружающей среды (температура, влажность, атмосферное давление, пыль, иней и т.д.), режимы работы, воздействующие факторы, техническое обслуживание и ремонт [2-4].

Анализ и исследование эксплуатационной надёжности, выполненный авторами Campbell M. et al. (2018), Palácios R.S. et al. (2020) [5,6] показывает, что высокая аварийность АД обусловлена особенностями их эксплуатации. Доминирующей причиной отказов АД является повреждение изоляции обмоток статора в силу теплового воздействия, вызванного несимметрией питающего напряжения.

Проведенные исследования низковольтных общепромышленных асинхронных электродвигателей в работах авторов Рубцовой Е. И. и др. (2018), Стрижиченко А. В. и др. [7,8], указывают на негативное влияние несимметрии питающего напряжения на их эксплуатацию. В результате воздействия несимметрии напряжения происходит ускоренное старение изоляции обмоток, следствием которого является её постепенное разрушение, и последующее значительное сокращение реального срока службы АД по сравнению с номинальным.

Основной целью работы является исследование влияния несимметрии питающего напряжения на срок службы асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором. Особое внимание уделено динамике изменения срока службы низковольтных асинхронных электродвигателей различных серий в зависимости от уровня несимметрии напряжений.

В рамках данной работы требуется рассмотреть степень влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Достижение задач исследования осуществляется на основе прогнозирования изменения реального срока службы электродвигателя в зависимости от величины воздействующего фактора. Решение подобной задачи позволяет выявить уровень устойчивости АД с короткозамкнутым ротором разных серий к воздействию несимметрии напряжений.

Научная значимость результатов исследования заключается в разработке методологической концепции решения задач количественной оценки надёжности и долговечности АД, при влиянии внешнего воздействующего фактора, путём прогнозирования реального срока их службы. Принципиально отличающаяся от существующих ранее подходов [6-8], взаимосвязью варьирования срока службы АД от воздействия неперемежающейся несимметрии питающего напряжения.

Практическая значимость результатов исследования заключается в обосновании технических решений, ориентированных на повышение энергоэффективности

функционирования электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки, посредством увеличения срока службы АД.

Материалы и методы исследования

Методология исследования надёжности электрических машин достаточно обширна и многообразна, состоит из множества методов и подходов, которые позволяют реализовать поставленные задачи исследования. Среди которых, следует выделить, наиболее эффективный метод математического исследования электрических машин, основанный на использовании интерактивного инструмента моделирования [9]. Позволяющий с минимальной затратой времени и ресурсов обеспечить процедуру автоматизации математических операций: моделирование, симуляцию и анализ поведения АД в разнообразных сценариях его работы, различной сложности.

С применением компьютерного моделирования, на основе пакета программ «*SimPowerSystems*» системы *Matlab/Simulink*, сформирована модель исследования (рис. 1). Построенная модель позволяет имитировать физические процессы, происходящие в АД, исследовать его работоспособность и качество функционирования в различных режимах работы, отслеживать динамику эксплуатационных величин, изменяемых при наличии воздействующего фактора. Варьируя исходные условия моделирования, возможно наблюдать динамику протекания процессов и характер изменения выходных параметров АД разных серий.

Исследования выполнены на асинхронных электродвигателях с короткозамкнутым ротором: классической серии (4А132S4, АИР160S8), модернизированной серии (5А132М6, АИР132S4) с $P_n = 7,5$ кВт, номинальной частотой вращения $n = 1500$ об/мин. [10].

Компьютерная имитация физических процессов, рассматриваемых электродвигателей, выполнена в двух режимах работы АД (х.х., 100% загрузка электродвигателя), путём изменения следующих параметров эксперимента:

- величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) изменялась от 0 до 5% с шагом 1%, оставалась неизменной на протяжении одной итерации моделирования;
- величина загрузки электродвигателя (K_z) составляла 100%, оставалась неизменной во всех итерациях, за исключением опыта холостого хода.

Эксперимент в режиме холостого хода АД выполнен с целью подтверждения корректности параметров разработанной компьютерной модели.

Исследование динамики изменения надёжности асинхронных двигателей, работающих в условиях несимметрии напряжений, проведено с помощью отслеживания изменения величин токов в фазах АД и их взаимосвязи с воздействующим фактором.

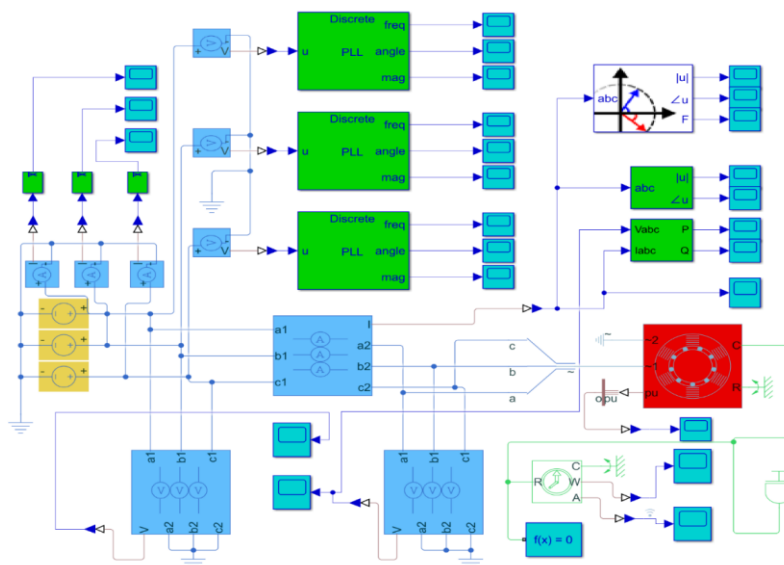


Рис. 1. Схема моделирования, реализованная на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink

Fig. 1. Simulation scheme implemented on the basis of the "SimPowerSystems" software package of the Matlab/Simulink system

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация экспериментальных операций выполнена на основе использования разработанной компьютерной модели, с помощью которой получены результаты исследования изменения величин токов в фазах АД при увеличении величины несимметрии

напряжений, количественно определяющие варьирование срока службы АД, характеризующие уровень эксплуатационной надёжности АД. Необходимо отметить, что при выполнении исследований учтена контрольная величина допустимого тока перегрузки равная 1,1 номинального тока [11].

Интерпретация полученных результатов динамики изменения величин токов в фазах АД наглядно изображена на построенных аналитических зависимостях (рис. 2).

Построенные зависимости (рис.2) характеризуют изменение величин токов в фазах АД, их взаимосвязь с величиной K_{2U} . Значительное снижение надёжности АД происходит при K_{2U} превышающее 3%, при величине фазных токов преимущественно превосходящее 1,1 $I_{ном}$. Значение K_{2U} в момент достижения наибольшего фазного тока электродвигателя контрольной величины равной 1,1 $I_{ном}$ определяется показателем допустимого коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности ($K_{2U_{доп}}$).

Согласно [12], величина $K_{2U_{доп}}$ АД индивидуальна для каждого типоразмера электродвигателя, различается не только по сериям АД, но и внутри серии, определяет оптимальный режим работы электродвигателя. При превышении значения $K_{2U_{доп}}$ происходит нарушение температурного режима работы электродвигателя, вследствие, повышения величин фазных токов АД.

Так, для рассматриваемых АД классической и модернизированной серии, величины $K_{2U_{доп}}$ составили, соответственно, электродвигатели серии 4A132S4 $K_{2U_{доп}} = 1,7\%$, серии 5A132M6 $K_{2U_{доп}} = 1,9\%$, серии АИР160S8 $K_{2U_{доп}} = 1,8\%$, серии АИР132S4 $K_{2U_{доп}} = 2,1\%$. Очевидно, изменение величин токов в фазах АД прямо пропорционально изменению величины K_{2U} , приводящее к сокращению срока службы АД.

Полученные зависимости (рис.2) отображают приближенную оценку изменения эксплуатационной надёжности АД. Для более точного анализа требуется реализация количественного расчёта реального срока службы АД. Наиболее оптимальный метод учёта несимметрии напряжений, при определении срока службы АД разработан [13].

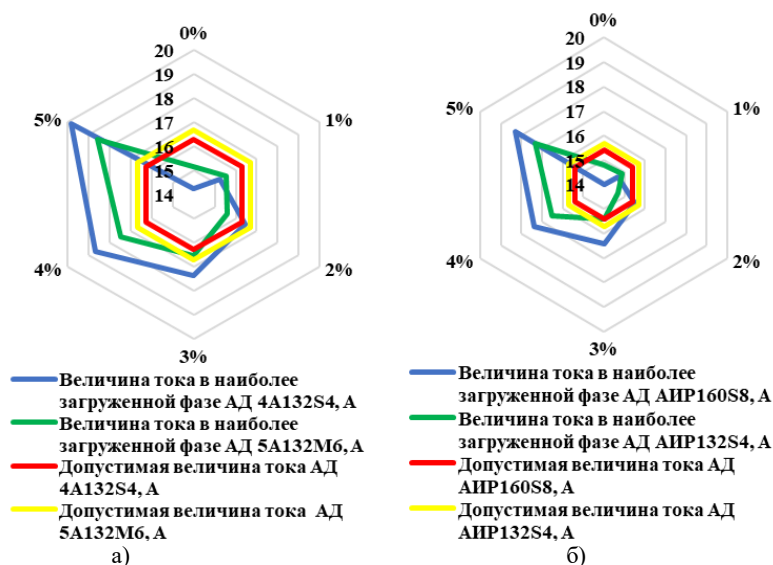


Рис. 2. Зависимость изменения значений токов в фазах АД от величины несимметрии напряжения:
а) АД 4A132S4, 5A132M6
б) АД АИР160S8, АИР132S4

Fig. 2. Dependence of changes in the values of currents in the phases of AM on the value of voltage asymmetry:
a) AM 4A132S4, 5A132M6
b) AM AIR160S8, AIR132S4

Срок службы АД в первую очередь определяется сроком службы изоляции обмоток электродвигателя, поэтому необходимо рассмотреть изменение этого параметра.

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД, вследствие несинусоидальности и несимметрии питающего напряжения, согласно методике расчёта [13]:

$$\Delta z = e^{\left[-280(1,55 \cdot K_{2U}^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \sqrt{v}} \right]} \quad (1)$$

Формула (1) применима в случае перемежающейся несимметрии напряжений характерной для потребителей, питающихся от систем тягового электроснабжения. Для остальных потребителей электроэнергии характер несимметрии напряжений является преимущественно неперемежающийся. Следовательно, необходимо выполнить ряд

расчётов для случая непеременяющейся несимметрии, тем самым уточнив исходную формулу.

Повышение температуры в наиболее загруженной фазе обмотки статора АД, обусловленной несимметрией и несинусоидальностью напряжений, определяется из выражения [13]:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta P_{M1ном} * I_{\pi}^2 * 10^{-4}}{B} k_{иск}^2, \quad (2)$$

где $\Delta P_{M1ном}$ – потери в меди статора электродвигателя при номинальных параметрах, кВт;

I_{π} – кратность пускового тока к номинальному;

B – тепловой параметр АД;

$k_{иск}$ – коэффициент увеличения нагрева АД от искажения напряжения.

Коэффициент увеличения нагрева АД от искажения напряжения определяется по следующей формуле:

$$k_{иск} = \sqrt{K_{внес} * K_{2U}^2 + \sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0,39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2}} \quad (3)$$

где K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;

v – номер высшей гармоники;

U_v – отношение напряжения v -й гармоники к номинальному;

$K_{внес}$ – коэффициент, зависящий от вида несимметрии напряжений, для перемежающейся несимметрии равен 1,55 [13], для непеременяющейся определяется расчётным путём.

Так согласно [13] составляющая выражения (2) равна:

$$\frac{\Delta P_{M1ном} * I_{\pi}^2 * b}{B} = 280 \quad (4)$$

где b – постоянный коэффициент изоляции обмотки статора АД (электроизоляционный лак), определяется на основании правила Монтзингера [14]: $e^{-8b} = 0,5$, откуда $b = 0,0866$.

Тогда выражение (4) представим следующим образом:

$$\frac{\Delta P_{M1ном} * I_{\pi}^2}{B} = 3233,256 \quad (5)$$

Второе слагаемое в (3) $\sum_{v=3}^{\infty} U_v^2 \frac{\sqrt{v+0,39\sqrt{v\pm 1}}}{v^2} = 0$ т.к. рассматриваем случай без несинусоидальности напряжения.

Подставим известные величины в выражения (2), (3), учитывая, что допустимая величина K_{2U} – для непеременяющейся несимметрии равна 2% [13]; превышение температуры в наиболее загруженной фазе обмотки статора АД, в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ ИЕС 60034-1-2014 $\Delta\tau = 10^\circ\text{C}$, упростив выражение получим:

$$K_{внес} = 13,73$$

Продолжительность жизни изоляции обмоток АД, вследствие несимметрии питающего напряжения, будет иметь вид:

$$\Delta z = e^{\left[-280(13,73 * K_{2U}^2)\right]} \quad (6)$$

Показатели надёжности и долговечности для асинхронных двигателей серии 4А, АИ [15]:

– средний срок службы более 15 лет при наработке 40000 часов; – средний срок службы до первого капитального ремонта – 8 лет, при наработке 20000 часов, вероятность безотказной работы более 0,9 за 10000 часов.

Принимаем расчётный срок службы АД $T = 15$ лет, считаем, что сокращением срока службы АД до достижения допустимой величины $K_{2Uдоп}$ можно пренебречь. Соответственно, снижение срока службы АД начинается при достижении допустимой величины $K_{2Uдоп}$.

Тогда,

$$\Delta z = e^{\left[-280\left(13,73 * (K_{2U} - K_{2Uдоп})^2\right)\right]} \quad (7)$$

Подставив значения $K_{2U_{доп}}$ для рассматриваемых электродвигателей и известные показатели надёжности и долговечности АД в формулу (7), получим данные об изменении срока службы, представленные на диаграммах (рис. 3-8).

$$\Delta z = e^{\left[-280 \left(13,73 \cdot (3 - 1,9)^2 \right) \right]}$$

$$z = \Delta z \cdot T = 0,538 \cdot 15 = 8,07 \text{ лет}$$

В качестве примера приведён расчёт для электродвигателя серии 4A132S4, для остальных АД расчёт аналогичен.

Из вышеизложенного следует, что величина $K_{2U_{доп}}$ оказывает значительный вклад при определении прогнозируемого срока службы АД. Так, например, для электродвигателей серий 4A и 5A разница значений $K_{2U_{доп}}$ составляющая 0,4%, приводит к практически двойному отличию снижения срока службы АД. Так при $K_{2U} = 3\%$ снижение срока службы АД составляет, соответственно, $\Delta Z = 6,93$ и $\Delta Z = 3,86$ года.

На основании полученных результатов расчёта построены диаграммы изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений (рис. 3-8), позволяющие визуально оценить изменение срока службы АД от величины влияния воздействующего фактора, провести сравнение АД разных серий по устойчивости воздействию несимметрии напряжений. На диаграммах (рис. 3-6) изображено соотношение взаимосвязанных величин, прогнозируемого срока службы АД и его снижение, вследствие несимметрии напряжений. На диаграммах (рис. 7,8) приведено сравнение прогнозируемых сроков службы АД классической (4A132S4, АИР160S8) и модернизированной (5A132M6, АИР132S4) серий.

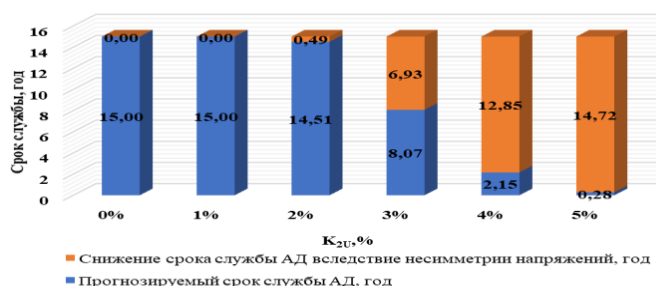


Рис. 3. Диаграмма изменения срока службы АД 4A132S4 от величины несимметрии напряжений

Fig. 3. Diagram of the change in the service life of AM 4A132S4 from the magnitude of the voltage asymmetry

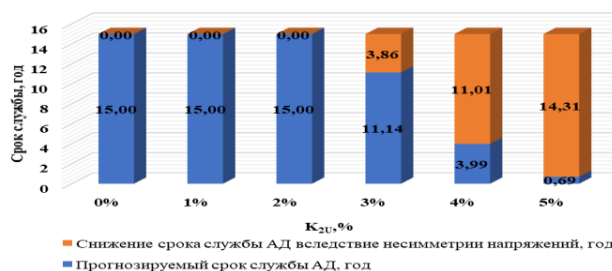


Рис. 4. Диаграмма изменения срока службы АД 5A132M6 от величины несимметрии напряжений

Fig. 4. Diagram of the change in the service life of AM 5A132M6 from the magnitude of the voltage asymmetry

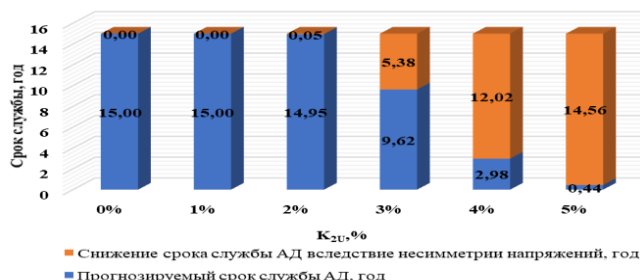


Рис. 5. Диаграмма изменения срока службы АД АИР160S8 от величины несимметрии напряжений

Fig. 5. Diagram of the change in the service life of AM AIR160S8 from the value of the voltage asymmetry

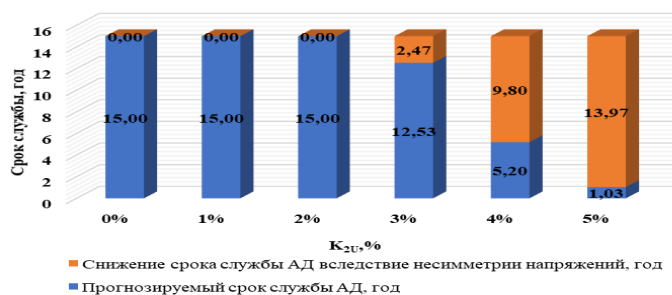


Рис. 6. Диаграмма изменения срока службы АД АИР132S4 от величины несимметрии напряжений

Fig. 6. Diagram of the change in the service life of AM AIR132S4 from the magnitude of the voltage asymmetry

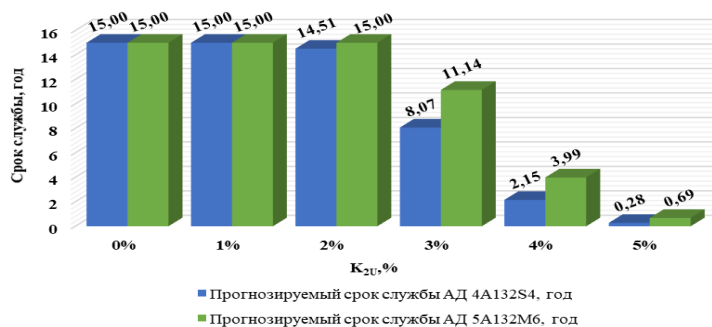


Рис. 7. Диаграмма сравнения изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений

Fig. 7. Comparison diagram of the change in the service life of AM from the magnitude of the voltage asymmetry

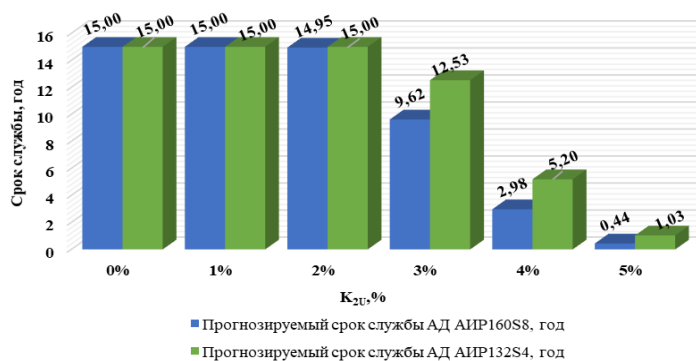


Рис. 8. Диаграмма сравнения изменения срока службы АД от величины несимметрии напряжений

Fig.8. Comparison diagram of the change in the service life of AM from the magnitude of the voltage asymmetry

Диаграммы, изображённые на (рис. 3-6), ярко иллюстрируют прямую зависимость изменения срока службы электродвигателя от величины несимметрии напряжения. Ощутимое снижение срока службы наблюдается после превышения величины $K_{2U} = 2\%$. Так, например, для АД серии 4A132S4 при $K_{2U} = 2\%$ снижение срока службы составило $\Delta Z = 0,49$ года, а при $K_{2U} = 3\%$ снижение срока службы АД составило $\Delta Z = 6,93$ года. Критическое снижение срока службы электродвигателей происходит при $K_{2U} = 4\%$. Так, например, для АД 4A132S4 при $K_{2U} = 4\%$ снижение срока службы составило $\Delta Z = 12,85$ года, для АД 5A132M6 $\Delta Z = 11,01$ года, для АД АИР160S8 $\Delta Z = 12,02$ года, для АД АИР132S4 $\Delta Z = 9,8$ года.

Важно заметить, что значительное снижение эксплуатационной надёжности АД наблюдается при достижении $K_{2U} = 3\%$. В связи с этим, во избежание превышения допустимых температурных режимов работы АД и последующего нарушения целостности изоляции обмоток, необходим контроль и поддержание величины питающего напряжения в определённом диапазоне, путём его корректировки.

Построенные диаграммы (рис.7-8) показывают изменение прогнозируемого срока службы АД от величины несимметрии напряжений. Экспериментальное исследование показало, АД модернизированной серии, в большей степени, устойчивы к воздействию несимметрии напряжений, чем АД классической серии. Так, для АД классической серии прогнозируемый срок службы при $K_{2U} = 3\%$ составил $z = 8,07$ и $z = 9,62$ года

соответственно. Для модернизированной серии АД, при $K_{2U} = 3\%$, величины прогнозируемого срока службы составили $z = 11,14$ и $z = 12,53$ года.

Анализ, формализация результатов исследования, реализованных с использованием компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили аргументировать следующие выводы:

1) комплекс исследований оценки эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, работающих в условиях некачественного питающего напряжения, выполнен путём прогнозирования реального срока их службы. Данный аспект исследования является принципиальным методологическим подходом решения задач количественной оценки надёжности и долговечности АД, при влиянии внешнего воздействующего фактора. Следует отметить, что основное внимание уделено динамике изменения срока службы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором различных серий в зависимости от уровня неперемежающейся несимметрии питающего напряжения;

2) необходимо подчеркнуть, что воздействие несимметрии питающего напряжения значительно снижает надёжность и уменьшает срок службы асинхронных электродвигателей;

3) полученные результаты исследования демонстрируют значительное сокращение срока службы АД при воздействии несимметрии питающего напряжения. Так, например, АД серии 4A132S4 при $K_{2U} = 4\%$ снижение срока службы составило $\Delta Z = 12,85$ года, для 5A132M6 $\Delta Z = 11,01$ года, а для АИР160S8 $\Delta Z = 12,02$ года, для АИР132S4 составило $\Delta Z = 9,8$ года, при заявленном заводом-изготовителем среднем сроке службы 15 лет;

4) степень влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей зависит от уровня их устойчивости, который характеризуется допустимым значением $K_{2U\text{доп}}$. Экспериментальные исследования показали, что допустимое значение $K_{2U\text{доп}}$ АД индивидуально для каждого типоразмера электродвигателя, различается не только по сериям АД, но и внутри серии;

5) сравнение уровней устойчивости асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором классической и модернизированной серий показало, что электродвигатели модернизированной серии более устойчивы к воздействию несимметрии напряжений;

6) для обеспечения длительной безаварийной эксплуатации АД в ЭТК предприятий необходим контроль и поддержание величины K_{2U} в диапазоне от 0% до 2%. В случае превышения величины K_{2U} более 2% в сети внешнего электроснабжения ЭТК требуется предусмотреть демпферы по нейтрализации негативного влияния воздействующего фактора;

7) практическое применение результатов исследования заключается в следующем:

- предложенный подход исследования возможно использовать на стадии предпроектной оценки оптимального состава электрооборудования ЭТК предприятий. При этом следует отметить, что подобный подход требует предварительных экспериментальных исследований уровней искажения питающего напряжения;

- количественный анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей имеет особое значение при реализации и внедрении технических мероприятий, ориентированных на повышение их надёжности и долговечности;

- повышение энергоэффективности и улучшение технико-экономических показателей работы электротехнического комплекса с наличием электродвигательной нагрузки достигается увеличением срока службы электрооборудования, снижением эксплуатационных затрат на планово-предупредительные ремонты электрооборудования.

Заключение

Комплексное решение вопросов, связанных с повышением эксплуатационной надёжности низковольтных асинхронных электродвигателей, является одним из приоритетных направлений, главным образом, направленных на обеспечение эффективного функционирования электротехнического комплекса с электродвигательной нагрузкой. Исследования, выполненные с применением компьютерного моделирования на основе пакета программ «SimPowerSystems» системы Matlab/Simulink, позволили спрогнозировать изменения срока службы АД, оценить границы допустимых значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, сравнить исследуемые электродвигатели по уровню устойчивости к внешнему воздействующему фактору. В процессе исследования выполнена детальная оценка, формализация и анализ

степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. Сформулированы рекомендации по применению асинхронных электродвигателей в условиях наличия несимметрии питающего напряжения.

Литература

1. Кравчик А.Э., Крутиков О.В., Лазарев М.В., и др. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей на предприятиях группы компаний «ВЭМЗ» // Электротехника. 2005. № 5. С. 3-8.
2. Полевой В.Е., Ежова М.С. Влияние эксплуатационных факторов на показатели надёжности асинхронных двигателей // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2013. Вып. 9. Ч.1. С. 143 – 147.
3. Prasad K. K., Myneni H., Kumar G. S. Power Quality Improvement and PV Power Injection by DSTATCOM With Variable DC Link Voltage Control from RSC-MLC // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2019. V. 10. № 2. pp. 876-885.
4. Ratering-Schnitzler B., Harke R., Schroeder M, et al. Voltage quality and reliability from electrical energy-storage systems // Journal of Power Sources. 1997. V. 67. № 1-2. pp. 173-177.
5. Campbell M., Arce G. Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. V. 54. Issue.1. pp. 905-911.
6. Palácios R.S., da Silva I.N., Godoy W.F., et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults // Soft Computing. 2020. V. 24. pp. 1693-16946.
7. Рубцова Е. И., Афанасьев М. А., Урядов Н. В. Динамика старения изоляции электрических машин // Сборник статей XIII Международного научно-практического конкурса. Пенза: Изд-во МЦНС «Наука и Просвещение». 2018. С. 55-58.
8. Стрижиченко А. В., Пахомова А. А. Оценка влияния качества электроэнергии на сокращение срока службы электродвигателей собственных нужд тепловых электростанций // Аллея науки. 2020. Т. 2. № 6(45). С. 46-49.
9. Kholiddinov I. Kh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev M.E., et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab) // The American Journal of Engineering And Techonology. 2020. V.2. № 10. pp. 33-37.
10. Технические характеристики асинхронных электродвигателей серии. Номинальная частота вращения 1500 об/мин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55>. Ссылка активна на 27 мая 2022.
11. Popa G., Dinis C. Complex Electronic Protection for Low-voltage Three-phase Induction Motors. // WSEAS Transactions on Electronics. 2020. V. 11. pp. 11-17.
12. Романова В.В., Хромов С.В. Эксплуатационная надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей в условиях несимметрии напряжений // Проблемы энерго - и ресурсосбережения. Ташкент: Изд-во ТашГТУ. 2019. № 4. С. 136-148.
13. Церазов А. Л. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1963. 27 с.
14. Koeva D.Y., Rachev S.R., Dimitrov L. D. Analysis of the power transformer operation supplying a combined non-linear load in the public sector – part ii: influence of the current harmonics // Industry 4.0. 2020. Vol.5. Issue.1. pp. 37-40.
15. Zhao K., Cheng L., Zhang C., et al. Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations // IEEE Electrical Power and Energy Conference. 2017. V. 1. № 6. pp. 1-6.

Авторы публикации

Романова Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. E-mail: romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Энергетики» Забайкальского государственного университета. E-mail: sergeixrom@inbox.ru.

Батухтин Андрей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, декан энергетического факультета Забайкальского государственного университета. E-mail: batuhtina_ir@mail.ru.

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжения и электротехники» Иркутского национального исследовательского

технического университета. E-mail: suslov@istu.edu.

References

1. Kravchik AE, Krutikov OV, Lazarev MV, et al. Perspektivy razrabotki i proizvodstva standartnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyi na predpriyatiyakh gruppy kompanii VEMZ. *Elektrotehnika*. 2005; 5:3-8.
2. Polevoi VE, Ezhova MS. Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na pokazateli nadezhnosti asinkhronnykh dvigatelei. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. Tula: Izd-vo TulGU. 2013; 9(1):143-147.
3. Prasad KK, Myneni H, Kumar GS. Power Quality Improvement and PV Power Injection by DSTATCOM With Variable DC Link Voltage Control from RSC-MLC. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019; 10(2):876-885.
4. Ratering-Schnitzler B, Harke R, Schroeder M, et al. Voltage quality and reliability from electrical energy-storage systems. *Journal of Power Sources*. 1997; 67(1,2):173-177.
5. Campbell M, Arce G. Effect of motor voltage unbalance on motor vibration: test and evaluation. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018; 54(1):905-911.
6. Palácios RS, da Silva IN, Godoy WF, et al. Voltage unbalance evaluation in the intelligent recognition of induction motor rotor faults. *Soft Computing*. 2020; 24:16935-16946.
7. Rubtsova EI, Afanas'ev MA, Uryadov NV. Dinamika stareniya izolyatsii elektricheskikh mashin. *Sbornik statei XIII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo konkursa*. Penza: Izd-vo MTsNS «Nauka i Prosveshchenie». 2018; 55-58.
8. Strizhichenko AV, Pakhomova AA. Otsenka vliyaniya kachestva elektroenergii na sokrashcheniye sroka sluzhby elektrodvigatelyi sobstvennykh nuzhd teplovykh elektrostantsii. *Alleya nauki*. 2020; 2(6):46-49. (In Russ).
9. Kholiddinov IKh, Musinova Gulasalkhon, Yulchiev ME, et al. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering And Techonology*. 2020; 2(10):33-37.
10. *Tekhnicheskie kharakteristiki asinkhronnykh elektrodvigatelyi serii. Nominal'naya chastota vrashcheniya 1500 ob/min* [Electronic resource]. URL: [http:// www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55](http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-55). Accessed: 27 May 2022.
11. Popa G., Dinis C. Complex Electronic Protection for Low-voltage Three-phase Induction Motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020; 11:11-17.
12. Romanova VV, Khromov SV. Ekspluatatsionnaya nadezhnost' nizkovol'tnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyi v usloviyakh nesimmetrii napryazhenii. *Problemy energo - i resursosberezheniya. Tashkent: Izd-vo TashGTU*. 2019; 4:136-148.
13. Tserazov AL. *Issledovanie vliyaniya nesimmetrii i nesinusoidal'nosti napryazheniya na rabotu trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom*. Moscow. 1963.
14. Koeva DY, Rachev SR, Dimitrov LD. Analysis of the power transformer operation supplying a combined non-linear load in the public sector – part ii: influence of the current harmonics. *Industry 4.0*. 2020; 5(1):37-40.
15. Zhao K, Cheng L, Zhang C, et al. Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations // *IEEE Electrical Power and Energy Conference*. 2017; 1(6):1-6.

Authors of the publication

Victoria V. Romanova – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

Sergey V. Khromov – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

Andrey G. Batukhtin – Trans-Baikal State University, Chita, Russia.

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

Получено

18.06.2022 г.

Отредактировано

26.06.2022 г.

Принято

02.07.2022 г.

**РАСЧЕТ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА К НОРМАТИВНЫМ
ЗНАЧЕНИЯМ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ
Г. МОСКВЫ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Солуянов^{1,2,3} Ю.И., Федотов^{1,2} А.И., Ахметшин^{1,2*} А.Р.

¹Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³ОАО «Татэлектромонтаж», Казань, Россия

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

Резюме. ЦЕЛЬ. Снижение стоимости внешних электрических сетей в жилищном строительстве многоквартирных жилых домов (МКД) г. Москвы и Московской области посредством обоснования величины поправочного коэффициента к нормативным значениям удельных электрических нагрузок и разработать соответствующие изменения к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». МЕТОДЫ. Использованы экспериментально полученные от интеллектуальных приборов учета электроэнергии получасовые графики электрических нагрузок, установленных непосредственно у исследуемых объектов. Для обработки результатов измерений применены статистические методы обработки большого массива данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье обоснована актуальность темы, проведен анализ электрических нагрузок жилых домов г. Москвы и Московской области, подтвердивший необходимость разработки поправочного коэффициента, величина которого характеризует разность реальных и расчетных значений. Приняты к статистической обработке результаты измерений расхода электроэнергии в квартирах за сутки с максимальным суммарным электропотреблением МКД. На основании выполненных расчетов подготовлены изменения в раздел 7 СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», в том числе пункт 7.1.10. изложен в новой редакции, и сформирована таблица 7.5а. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основании анализа рассчитанных удельных электрических нагрузок многоквартирных домов г. Москвы и Московской области обосновано с учетом запаса значение поправочного коэффициента для г. Москвы и Московской области применительно к МКД типовых проектов, которое составило 0,81. Применение поправочного коэффициента для определения расчетной нагрузки жилого дома позволит уменьшить затраты при строительстве внешних электрических сетей жилых домов с одновременным повышением КПД силовых трансформаторов в г. Москве и Московской области.

Ключевые слова: графики электрических нагрузок; удельные расчетные электрические нагрузки; запертая электрическая мощность; поправочный коэффициент, проектирование жилых комплексов.

Для цитирования: Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. Расчет поправочного коэффициента к нормативным значениям удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов г. Москвы и Московской области // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 142-153. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153.

**CALCULATION OF THE CORRECTION FACTOR TO THE NORMATIVE
VALUES OF SPECIFIC ELECTRIC LOADS OF MULTIPLE RESIDENTIAL
BUILDINGS MOSCOW AND MOSCOW REGION**

YuI. Soluyanov^{1,2,3}, AI. Fedotov^{1,2}, AR. Akhmetshin^{1,2*}

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia

³JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* Reducing the cost of external electrical networks in the housing construction of multi-apartment residential buildings (MKD) in Moscow and the Moscow Region by substantiating the value of the correction factor to the standard values of specific electrical loads and developing appropriate amendments to SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Rules for design and installation. METHODS. The half-hour graphs of electrical loads installed directly at the objects under study were experimentally obtained from intelligent electricity metering devices. To process the measurement results, statistical methods for processing a large amount of data were applied. RESULTS. The article substantiates the relevance of the topic, analyzes the electrical loads of residential buildings in Moscow and the Moscow region, which confirmed the need to develop a correction factor, the value of which characterizes the difference between real and calculated values. Accepted for statistical processing are the results of measurements of electricity consumption in apartments per day with the maximum total electricity consumption of MKD. Based on the calculations performed, amendments were prepared to section 7 of SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and installation rules", including clause 7.1.10. is set out in a new edition, and table 7.5a is formed. CONCLUSION. Based on the analysis of the calculated specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region, the value of the correction factor for the city of Moscow and the Moscow region in relation to the MKD of standard projects, which amounted to 0.81, was justified, taking into account the margin. The use of a correction factor to determine the design load of a residential building will reduce costs in the construction of external electrical networks of residential buildings with a simultaneous increase in the efficiency of power transformers in Moscow and the Moscow Region.

Keywords: *diagrams of electrical loads; specific design electrical loads; locked electrical power; correction factor, design of residential complexes.*

For citation: Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR Calculation of the correction factor to the normative values of specific electric loads of multiple residential buildings Moscow and Moscow region. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):142-153. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-142-153.

Введение

Для расчета электрических нагрузок жилых и общественных зданий используют свод правил (СП)¹ [1], включенный в обязательный перечень² национальных стандартов обязательных к применению, утверждённый Правительством Российской Федерации (РФ).

Важным направлением деятельности в области энерго- и ресурсосбережения является работа по совершенствованию нормативной базы, что также соответствует поручению Президента РФ³.

Совершенствование нормативов удельных электрических нагрузок жилых и общественных зданий способствует:

- Снижению стоимости квадратного метра жилья, высвобождению придомовой территории для социальных и бытовых нужд⁴.
- Обеспечению потребности внутреннего рынка в надежном, качественном и экономически обоснованном снабжении энергией⁵.
- Совершенствованию нормативно-правовой базы, совершенствованию системы планирования в электроэнергетике, снижению потерь электрической энергии до 2050 г. до уровня 7-7,5%⁶.

¹ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

² Постановление Правительства Российской Федерации от 28.05.2021 № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона».

³ Поручение Президента РФ от 25 мая 2020 г. № Пр-843 «О предложениях по оптимизации нормативных требований».

⁴ Постановление Правительства РФ от 30.12.2017 N 1710 (ред. от 20.06.2022) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации».

⁵ Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 N 321 (ред. от 21.03.2022) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики».

- Повышению качества предоставления государственных услуг для бизнеса, в том числе подключение к электросетям⁷.

- Снижению избытка установленной мощности электростанций ЕЭС РФ⁸.

Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных домов (МКД) г. Москвы и Московской области (МО), показал необходимость в снижении нормативных значений [2, 3] путем введения обоснованной величины поправочного коэффициента (ПК). Для чего необходимо разработать изменения в раздел 7 (СП)⁹, в том числе пункт 7.1.10. изложить в новой редакции и сформировать таблицу 7.5а.

Расчет ПК выполнен статистическими методами [4] с использованием данных, полученных в процессе мониторинга электропотребления и электрической нагрузки жилых домов в течение трех лет. Мониторинг осуществлялся с помощью интеллектуальных приборов учета электроэнергии (ИПУЭЭ), обладающих на сегодняшний день широкими возможностями [5], решающими задачи: обеспечение качества электроэнергии [6], прогнозирование электрической нагрузки [7], снижение коммерческих и технических потерь электроэнергии [8-10].

Применение ПК для определения расчетной нагрузки жилых домов г. Москвы и МО позволит уменьшить затраты при строительстве внешних электрических сетей и одновременно повысить КПД силовых трансформаторов (СТ) [11, 12].

Прогноз основных направлений развития электроэнергетики^{10,11} предполагает, что в г. Москве будет введено 58,2 млн. м² жилья из них 15,8 млн. м² на территории Троицкого и Новомосковского административных округов, в свою очередь в МО - 18,4 млн. м², для чего ориентировочно понадобятся 1382 МВт и 437 МВт электрической мощности соответственно.

При проектировании внешних электрических сетей используют нормативные удельные значения нагрузок МКД, тем не менее практика эксплуатации городских систем электроснабжения показала, фактические нагрузки значительно ниже расчетных¹ [13]. В результате построенные кабельные сети и трансформаторные подстанции (ТП) 10/0,4 кВ фактически оказываются недогруженными. Так в часы максимума нагрузок порядка 40 % ТП в г. Москве и МО загружены менее 30 %. В большинстве случаев догрузить подстанции не представляется возможным: для ТП 10/0,4 кВ в застроенном микрорайоне отсутствуют какие-либо значимые новые потребители электроэнергии, а для подстанций 110/10 кВ по документам мощность используется полностью, образуя «запертую электрическую мощность» [14].

Для решения проблемы «запертой электрической мощности» и снижения стоимости строительства одновременно с уменьшением потерь в электрических сетях, вызванных недогрузкой силовых трансформаторов, требуется актуализация удельных расчетных электрических нагрузок, основанных на фактических замерах [15]. Проблема, связанная с разницей между реальными и расчетными значениями электрической нагрузки, освещалась неоднократно в зарубежной и отечественной литературе [16-19].

Решению задачи разработки ПК благоприятствует цифровая трансформация в энергетике [20], а именно массовое внедрение ИПУЭЭ в соответствии с Федеральным законом (ФЗ)¹¹. В рамках ФЗ¹² введено понятие «интеллектуальной системы учета электрической энергии (мощности)», и регламентируются правила организации учета электроэнергии на розничных рынках в целях оказания коммунальных услуг по электроснабжению. Для унифицирования разработан минимальный набор функций ИПУЭЭ, утвержденный Постановлением Правительства РФ¹³.

В данном исследовании все данные от ИПУЭЭ были обработаны с помощью среды вычислений R в программе RStudio¹⁴, которое широко используется как

⁶ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года.

⁷ Национальный рейтинг состояния инвестиционного климата в субъектах Российской Федерации.

⁸ Распоряжение Правительства РФ от 30.09.2018 N 2101-р (ред. от 13.04.2022) «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года».

⁹ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

¹⁰ Распоряжение Мэра Москвы от 25 мая 2020 года № 292-РМ «Об утверждении Схемы и программы перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2020–2025 годы».

¹¹ Постановление Губернатора Московской области от 30 апреля 2021 года № 115-ПГ «Об утверждении схемы и программы перспективного развития электроэнергетики Московской области на период 2022-2026 годов».

¹² Федеральный закон от 27.12.2018 N 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации».

¹³ Постановление Правительства РФ от 19 июня 2020 г. N 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)».

¹⁴ <https://www.rstudio.com/> - сайт компании разработчика.

статистическое программное обеспечение для анализа данных и фактически является стандартом для статистических программ. В R используется интерфейс командной строки с доступом к графическим интерфейсам пользователя, таких как пакет *RCommander*, *RKward*, *RStudio*, *Weka*, *Rapid Miner*, *KNIME*, а также средства интеграции в офисные пакеты.

В основу расчета минимального объема репрезентативной выборки положено утверждение Центральных предельных теорем в теории вероятностей, утверждающих, что сумма достаточно большого количества слабо зависимых случайных величин, имеющих примерно одинаковые масштабы (ни одно из слагаемых не доминирует, не вносит в сумму определяющего вклада), имеет распределение, близкое к нормальному [21].

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые для вычисления удельных расчетных электрических нагрузок (УРЭН) жилых зданий были использованы ИПУЭЭ с последующей статистической обработкой большого массива данных. Для повышения точности вычисления УРЭН из расчетов были исключены неиспользуемые квартиры.

Практическая новизна исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы для проектирования жилых зданий г. Москвы и МО, способствуя снижению стоимости электрических сетей микрорайонов и уменьшению потерь электроэнергии за счет эффективной загрузки СТ.

Экспериментальные исследования электрических нагрузок

Для определения значений УРЭН МКД для г. Москвы и МО проанализирована выборочная совокупность из 106 домов. Выборочная совокупность сформирована произвольным образом. Фактические данные электрических нагрузок МКД, предоставленные ПАО «ГК «Самолет» и *Capital Group*, имеют этажность большинства объектов от 15 до 17 этажей, (рис. 1).

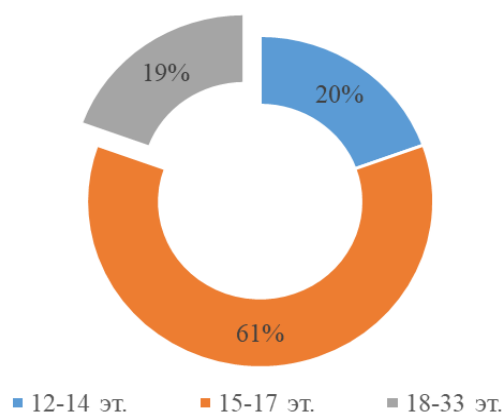


Рис. 1. Этажность МКД.

Fig. 1. Floors of residential buildings.

Исследование выборок проводилось по параметру месячного электропотребления квартир МКД в течение периода наблюдения. Период наблюдения у МКД не одинаков и охватил в общей сложности почти 3 года. Для каждого МКД выборочной совокупности в течение всего времени наблюдения был определен месяц с наибольшим потреблением. Поквартирные данные за этот месяц использовались в дальнейшей статистической обработке выборки МКД для выявления неэксплуатируемых квартир.

Статистическая обработка данных по значениям электропотребления МКД

Конечной целью исследования является разработка и обоснование ПК, с этой целью проведена статистическая оценка полученной выборки МКД. Основой для этого служит величина электропотребления квартир МКД за периоды наибольших нагрузок.

На рисунке 2 представлена гистограмма распределения месячного электропотребления квартир. Из чего можно сделать вывод, что электропотребление большей частью квартир варьируется от 100-200 кВт·ч в месяц.

Для определения структуры электропотребления выборка значений месячного электропотребления квартир МКД г. Москвы и МО была отсортирована в порядке его уменьшения. В качестве примера для одного из 106 МКД на рисунке 3 приведена диаграмма распределения электропотребления в порядке его уменьшения.

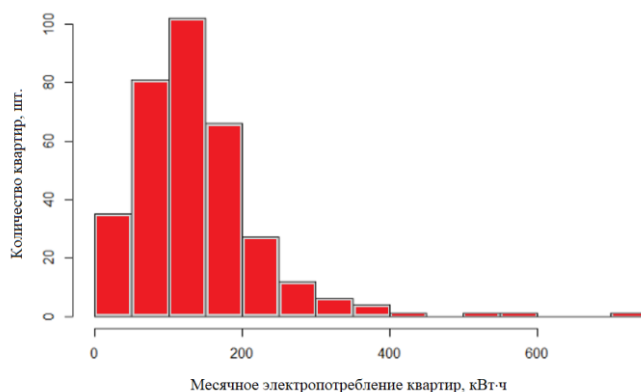


Рис. 2. Гистограмма распределения месячного электропотребления квартир.

Fig. 2. Histogram of distribution of monthly electricity consumption of apartments.

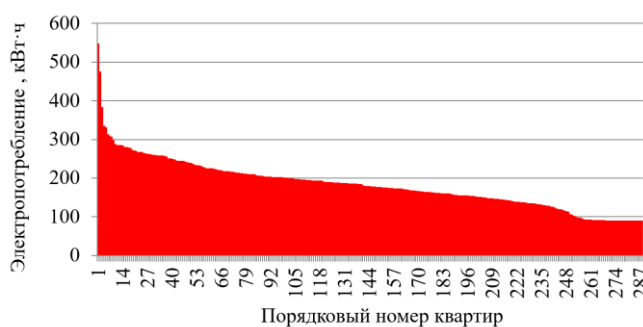


Рис. 3. Диаграмма распределения месячного электропотребления квартир.

Fig. 2. Distribution diagram of monthly electricity consumption of apartments.

Для одного из 106 МКД на рисунке 4 приведена диаграмма, отражающая суммарное электропотребление квартир нарастающим итогом в процентах от электропотребления дома.



Рис. 4. Диаграмма суммарного электропотребления квартир нарастающим итогом в процентах от электропотребления дома.

Fig. 4. Diagram of the total electricity consumption of apartments on a cumulative basis as a percentage of the electricity consumption of the house.

На рисунке 5 показано суммарное электропотребление квартир этого же дома в зависимости от процента от общего числа квартир в нем.

Рисунки 4 и 5 демонстрируют, что 90 % электроэнергии приходится на 82 % квартир дома. Таким образом, 18 % квартир с наименьшим потреблением можно не учитывать при определении удельной мощности квартир этого дома.

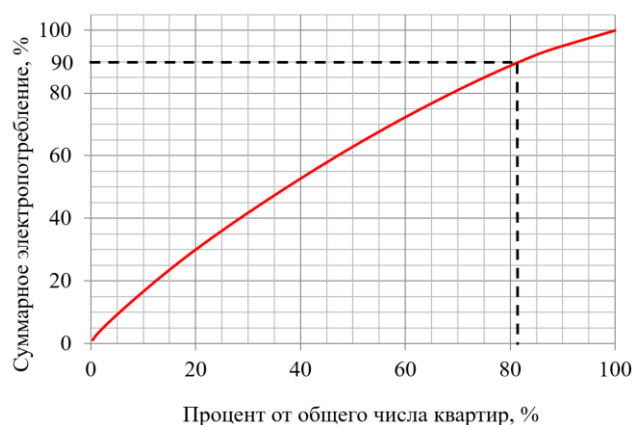


Рис. 5. Суммарное электропотребление квартир дома в зависимости от доли квартир. Fig. 5. Total electricity consumption of apartments in the house depending on the share of apartments.

На рисунок 6 продемонстрировано количество квартир по каждому МКД, обеспечивающих суммарное электропотребление на уровне 90 % для всех МКД исследуемой выборки. Эти значения были использованы в дальнейшем для расчета удельных электрических нагрузок МКД г. Москвы и МО.

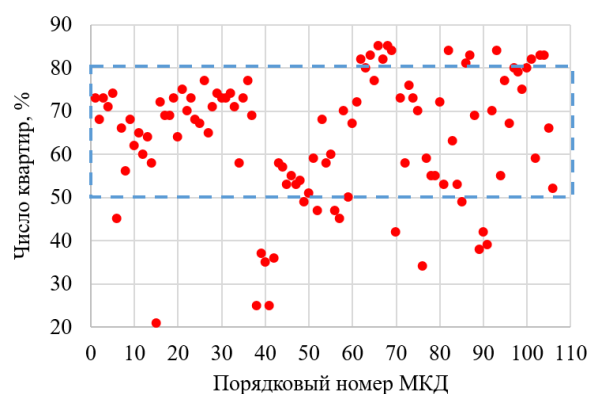


Рис. 6. Процент от общего числа квартир, обеспечивающих суммарное электропотребление на уровне 90 % для всех МКД исследуемой выборки. Fig. 6. The percentage of the total number of apartments that provide a total electricity consumption of 90% for all residential buildings in the study sample.

По рисунку 6 можно определить процент квартир, обеспечивающих 90 % уровень электропотребления МКД. Например, видно, что в большинстве случаев 90 % электропотребления обеспечивают 50-80 % квартир дома.

Формирование выборок квартир для МКД проводилось с целью определения процента квартир с наименьшим потреблением для последующего исключения его из совокупности квартир дома при расчете ПК для определения УРЭН МКД г. Москвы и МО.

Базовые статистические показатели выборочной совокупности максимальной удельной получасовой нагрузки МКД г. Москвы и МО, в отношении которых производилась статистическая обработка, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Базовые статистические показатели выборки							
Нв, шт	Эср, кВт/кв	S, кВт/кв	Ме, кВт/кв	Эмин, кВт/кв	Эмакс, кВт/кв	Q25%, кВт/кв	Q75%, кВт/кв
106	0,48	0,27	0,37	0,09	1,10	0,29	0,70

где

Нв – размер выборки (число домов), шт;

Эср – среднее значение удельной получасовой мощности выборки, кВт/кв;

S – среднеквадратичное отклонение, кВт/кв;

Ме – медиана выборки, кВт/кв;

Эмин – минимальное значение удельной получасовой мощности выборки, кВт/кв;

Эмакс – максимальное значение удельной получасовой мощности выборки, кВт/кв;
Q25%, кВт/кв – первый квартиль выборки;
Q75%, кВт/кв – третий квартиль выборки.

Определение минимального объема репрезентативной выборки проводилось при максимальной ошибке репрезентативности ± 5 и ± 10 % от среднего и доверительной вероятности 90 %. Результаты расчета минимального объема репрезентативной выборки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Минимальный объем репрезентативной выборки для МКД г. Москвы и Московской области

Максимальная ошибка репрезентативности	Объем генеральной совокупности, шт.	Объем выборки, шт.	Минимальный объем репрезентативной выборки, шт
± 5 %	88109	106	343
± 10 %	88109	106	87

Данные таблицы 2 характеризуют зависимость минимального объема репрезентативной выборки МКД, который необходимо взять для характеристики генеральной совокупности МКД г. Москвы и Московской области при максимальной ошибке репрезентативности ± 5 и ± 10 % от среднего и величине доверительной вероятности 90 %.

Из расчетов видно, что чем меньше допускаемая ошибка репрезентативности, тем больше данных нужно взять для анализа.

Результаты расчета ПК для определения расчетной электрической нагрузки МКД г. Москвы и МО.

Для расчета ПК ($k_{п.к.}$), предназначенного для определения расчетной нагрузки жилых домов, были определены удельные электрические нагрузки МКД г. Москвы и МО за сутки с наибольшим потреблением. Расчет удельных электрических нагрузок электроприемников квартир производился на основании данных по фактическим нагрузкам МКД г. Москвы и МО.

В качестве исходной информации были получены значения максимальной получасовой нагрузки МКД за зимние месяцы 2019-2020 гг. Эти данные были использованы при расчете ПК ($k_{п.к.}$) г. Москвы и МО.

На рисунке 7 приведено значение ПК ($k_{п.к.}$) для г. Москвы и МО, найденного как отношение максимальной удельной получасовой нагрузки электроприемников квартир выборки МКД к удельной расчетной электрической нагрузке электроприемников квартир жилых зданий, определенной путем интерполяции по таблице 7.1 (СП)¹⁵.

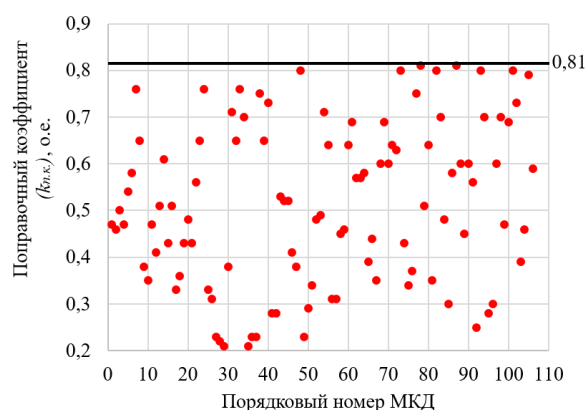


Рис. 7. Диаграмма распределения поправочного коэффициента $k_{п.к.}$ для г. Москвы и Московской области

Fig. 7. Distribution diagram of the correction factor $k_{p.k}$ for Moscow and the Moscow region

По диаграмме на рисунке 7 видно, что ПК ($k_{п.к.}$) для г. Москвы и МО лежит в диапазоне от 0,2 до 0,80, а максимальное его значение равно 0,81. Низкие значения ПК можно объяснить неполной заселенностью домов. Приведенные выше оценки электропотребления основаны на использовании относительных значений. При этом если в целом дом имеет незначительное количество постоянно эксплуатируемых квартир, то

¹⁵ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

90% общего электропотребления будет обеспечиваться значительным количеством квартир. В то же время их абсолютная суммарная нагрузка будет невысокой, с чем и связаны низкие значения ПК.

В соответствии с выполненными расчетами подготовлены изменения № 4 к (СП)¹⁶, которые утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ № 919/пр от 30.12.20 г. и включали в себя следующие:

Пункт 7.1.10. Изложить в новой редакции:

«7.1.10 Расчетная нагрузка жилого дома (квартир и силовых электроприемников), $P_{р.ж.д.}$ кВт, определяется по формуле:

$$P_{р.ж.д.} = k_{п.к.} \cdot P_{кв} + 0,9P_c, \quad (6)$$

где $P_{кв}$ - расчетная нагрузка электроприемников квартир, кВт;

P_c - расчетная нагрузка силовых электроприемников, кВт;

$k_{п.к.}$ - поправочный коэффициент для определения расчетной нагрузки жилого дома, принимается по таблице 7.5а».

Таблица 7.5а

Поправочный коэффициент для определения расчетной нагрузки жилого дома для различных регионов Российской Федерации

№	Регион Российской Федерации	Значение $k_{п.к.}$
1.	Московская область, г. Москва.	0,81
Примечание: 1. При наличии данных о фактических нагрузках, документированных и утвержденных в установленном порядке, поправочный коэффициент для вычисления расчетной нагрузки жилого дома $k_{п.к.}$ может корректироваться для конкретного применения с учетом региональных условий.		

Обсуждение

Проанализирована выборочная совокупность из 106 домов по параметру электропотребления квартир МКД за месяц с наибольшей нагрузкой.

Для характеристики структуры электропотребления выборки МКД была определена зависимость суммарного электропотребления дома от доли квартир в нем. В соответствии с этой зависимостью для каждого дома был определен процент квартир с наименьшим потреблением и исключен из совокупности квартир дома при расчете ПК для определения расчетной нагрузки жилых домов г. Москвы и МО.

Электропотребление квартир жилых домов служит весомым индикатором их заселенности, что следует использовать при оценке величины их максимальной удельной мощности. Поскольку исходная информация по потребляемой мощности предоставляется целиком на дом, её деление на общее число квартир в доме дает заниженный результат величины удельной нагрузки квартиры вследствие не учета в этом случае тех квартир, которые либо не заселены, либо используются кратковременно. Такой прием ужесточает оценку удельной мощности квартир при сравнении с нормативными значениями, т.е. дает запас по мощности при проектировании систем электроснабжения на основе использования КП нагрузки, понижающего расчетную суммарную мощность жилого дома.

Использование элементов гексагональной структуры сети [22, 23] для электроснабжения жилых комплексов позволит дополнительно снизить КП.

Выводы

Статистическая обработка удельной получасовой нагрузки МКД г. Москвы и МО показала, что при максимальной ошибке репрезентативности $\pm 10\%$ от среднего и величине доверительной вероятности 90 % исследуемая выборка является репрезентативной для оценки параметров генеральной совокупности МКД г. Москвы и МО. Анализ результатов обработки выборки домов г. Москвы и МО показал, что диапазон квартир, на которые приходится 90 % потребления электроэнергии МКД, в зависимости от его заселенности, составляет от 21 до 85 % от общего числа квартир дома. В большинстве случаев 90 % электропотребления обеспечивают 50-80 % квартир дома.

¹⁶ СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа».

Для расчета ПК были определены МКД г. Москвы и МО за сутки с наибольшим потреблением. Рассчитано максимальное значение ПК для г. Москвы и МО равное 0,81.

Значение ПК для определения расчетной нагрузки жилых домов г. Москвы и МО внесено в разделе 7 СП 256-1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» и утверждено приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ с целью уменьшения разницы между фактической и расчетной нагрузками МКД, образовавшейся в результате широкого применения в них различных видов энергоэффективных электроприемников.

Применение ПК для определения расчетной нагрузки жилого дома позволит уменьшить затраты при строительстве внешних электрических сетей жилых домов с одновременным повышением КПД силовых трансформаторов в г. Москве и МО. Дальнейшие более детальные исследования фактической нагрузки МКД различной этажности позволят подойти более избирательно к заданию ПК, возможно, разных его значений как МКД, отличающихся по высотности, так и для групп квартир.

Литература

1. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов. Москва: ИД «ФОРУМ» ИНФРА-М, 2017. 416 с.
2. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Галицкий Ю.Я., и др. Актуализация нормативных значений удельной электрической нагрузки многоквартирных домов в Республике Татарстан // Электричество. 2021. № 6. С. 62–71.
3. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р. и др. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области // Промышленная энергетика. 2022. № 4. С. 20-28.
4. James G., Witten D., Hastie T., et al. An introduction to statistical learning with Applications in R. 2nd ed. Cham. Springer. 2021. p. 612.
5. Жилкина Ю. В. Процессы реформирования электроэнергетики в России // Энергетик. 2020. № 1. С. 29-32.
6. Федотов А.И., Абдрахманов Р.С., Ахметшин А.Р. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 09-10. С. 40-45.
7. Гофман А.В., Ведерников А.С., Ведерникова Е.С. Повышение точности краткосрочного и оперативного прогнозирования электропотребления энергосистемы с применением искусственной нейронной сети // Электрические станции. 2012. № 7 (972). С. 36-41.
8. Илюшин П.В. Особенности учета параметров нагрузки при анализе переходных процессов в сетях с объектами распределенной генерации // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. №6 (51). С. 54-61.
9. Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. №1 (23). С. 156-166.
10. Latifi M, Sabzehgar R, Rasouli M. Reactive power compensation using plugged-in electric vehicles for an AC power grid. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2018. pp. 4986-4991.
11. Грачева Е.И., Наумов О.В., Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 71-77.
12. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Учет холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 53-63.
13. Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые

здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 47-57.

14. Надтока И.И., Павлов А.В. Повышение точности расчета электрических нагрузок многоквартирных домов с электроплитами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. №2. С. 45-48.

15. Надтока И.И., Павлов А.В. Расчёты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 3. С. 36-39.

16. Carroll P., Murphy T., Hanley M., et al. Household classification using smart meter data // Journal of official statistics. 2018. V. 34. № 1. pp. 1-25.

17. Proedrou A. Comprehensive review of residential electricity load profile models // IEEE Access. 2021. Vol. 9. pp. 12114-12133.

18. Cembranel S.S., Lezama F., Soares J., et al. A short review on data mining techniques for electricity customers characterization // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia. 2019. pp. 194-199.

19. Chung H.-M., Maharjan S., Zhang Y., Eliassen F. Distributed Deep Reinforcement Learning for Intelligent Load Scheduling in Residential Smart Grids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021 V. 17 (4), art. no. 9133518, pp. 2752-2763.

20. Майоров А.В. Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030 // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 2 (13). С. 2-7.

21. Гореева Н.М., Демидова Л.Н. Статистика. Москва: Изд.: Прометей. 2019. 496 с.

22. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Интеллектуальные распределительные сети 10 –20 кВ с гексагональной конфигурацией // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 3–7.

23. Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №3 (114). С. 85–94.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж», председатель технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», председатель научно-экспертного совета в Приволжском федеральном округе по мониторингу реализации законодательства в области энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности при Комитете Совета Федерации ФС РФ по экономической политике.

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета, главный специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж», член технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», член научно-экспертного совета в Приволжском федеральном округе по мониторингу реализации законодательства в области энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности при Комитете Совета Федерации ФС РФ по экономической политике.

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета, ведущий специалист Ассоциации «Росэлектромонтаж», член технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», член научно-экспертного совета в Приволжском федеральном округе по мониторингу реализации законодательства в области энергетики, энергосбережения и повышения энергетической эффективности при Комитете Совета Федерации ФС РФ по экономической политике, член *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

References

1. Opoleva GN. *Ehlektrsnabzhenie promyshlennykh predpriyatii i gorodov*. Moscow: Publishing House FORUM INFRA-M; 2017;416.
2. Soluyanov YI, Fedotov AI, Galitskiy YY, et al. Updating the normative values of the specific electrical load of apartment buildings in the Republic of Tatarstan. *Electricity*. 2021; 6:62-71.
3. Soluyanov YI, Fedotov AI, Akhmetshin AR et al. Analysis of the actual values of the assessment of apartment buildings in the Moscow region. *Industrial Energy*. 2022; 4:20-28.
4. James G, Witten D, Hastie T, et al. An introduction to statistical learning with Applications in R. 2nd ed. Cham. Springer. 2021;612.
5. Zhilkina YV. Processes of reforming the electric power industry in Russia. *Energetik*. 2020; 1:29-32.
6. Fedotov AI, Abdrakhmanov RS, Akhmetshin AR. Ensuring the standard voltage level in distribution networks of 0.4-10 kV using booster transformers. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2011; 09-10:40-45.
7. Gofman AV, Vedernikov AS, Vedernikova ES. Improving the accuracy of short-term and operational forecasting of the power consumption of the energy system using an artificial neural network. *Electric Stations*. 2012; 7:36-41.
8. Ilyushin PV. Features of the account of load parameters in the analysis of transient processes in networks with distributed generation facilities. *Elektroenergiya. Transmission and distribution*. 2018; 51(6):54-61.
9. Soluyanov YI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Energy-resource-saving effect in the power supply systems of residential complexes from the actualization of standards for electrical loads. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2021; 23(1):156-166.
10. Latifi M, Sabzehgar R, Rasouli M. Reactive power compensation using plugged-in electric vehicles for an AC power grid. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018;4986-4991.
11. Gracheva EI, Naumov OV, Fedotov EA. Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2017; 7-8:71-77.
12. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Accounting for idle waste of transformers during operation when calculating electricity losses in distribution networks. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2016; 1-2:53-63.
13. Soluyanov YI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Actualization of specific electrical loads of public premises built into residential buildings. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2021; 3:47-57.
14. Nadtoke II, Pavlov AV. Increasing the accuracy of calculating the electrical loads of apartment buildings with electric stoves. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical science*. 2015; 2:45-48.
15. Nadtoke II, Pavlov AV. Calculations of electrical loads in the residential part of apartment buildings with electric stoves based on the average loads of apartments. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 2014; 3:36-39.
16. Carroll P, Murphy T, Hanley M, et al. Household classification using smart meter data. *Journal of official statistics*. 2018; 34(1):1-25.
17. Proedrou A. Comprehensive review of residential electricity load profile models. *IEEE Access*. 2021; 9:12114-12133.
18. Cembranel SS, Lezama F, Soares J, et al. A short review on data mining techniques for electricity customers characterization. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia*. 2019;194-199.
19. Chung H-M, Maharjan S, Zhang Y, Eliassen F. Distributed deep reinforcement learning for intelligent load scheduling in residential smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021; 17(4):2752-2763.
20. Mayorov AV. Development of the system of operational and technological management of the power grid complex within the framework of the concept of digital transformation 2030. *Electricity. Transmission and distribution*. 2019; 13(2):2-7.
21. Goreeva NM, Demidova LN. *Statistics*. Moscow: Publ.: Prometheus. 2019;496.
22. Loskutov AB, Sosnina EN, Loskutov AA, Zyrin DV. Intelligent distribution networks 10–20 kV with a hexagonal configuration. *Industrial Energy*. 2013; 12:3–7.
23. Loskutov AB, Loskutov AA, Zyrin DV. Development and research of a flexible intelligent medium voltage electrical network based on a hexagonal structure. *Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva*. 2016; 114(3):85–94.

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – Kazan State Power Engineering University, JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia, Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Association «Roselectromontazh», Moscow, Russia.

Получено

05.06.2022 г.

Отредактировано

06.07.2022 г.

Принято

08.07.2022 г.

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



УДК 621.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-4-154-164

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ярославский Д.А.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
kgeu-toe@mail.ru

Резюме: в статье рассматривается задача мониторинга состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи с ЦЕЛЮ обеспечения бесперебойного и надежного снабжения потребителей электроэнергией.

МЕТОДЫ. В качестве параметров состояния определены стрела провеса, сила тяжения и погонная масса провода, висящего в пролете. Подчеркивается, что полную картину состояния воздушной линии можно установить, определяя спектральный состав колебаний провода с использованием навесных автоматизированных многопараметрических датчиков с акселерометрами в качестве сенсоров. В РЕЗУЛЬТАТЕ показано, что используемые в настоящее время динамические модели описания движения провода как маятника и как туго натянутой струны недостаточно полны для представления колебания провода во всех трех пространственных координатах, не охватывают колебаний с нечетными гармониками и симметричных колебаний. получена система уравнений, позволяющая описывать пространственные колебания провода по всем трем осям, учитывающая разницу высот точек подвеса провода. В ЗАКЛЮЧЕНИИ показано, что анализ высших гармоник спектра колебаний провода дает возможность определения всех основных механических параметров проводов ВЛЭП.

Ключевые слова: мониторинг состояния высоковольтных воздушных линий электропередачи; модели колебаний провода, пространственные координаты, высшие гармоники спектра колебаний.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме "Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей" (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Для цитирования: Ярославский Д.А. Аналитические модели движения проводов воздушных высоковольтных линий электропередачи // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 154-164. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-154-164.

ANALYTICAL MODELS OF MOVEMENT OF WIRES OF AIR HIGH-VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINES

DA. Yaroslavsky

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
kgeu-toe@mail.ru

Abstract: The article PURPOSE with the problem of monitoring the state of high-voltage overhead power lines in order to ensure uninterrupted and reliable supply of consumers with electricity. METHODS. As parameters of the state, the sag, the tensile force and the mass per unit length of the wire hanging in the span are defined. IT IS STRESSED that a complete picture of the state of an overhead line can be established by determining the spectral composition of the wire vibrations using mounted automated multi-parameter sensors with accelerometers as sensors. It is shown that the currently used dynamic models for describing the motion of a wire as a pendulum and as a tightly stretched string are not complete enough to represent the vibrations of the wire in all three spatial coordinates, do not cover vibrations with odd harmonics and symmetrical vibrations. A system of equations has been OBTAINED that makes it possible to describe the spatial oscillations of the wire along all three axes, taking into account the difference in heights of the wire suspension points. IT IS SHOWN that the analysis of the higher harmonics of the spectrum of vibrations of the wire makes it possible to determine all the main mechanical parameters of the wires of overhead power lines.

Keywords: monitoring of the state of high-voltage overhead power transmission lines; models of wire oscillations, spatial coordinates, higher harmonics of the spectrum of oscillations.

Acknowledgments: The research work was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the scope of the state Research and Development task no. 075-03-2022-151 of 14.01.2022 "Distributed automated systems of monitoring and diagnostics for technical condition of overhead power lines and substations based on broadband data transmission technology through power lines and the industrial Internet of Things".

For citation: DA. Yaroslavsky. Analytical models of movement of wires of air high-voltage power transmission lines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(4):154-164. doi: 10.30724 / 1998-9903-2022-24-4-154-164.

Введение (Introduction)

В силу большой протяженности и географического положения территории Российской Федерации передача энергии от источников генерации до потребителей осуществляется через высоковольтные линии электропередач (ВЛЭП). Линии электропередачи находятся под постоянным воздействием силы тяжести и климатических факторов: температуры, влажности, ветровых воздействий, осадков, гололедно-изморозевых отложений (ГИО) на проводах, приводящих к обрывам и перехлестам проводов, вызывающих короткие замыкания [1-3]. Главная задача электрических сетей - постоянное и надежное обеспечение потребителей электрической энергией - возможно только в условиях непрерывного мониторинга состояния ВЛЭП [4, 5]. Следовательно, разработка устройств и методик для мониторинга ВЛЭП является актуальной задачей.

В мониторинге и диагностике состояния ВЛЭП по степени важности среди других параметров можно выделить три главных механических параметра: стрелу провеса, силу тяжения и погонную массу провода. Система мониторинга строится на основе разработки аналитических моделей, связывающих между собой эти три параметра ВЛЭП и позволяющих проводить их косвенное измерение [6, 7].

В связи с этим в работе было проведено моделирование колебаний провода как физического маятника с учетом небольшой ангармоничности и затухания, а также разработана математическая модель колебаний провода в полете по всем трем осям координатной системы. Получены аналитические выражения зависимости амплитуд и круговых частот свободных колебаний провода от трех главных механических параметров: стрелы провеса, силы тяжения и погонной массы провода. Все выражения учитывают разницу высот точек подвеса провода. Применение полученной аналитической модели при

разработке датчика мониторинга ЛЭП позволит снизить относительную погрешность измерения периода колебаний спектральным методом. Дополнительно появляется возможность установки датчика возле точки подвеса и применения инклинометрического способа определения стрелы провеса в качестве резервного метода.

Научная и практическая значимость данного исследования заключается в возможности изготовления простого датчика для мониторинга на основе трехосевого акселерометра с применением полученной математической модели для косвенных измерений главных параметров ВЛЭП.

Литературный обзор (Literature Review)

Имеется множество методов измерения стрелы провеса, например: инклинометрический [8, 9], оптический [10], емкостный, электростатический, на основе колебаний [11, 12] и т.д. В связи с появлением недорогих интегральных малогабаритных акселерометров, одними из наиболее перспективных методов определения важных параметров проводов ВЛЭП представляются методы, основанные на колебаниях провода.

При исследовании состояния ВЛЭП наиболее предпочтительным решением является применение стационарных систем мониторинга состояния ВЛ, поэтому для сбора данных был сделан выбор следующих трех методов: инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, инклинометрического метода с учетом угла вращения провода вокруг своей оси и метода определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний [12, 13].

Инклинометрический метод на основе гиперболических уравнений используется наиболее широко, поскольку позволяет определять механические нагрузки на провод независимо от типа, строения опор и провода в пролете. Тем не менее, данный метод не позволяет учитывать перетяжку провода в пролете при отсутствии устройств контроля в соседних смежных пролетах [14].

Инклинометрический метод с учетом угла вращения провода вокруг своей оси, в отличие от инклинометрического метода на основе гиперболических уравнений, учитывает влияние смещения точек подвеса провода в пролете. Однако, учитывающий угол вращения провода улучшенный инклинометрический метод применяется только в пролетах с одной анкерной опорой и с проводами с одним слоем навивки относительно центральной жилы (например, А-70, АС- 70/11) [15].

Метод определения стрелы провеса провода по периоду его колебаний дает упростить расчеты геометрии провода в пролете, поскольку для определения стрелы провеса провода достаточно знать только период его собственных колебаний. Данный метод может быть использован в любом пролете при любой марке провода и учитывает перетяжку провода между соседними пролетами, так как стрела провеса провода ВЛ определяется через период колебаний провода и не зависит от расстояния между его точками подвеса [16].

По разработанным методикам погрешность не превышает 5% определения силы тяжения провода.

Разработанные методы [14, 17, 18, 19] могут применяться в зависимости от условий мониторинга. Представленные методы повышают надежность и достоверность мониторинга состояния ВЛ, дополняя друг друга. Представленные три метода контроля состояния ВЛ используются в системе автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «Татнефть» [20].

Материалы и методы (Materials and methods)

Под действием силы тяжести и порывов ветра провод может совершать множество видов колебаний различной природы. Наиболее тщательно были исследованы маятниковые колебания в работе В.Ю. Кабашова [21]. Из измерений параметров маятниковых колебаний провода в пролете можно непосредственно получить значение стрелы провеса [21]:

$$\omega_0 = 3.5 f^{-1/2} \quad (1)$$

где ω_0 - круговая частота свободных гармонических маятниковых колебаний, а f - стрела провеса провода.

Выражение для круговой частоты негармонических колебаний с повышенной амплитудой, найденное тем же автором путем разложения в ряд функции синус, имеет вид

$$\omega = \omega_0 \left(1 + \frac{\varphi_0^2}{8} + \frac{17\varphi_0^4}{1536} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где φ_0 - угловая амплитуда маятниковых колебаний. При малых угловых отклонениях данная круговая частота будет незначительно отклоняться от гармонической в меньшую сторону.

В некоторых исследованиях для негармонических маятниковых колебаний с диссипативными силами прогнозируется появление третьей и пятой гармоники маятниковых колебаний [22, 23]. Однако, эксперименты по измерению ускорения колебаний провода при помощи акселерометра показали наличие множество высших гармоник, включая четные. Для уточнения результатов, полученных перечисленными авторами, нами были проведены численные эксперименты нелинейных маятниковых колебаний с диссипативными силами по следующей модели, представленной уравнением

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + c \sin \varphi + k_1 \frac{d\varphi}{dt} + k_2 \frac{d\varphi}{dt} \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| = 0.$$

В расчетах коэффициент c , являющийся отношением гравитационной постоянной к длине подвеса маятника был принят равным $c = \frac{g}{L} = 1$, коэффициенты k_1 и k_2 , учитывающие затухание колебаний, изменялись для совпадения с экспериментальными данными. Начальный угол отклонения в численном эксперименте был принят $\varphi = \frac{\pi}{6}$, начальная

угловая скорость принята за ноль. Несколько спектров колебаний представлены на рисунке 1. В данном случае частоты спектра нормированы к частоте собственных незатухающих колебаний гармонического маятника. Амплитуда нормирована к начальной амплитуде колебаний.

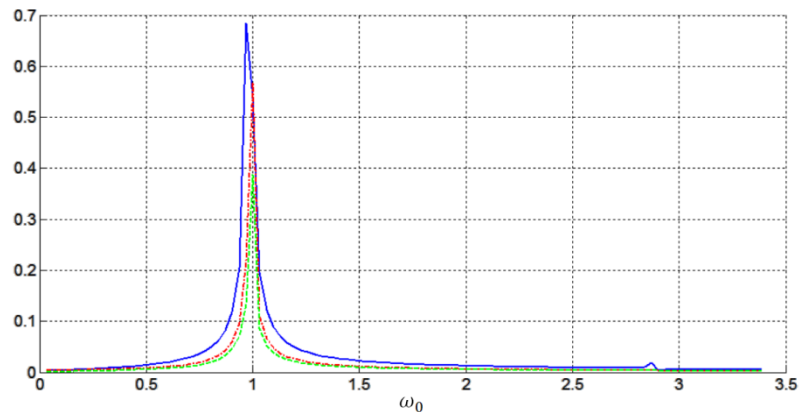


Рис. 1. Гармонический состав маятниковых колебаний: непрерывная линия голубого цвета при $k_1 = k_2 = 0$; штрих-пунктирная линия красного цвета при $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0$; пунктирная линия при $k_1 = 0,01$ и $k_2 = 0,012$.

Fig 1 Harmonic composition of pendulum oscillations: continuous blue line at $k_1 = k_2 = 0$; dashed red line at $k_1 = 0,01$ and $k_2 = 0$; dotted line at $k_1 = 0,01$ and $k_2 = 0,012$.

Из многочисленных численных экспериментов можно сделать следующий вывод. Негармонические незатухающие колебания действительно снижают частоту колебаний и достаточно хорошо описываются формулой (2). Однако диссипативные силы "возвращают" круговую частоту к частоте свободных колебаний. Высшие гармоники по амплитуде пренебрежимо малы по сравнению с основной. Заметное глазу появление третьей, пятой и седьмой гармоники наблюдается при отклонении маятника на углы более $\frac{\pi}{4}$. Четные

гармоники в решениях отсутствуют вовсе.

Спектр, который был получен нами в пролете длиной $l = 64$ м и стрелой провеса $f = 1,25$ м, представлен на рисунке 2.

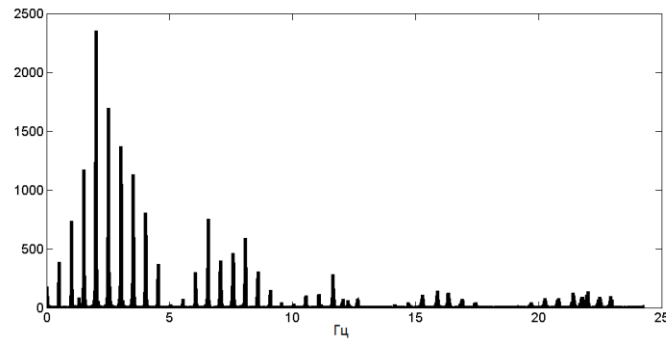


Рис. 2. Спектр колебаний провода в плоскости, перпендикулярной плоскости провиса

Fig 2 The spectrum of vibrations of the wire in a plane perpendicular to the plane of the sag

Результат моделирования противоречит экспериментальным данным, из чего можно сделать вывод, что провод в пролете, помимо маятниковых колебаний, совершает другие виды колебаний, частоты которых также зависят от стрелы провиса.

Для уточнения полной картины колебаний провода в пролете необходимо составить пространственную динамическую модель. В теоретической механике есть подходящая модель, именуемая гибкой нитью, которая позволяет это сделать. Уравнение динамического баланса элемента нити отличается от уравнения статического баланса, из которого получается хорошо известный провис провода в поле тяготения, обусловленный лишь наличием силы, вызванной вторым законом Ньютона [24]. Однако, при получении аналитического решения координатных уравнений возникают некоторые трудности. Первая трудность - это то, что рассмотрение колебаний нерастяжимой цепной линии, несмотря на то, что оно получено с привлечением математического аппарата вариационного исчисления, всё равно не дает аналитического решения, а всего лишь приводит к уравнению, пригодному для численного моделирования [24]. Вторая трудность заключается в том, что, упростив уравнение динамического баланса нити тем же способом, что и при выводе уравнения нити с малой стрелой провиса, мы теряем неголономную связь проекций элемента нити, после чего оно распадается на независимые уравнения. Третья трудность в том, что никакая реальная нить, по сути, не является нерастяжимой, а непосредственное введение свойства растяжимости в координатные уравнения снова не дает возможности получения его аналитического решения. Отсутствие растяжимости нити, например, не дает возможности для существования симметричных поперечных колебаний в плоскости провиса, что противоречит наблюдениям.

Для преодоления описанных трудностей применим метод малых отклонений. Предположительно, отклонение элемента от положения статического равновесия будет незначительным, особенно в плоскости провиса. Координатные уравнения баланса элемента нити для малых отклонений имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dx}{ds} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dy}{ds} + \frac{\partial v}{\partial s} \right) \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - q, \\ \frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \frac{\partial w}{\partial s} \right] = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases}$$

здесь S - криволинейная координата вдоль нити; $T = T(x)$ и $\tau = \tau(x, t)$ - сила тяжения и малое дополнительное тяжение вдоль оси малого элемента; ∂u , ∂v и ∂w - малое дополнительное удлинение элемента по координатам x , y и z , соответственно; q - погонный вес единицы длины провода; g - ускорение свободного падения. Сделав упрощение, примененное при выводе модели нити с малой стрелой провиса, и пренебрегая членами второго порядка малости, получим систему.

$$\begin{cases} H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ H \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + h \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{cases}$$

здесь, $H = \text{const}$ и $h = h(t)$ - статическое и малое дополнительное горизонтальное тяжение. Однако, данная система не имеет совместного решения из-за ранее описанных проблем номер два и три.

Авторы статьи [25] предлагают следующий способ решения данной проблемы. Первое уравнение необходимо удалить из системы по причине того, что продольные колебания имеют малые амплитуды, но вызывают значительные удлинения элемента нити, следовательно, имеет максимальную погрешность. Два оставшихся уравнения дополняются отдельным геометрическим уравнением растяжения элемента нити по закону Гука с пренебрежением величинами второго порядка малости. В итоге получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + h \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \alpha^* h \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases},$$

где α^* - удельное относительное удлинение нити.

Глядя на систему уравнений, можно сделать вывод, что второе уравнение полностью отделилось от двух остальных, и колебания, перпендикулярные плоскости провиса, не вызывают дополнительных тяжений. Это уравнение описывает колебания идеальной струны, на которую действует единственная статическая сила натяжения. Это хорошо подтверждается наблюдением, так как модой, которую можно легко возбудить, воздействуя на середину нити в плоскости горизонта, является первая мода. Первое же уравнение имеет аналитическое решение, которое, однако, необходимо разбить на два решения: для асимметричных колебаний и для симметричных колебаний в плоскости провиса.

Начнем с самого простого вида колебания в плоскости, перпендикулярной плоскости провиса, уравнение которого имеет вид:

$$H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{q}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$$

Это колебания натянутой струны. Частное решение данного уравнения для n -ой гармоники будет иметь амплитуду и круговую частоту:

$$W_n(x) = A_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad \omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{ag}, \quad (3)$$

где n - любое натуральное число, $a = H/q$.

Асимметричные колебания, которые возникают в плоскости провиса, можно в хорошем приближении описать, приняв удлинение нити $h = 0$ и произведя замену $v(x, t) = V(x)e^{j\omega t}$, $u(x, t) = U(x)e^{j\omega t}$ в исходных уравнениях. Тогда имеем два уравнения, зависящие только от одной координаты

$$H \frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{q}{g} \omega^2 V = 0,$$

$$\frac{dU}{dx} + \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx} = 0.$$

Или учитывая граничные условия $V(0) = V\left(\frac{1}{2}\right) = 0$ из первого уравнения, сразу же получаем амплитуду и круговую частоту n -й гармоники вертикальных асимметричных колебаний:

$$V_n(x) = A_n \sin \frac{2n\pi x}{l}, \quad \omega_n = \frac{2n\pi}{l} \sqrt{ag}.$$

Интегрируя второе уравнение от 0 до координаты x , имеем

$$U = -\frac{dy}{dx} V - \frac{1}{a} \int_0^x V dx.$$

И, учитывая граничные условия $U(0) = U(l) = 0$, получаем амплитуду n -й гармоники горизонтальных колебаний провода

$$U_n(x) = \frac{A_n}{a} \left[(x - \sigma) \sin \frac{2n\pi x}{l} - \frac{l}{2n\pi} \left(1 - \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \right],$$

где σ - координата низшей точки кривой, при отсутствии разницы высот точек подвеса s .

Описание симметричных колебаний в плоскости провиса можно вывести, приняв дополнительно, что $h(t) = \hbar e^{j\omega t}$.

$$H \frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{q}{g} \omega^2 V = \frac{\hbar}{a},$$

$$\alpha * \hbar \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = \frac{dU}{dx} + \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx}.$$

Граничные условия учитывают неподвижность точек крепления провода

$$U(0) = U(l) = 0 \text{ и } V(0) = V(l) = 0.$$

Решение первого уравнения необходимо искать в виде

$$V(x) = \frac{\hbar}{H} \frac{1}{a\beta^2} \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} \sin \beta x - \cos \beta x \right),$$

где принято $\beta = \frac{\omega}{\sqrt{ag}}$.

Исключить неизвестную $\hbar$ можно интегрированием второго уравнения по всей длине пролета l

$$\alpha * \hbar L_e = \int_0^l \frac{dy}{dx} \frac{dV}{dx} dx = \frac{1}{a} \int_0^l V(x) dx = \frac{\hbar}{H} \frac{1}{(\beta a)^2} \left(l - \frac{2}{\beta} \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} \right),$$

где, в качестве L_e , пренебрегая малыми величинами выше второго порядка малости, принимаем

$$L_e = \int_0^l \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 = l + \frac{3}{2a^2} \left(l\sigma^2 - l^2\sigma + \frac{l^3}{3} \right) \cong l + \frac{l^3}{8a^2}.$$

Полученное уравнение можно привести к виду

$$\operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} = \frac{\beta l}{2} - \frac{4}{\lambda^2} \left(\frac{\beta l}{2} \right)^3. \quad (4)$$

Здесь в качестве величины λ^2 принято выражение

$$\lambda^2 = \left(\frac{l}{a} \right)^2 \frac{l}{a * H L_e}.$$

Уравнение (4) сильно нелинейно. Можно особо выделить два предельных случая.

Первый случай, когда $\lambda^2 = \infty$, что будет соответствовать абсолютно нерастяжимой нити. Решением уравнения

$$\operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} = \frac{\beta l}{2}$$

для первых двух гармоник будет

$$(\beta l)_1 = 2,86\pi; (\beta l)_2 = 4,92\pi.$$

Высшие гармоники хорошо описываются уравнением

$$(\beta l)_n = (2n+1)\pi.$$

Второй случай, когда $\lambda^2 = 0$, что будет соответствовать натянутой струне с решением

$$(\beta l)_n = (2n-1)\pi.$$

Промежуточное решение исходного полного уравнения будет, соответственно, лежать в диапазоне

$$(2n-1)\pi < (\beta l)_n < (2n+1)\pi.$$

Амплитуду продольных колебаний можно найти интегрированием второго дифференциального уравнения от нуля до координаты x

$$\begin{aligned} U(x) &= \alpha^* \hbar \int_0^x \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx - \frac{dy}{dx} V(x) - \frac{1}{a} \int_0^x V(x) dx = \\ &= \alpha^* \hbar \left[x + \frac{3}{2a^2} \left(x\sigma^2 + x^2\sigma + \frac{x^3}{3} \right) \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} [(\sigma - x)V(x) + \frac{\hbar}{H} \frac{1}{\beta^3 a} \left(\beta x + \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2} (\cos \beta x - 1) - \sin \beta x \right)]. \end{aligned}$$

Обсуждение результатов и заключение (Discussion of the results and conclusion)

В работе были выведены аналитические выражения зависимости амплитуд и круговых частот свободных колебаний провода от трех главных механических параметров: стрелы провеса, силы тяжения и погонной массы провода. Все выражения учитывают разницу высот точек подвеса провода. Выражения для колебаний в плоскости перпендикулярной плоскости провиса хорошо согласуются с экспериментальными данными. Была доказана возможность применения данных аналитических выражений в целях мониторинга. Показано, что применение высших гармоник в целях мониторинга уменьшает относительную погрешность косвенных измерений механических параметров.

В плоскости, перпендикулярной плоскости провеса, период колебаний первой гармоники (3) отличается от периода свободных гармонических маятниковых колебаний провода (1) менее чем на 1% при отсутствии разницы высот. По полученной модели, провод в пролете может совершать любые высокочастотные колебания с гармониками, кратными первой, включая четные гармоники в данной плоскости.

В целях мониторинга определение стрелы провеса по высшим гармоникам представляется более целесообразным, так как снижается относительная погрешность измерения периода колебаний спектральным методом. Второе преимущество заключается в том, что появляется возможность установки датчика возле точки подвеса и дополнительно использовать инклинометрический способ определения стрелы провеса. Оптимальный номер гармоники n можно выбрать, максимизируя выражение:

$$\left| \sin \frac{n\pi x}{l} \right|,$$

где x - координата места установки датчика. Дополнительно, из уравнения (4) при известной стреле провеса можно найти горизонтальную проекцию силы тяжения H . Зная H , можно определить погонный вес провода q , включая случай наличия на проводе ГИО. Возможен также способ определения силы тяжения H по значению амплитуды симметричных колебаний в месте установки датчика $U(x)$ и $V(x)$.

Таким образом, предлагаемый метод дает возможность определения всех основных механических параметров проводов ВЛЭП на основе измерения характеристик высших гармоник.

Литература

1. Zangl H., Bretterklieber T., Brasseur G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009. Т. 58. №. 5. pp. 1789-1796.
2. Castro P. et al. Study of different mathematical approaches in determining the dynamic rating of overhead power lines and a comparison with real time monitoring data // Applied Thermal Engineering. 2017. Т. 111. pp. 95-102.
3. Lindsey K. E., Spillane P. E., An-Chyun W. Dynamic real time transmission line monitor and method of monitoring a transmission line using the same. Патент США №15725207. 2018.
4. De Paulis F. et al. Detectability of degraded joint discontinuities in HV power lines through TDR-like remote monitoring // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Т. 65. № 12. pp. 2725-2733.
5. Hung K. S. et al. On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2010. pp. 309-314.
6. Aggarwal R.K. et al. An overview of the condition monitoring of overhead lines // Electric Power systems research. 2000. Т. 53. № 1. pp. 15-22.
7. Sun Z., Zhao T., Che C. Design of electric power monitoring system based on ZigBee and GPRS // 2009 international symposium on computer network and multimedia technology. IEEE, 2009. pp. 1-4.
8. Титов Д.Е., Петренко С.А., Сошинов А.Г. Система мониторинга интенсивности гололедообразования "Миг" для воздушных линий электропередачи // Электроэнергетика глазами молодежи. 2015. С. 598-601.
9. Костиков И. Система мониторинга «CAT-1»-эффективная защита ВЛЭП от гололеда // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. № 1-4. С. 32-35
10. Шилин А. Н., Дементьев С. С. Оптический метод регистрации прогибов линейной опоры для диагностики состояния ЛЭП // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 6. С. 490-497.
11. Кабашов В.Ю. Защита сельских воздушных линий электропередачи 6–10 кВ от низкочастотных колебаний проводов при гололедно-ветровых нагрузках: монография / В.Ю. Кабашов. Уфа: Здравоохранение Башкортостана, 2010. 168 с.
12. Нгуен Ван Бу. Метод определения стрелы провеса провода по периоду его собственных колебаний и усовершенствованная система автоматизированного мониторинга состояния ВЛЭП: дис. ... канд. тех. наук. Казанский государственный энергетический университет, 2021.
13. Сацук Е. И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук. – Новочеркасск, 2011. С.314
14. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A. *et al.* Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. №22. pp. 6479-6482.
15. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок [Текст]: дис. ... докт. техн. наук. МГАУ. Москва. 2011. 353 с.
16. Ланда П.С. Срывной флаттер как один из механизмов возбуждения автоколебаний линий электропередач // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 2. С. 3-15. DOI 10.18500/0869-6632-2009-17-2-3-15.
17. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Galiyeva T.G., Goryachev M.P., Tyurin V.A. Inclino-metric method for determining the mechanical state of an overhead power transmission line // E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. 2019. С. 05022.
18. Прохоров А.М. Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия. Т.5. Стробоскопические приборы. Яркость. 1998. С.10.
19. Ярославский Д.А., Нгуен В.В., Садыков М.Ф., Горячев М.П., Наумов А.А. Модель собственных гармонических колебаний провода для задач мониторинга состояния воздушных линий электропередачи. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 3. с. 97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106>
20. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А. и др. Внедрение системы автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «Татнефть» // Нефтяное хозяйство. 2020. №7. С.53-55.

21. Кабашов В.Ю. Повышение надежности сельских воздушных линий электропередачи 10 (6) кВ в условиях воздействия ветровых и гололедных нагрузок: дис. ... д-ра тех. наук. Башкирский государственный аграрный университет, 2011.
22. Макаров А. А. Экспериментальное определение затуханий колебания тела в потоке воздуха.// Надежность и долговечность строительных конструкций. Волгоград, 1974. С. 146-149.
23. Горошков Ю.И. Ветроустойчивость контактной сети / Ю. И. Горошков, А. И. Гуков. М.: Транспорт, 1969. 128 с.
24. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 240 с.
25. Irvine H.M., Caughey T.K. The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable. Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A, 1974. V. 341, pp. 299-315.

Авторы публикации

Ярославский Данил Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», с.н.с. научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики», Казанский государственный энергетический университет.

Reference

1. Zangl H., Bretterklieber T., Brasseur G. *A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009; 58(5):1789-1796.
2. Castro P. et al. *Study of different mathematical approaches in determining the dynamic rating of overhead power lines and a comparison with real time monitoring data*. Applied Thermal Engineering. 2017; 111:95-102.
3. Lindsey K. E., Spillane P. E., An-Chyun W. *Dynamic real time transmission line monitor and method of monitoring a transmission line using the same*: patent 15725207 USA. 2018.
4. De Paulis F. et al. *Detectability of degraded joint discontinuities in HV power lines through TDR-like remote monitoring*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016; 65(12): 2725-2733.
5. Hung K. S. et al. *On wireless sensors communication for overhead transmission line monitoring in power delivery systems*. First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2010; 309-314.
6. Aggarwal R. K. et al. *An overview of the condition monitoring of overhead lines* //Electric Power systems research. 2000; 53(1): 15-22.
7. Sun Z., Zhao T., Che C. *Design of electric power monitoring system based on ZigBee and GPRS*. International symposium on computer network and multimedia technology. – IEEE, 2009;32(16):1-4.
8. Titov D. E., Petrenko S. A., Soshinov A. G. *Sistema monitoringa intensivnosti gololedoobrazovaniya "Mig" dlya vozdukhnykh linii elektroperedachi*. Elektroenergetika glazami molodezhi. 2015;598-601.
9. Kostikov I. *Sistema monitoringa «SAT-1»-effektivnaya zashchita VLEP ot gololeda*. Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. 2011;32-35: 1-4.
10. Shilin A. N., Dement'ev S. S. *Opticheskii metod registratsii progibov lineinoi opory dlya diagnostiki sostoyaniya LEP*. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie. 2018; 61(6): 490-497.
11. Kabashov V.Yu. *Zashchita sel'skikh vozdukhnykh linii elektroperedachi 6–10 kV ot nizkochastotnykh kolebaniy provodov pri gololedno-vetrovykh nagruzkakh*: monografiya. V.Yu. Kabashov. Ufa: Zdravookhranenie Bashkortostana, 2010;168
12. Nguen Van Vu. *Metod opredeleniya strely provesa provoda po periodu ego sobstvennykh kolebaniy i usovershenstvovannaya sistema avtomatizirovannogo monitoringa sostoyaniya VLEP*: дис. ... канд. тех. наук. – Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet. 2021.
13. Satsuk, E. I. *Programmno-tehnicheskie sredstva monitoringa vozdukhnykh linii elektroperedachi i upravleniya energosistemoi v ekstremal'nykh pogodnykh usloviyakh* [Tekst]: дис. ... д-ра тех. наук. Novocherkassk, 2011; 314.

14. Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Ivanov D.A. et al. *Methodology of ice coating monitoring on overhead transmission lines considering misalignment using wireless communication channel sensors*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; 12(22):6479.
15. Kabashov V. Yu. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh vozdukhnykh linii elektroperedachi 10 (6) kV v usloviyakh vozdeistviya vetrovykh i gololednykh nagruzok* [Tekst]: dis. ...dokt. tekhn. nauk. – MGAU. Moskva. 2011;353
16. Landa, P. S. Sryvnoi flatter kak odin iz mekhanizmov возбуждения avtokolebaniy linii elektroperedach. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika*. 2009; 17(2):3-15. DOI 10.18500/0869-6632-2009-17-2-3-15.
17. Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Galiyeva T.G., Goryachev M.P., Tyurin V.A. Inclimetric method for determining the mechanical state of an overhead power transmission line // *E3S Web of Conferences. 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019*. 2019. C. 05022.
18. Prokhorov. A.M. *Fizicheskaya entsiklopediya M.: Sov. entsiklopediya. Stroboskopicheskie pribory - Yarkost'*. 1998;5(10).
19. Yaroslavskii D.A., Nguen V.V., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Naumov A.A. Model' sobstvennykh garmonicheskikh kolebaniy provoda dlya zadach monitoringa sostoyaniya vozdukhnykh linii elektroperedachi. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(3):97-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-3-97-106>.
20. Sadykov M.F., Yaroslavskii D.A., Ivanov D.A. i dr. Vnedrenie sistemy avtomatizirovannogo monitoringa gololedoobrazovaniya v raspredelitel'nykh setyakh PAO «Tatneft'». *Neftyanoe khozyaistvo*. 2020;(7):53-55.
21. Kabashov V. Yu. *Povyshenie nadezhnosti sel'skikh vozdukhnykh linii elektroperedachi 10 (6) kV v usloviyakh vozdeistviya vetrovykh i gololednykh nagruzok*: dis. ... d-ra tekhn. nauk. – Bashkirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2011.
22. Makarov A. A. Eksperimental'noe opredelenie zatukhanii kolebaniya tela v potoke vozdukha. A. A. Makarov. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh konstruksii*. Volgograd, 1974; 146-149.
23. Goroshkov Yu. I. Vetrustoiichivost' kontaktnoi seti. Yu. I. Goroshkov, A. I. Gukov. - M.: Transport, 1969; 128
24. Merkin D.R. Vvedenie v mekhaniku gibkoi niti. – M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1980;240.
25. Irvine H.M., Caughey T.K. The Linear Theory of Free Vibrations of a Suspended Cable. *Proceedings of the Royal Society of London. Ser. A*, 1974; 341: 299-315

Authors of the publication

Danil A. Yaroslavsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

20.06.2022 г.

Отредактировано

08.07.2022 г.

Принято

12.07.2022 г.



**МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ИЗОЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Галиева¹ Т.Г., Иванов^{1,2} Д.А.,
Садыков^{1,2} М.Ф., Андреев¹ Н.К., Хамидуллин¹ И.Н.

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский
научный центр РАН, г. Казань, Россия
79534929817@ya.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка метода непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов на основе регистрации среднего уровня мощности сигнала электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающей среды. Аппаратная и программная реализация прибора на основе данной методики. Проведение экспериментальных исследований. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялись методы регистрации среднего уровня мощности электромагнитных сигналов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье описана актуальность темы, рассмотрены различные физические методы регистрации частичных разрядов (ЧР) и определение их местоположения. На лабораторном стенде проведены исследования среднего уровня мощности сигнала дефектного и бездефектного высоковольтных изоляторов, находящихся под напряжением. Проведен эксперимент по определению временного затухания локального сигнала от ЧР. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработан метод для диагностики состояния высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе непрерывного мониторинга уровня электромагнитного излучения с привязкой к фазе сетевого напряжения. Метод диагностики высоковольтных изоляторов дает возможность контролировать состояние изоляции удаленно и непрерывно.

Ключевые слова: Разработка метода диагностики изоляторов; методика неразрушающего контроля изоляции; частичные разряды; высоковольтные диэлектрические элементы.

Благодарности: Научные исследования проводились в рамках выполнения госзадания ФИЦ КазНЦ РАН.

Для цитирования: Галиева Т.Г., Иванов Д.А. Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.

**METHODOLOGY AND DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE
INSULATORS BASED ON CONTINUOUS RECORDING OF THE SPATIAL LEVEL
OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF PARTIAL DISCHARGES**

TG. Galieva¹, DA. Ivanov^{1,2}, MF. Sadykov^{1,2}, NK. Andreev¹, IN. Khamidullin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy
of Sciences», Kazan, Russia
79534929817@ya.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of diagnostic methods for high-voltage insulators in operation based on continuous recording of electromagnetic radiation. Hardware and software implementation of the device based on this technique. Carrying out experimental researches. *METHODS.* Received signal strength indicator measuring method of electromagnetic signals and method of determining the attenuation of electromagnetic radiation in space were used. *RESULTS.* The article describes relevance of the topic, considers various physical methods for registering partial discharges (PD) and their localization. Studies of the average signal level of defective and non-defective high-voltage insulators on load operation (10-15 kV) were carried out using the laboratory stand. An experiment was carried out to determine the space attenuation of a local signal from the PD. *CONCLUSION.* A technique for diagnosing high-voltage insulators during operation has been developed. This technique is based on continuous monitoring of electromagnetic radiation from partial discharges. Method for diagnosing high-voltage insulators makes it possible to monitor the insulation condition remotely and continuously.

Keywords: *diagnostic method for insulators; non-destructive testing of insulation; partial discharges; high-voltage dielectric elements.*

Acknowledgments: *Research were performed with the financial support from the government assignment for FRC Kazan Scientific Center of RAS.*

For citation: Galieva TG, Ivanov DA., Sadykov MF, Andreev NK., Khamidullin IN. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):165-177. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.

Введение (Introduction)

Мониторинг состояния функционирующего изоляционного оборудования необходим для оценки срока службы и планирования его технического обслуживания в энергосистеме. В энергетике РФ имеется высокая доля изоляционного оборудования, исчерпавшего эксплуатационный ресурс, а также оборудования, находящегося в неудовлетворительном состоянии ($ИТС \leq 50$). Согласно Положению [1], перечисленное оборудование, при условии его эксплуатации без отклонения от номинальных параметров, ограничения дальнейшей эксплуатации могут быть сняты при условии некоторых параметров, в том числе: использования современных методов и средств технического диагностирования преимущественно под рабочим напряжением (виброакустический контроль, измерение частичных разрядов), в том числе при проведении учащенного контроля технического состояния.

Электрическая изоляция является важным элементом, требующим контроля, поскольку она подвержена выходу из строя при высоких электрических нагрузках. Наличие ЧР в течение длительного времени в изоляционном оборудовании может привести к катастрофическим сбоям в системах высокого напряжения, что, в свою очередь, может повлечь экономические, энергетические потери и даже вызвать человеческие жертвы. Таких сбоев и потерь можно избежать, постоянно контролируя техническое состояние высоковольтной изоляции по уровню ЧР [2]. Большое количество фактов показывает, что первоначальные причины большинства аварий электрооборудования связаны с дефектами их внутренней изоляции [3, 4].

На сегодняшний день существуют различные бесконтактные методы диагностики ВИ, направленные на периодичный контроль [5, 6]. Выявляемость дефектов изоляции при периодическом контроле существенно зависит от погоды во время проведения измерений, так как частичные разряды наибольшей амплитуды достигают в период высокой влажности окружающей среды (дождь, роса) или зимой при температуре таяния снега и изморозевых отложений на поверхности изоляторов.

В соответствии со Стратегией развития электросетевого комплекса Российской Федерации для оборудования электросетевых объектов, ЛЭП и сооружений должен реализовываться и осуществляться переход от системы планово-предупредительного вида организации ремонта на объектах электросетевого хозяйства к организации ремонта по фактическому техническому состоянию с учетом последствий отказа основного технологического оборудования (рисков). Для высоковольтной изоляции

такой переход возможен при внедрении мониторинга технического состояния с целью оценки её старения и остаточного ресурса [7].

В связи с этим, разработка непрерывного дистанционного «онлайн» мониторинга высоковольтных изоляторов, определяющего дефекты в изоляционном оборудовании и уровень технического состояния, является актуальной задачей на сегодняшний день.

Научная и практическая новизна исследования заключается в следующем:

- разработан метод непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов на основе регистрации среднего уровня мощности сигнала электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающей среды;
- разработана методика определения места расположения наиболее опасных дефектов в высоковольтных изоляторах, позволяющая прогнозировать процессы деградации диэлектрического материала;
- разработано устройство непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах и их развития;
- реализованы алгоритмы обработки данных системы непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов;
- разработано программное обеспечение для устройств контроля, системы сбора и накопления данных, анализа и визуализации информации о техническом состоянии высоковольтной изоляции.

Литературный обзор (Literature Review)

Обнаружение ЧР является важным инструментом для диагностики состояния изоляции при техническом обслуживании оборудования. Что касается обнаружения ЧР, то для тестирования изоляции был разработан и применен ряд методов, включая электрический метод [8], основанный на ГОСТ Р 55191-2012¹, и другие нетрадиционные методы для достижения удовлетворительного уровня мониторинга. Нетрадиционные методы основаны на физических явлениях, сопровождающих ЧР, таких как электромагнитные волны [9], акустические волны [10, 11] (оба метода предлагаются в стандарте IEC TS 62478²), тепловизионный [12], ультрафиолетовый, оптический [7, 13, 14].

Многие методы имеют существенные недостатки, например, акустический сильно подвержен влиянию помех. Телевизионный и ультрафиолетовый являются дорогостоящими, так как одна лишь ультрафиолетовая камера стоит порядка 100 000 евро и создание прибора для непрерывной диагностики изоляторов на их основе экономически невыгодно. Электромагнитный метод по обнаружению ЧР характеризуется высокой стабильностью и возможностью выбора полосы частот измерений [17]. Кроме того, электромагнитные датчики имеют невысокую стоимость.

В настоящее время метод регистрации электромагнитного излучения на ультравысоких частотах (УВЧ, 300-3000 МГц) широко используется для обнаружения ЧР в энергетическом оборудовании [15, 16]. Благодаря быстрому развитию вычислительного оборудования и алгоритмов обработки данных интеллектуальный метод диагностики неисправностей ЧР, основанный на данных УВЧ, за последние два десятилетия добился значительного прогресса.

Сущность электромагнитного метода заключается в регистрации электромагнитных волн (ЭМ) ЧР антеннами датчиков, преобразовании сигналов в напряжение, аналого-цифровом преобразовании и передачи данных на сервер. Как правило, эти данные сохраняются в трех формах, а именно, в виде сигнала во временной области, частотных спектрограмм с синхронизацией по фазе сетевого напряжения и частотно-временной спектрограммы. В имеющихся системах обнаружения сигналы обрабатываются с помощью современных алгоритмов обработки, включая нейросетевые методы [18], и далее диспетчерские пункты уведомляют персонал о возникновении ЧР, их местоположении, типе и степени опасности дефекта. Эта информация имеет решающее значение для разработки соответствующими отделами разумных стратегий технического обслуживания.

Определение местоположения источника разрядов имеет важное значение в

¹ ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов

² IEC TS 62478 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods

мониторинге изоляции. В методах, основанных на использовании УВЧ, для локализации источников ЧР в трехмерном пространстве датчики УВЧ должны быть размещены в разных положениях [4, 19]. Во время события возникновения ЧР импульсные (длительностью от 2 до 100 нс) сигналы УВЧ, излучаемые источниками, улавливаются датчиками УВЧ, расположенными в разных местах с известными координатами. Локализация источника ЧР на основе УВЧ может быть выполнена с использованием информации об уровне мощности сигнала (англ. *Received Signal Strength Indicator* - *RSSI*) [9, 16], угла прихода ЭМ волны от ЧР до приемников (англ. *angle of arrival* - *AOA*) [17], определения времени прибытия сигнала до приемников (англ. *time of arrival* - *TOA*), определения разницы во времени прибытия сигналов до приемников (*time-difference-of-arrival* - *TDOA*) [18, 19].

В твердой изоляции импульсные токи ЧР имеют длительность 10^{-9} - 10^{-6} с, а у токов поверхностных ЧР длительность составляет 10^{-7} с [20]. Поэтому существующие сегодня системы мониторинга изоляции, основанные на методах, измеряющих время распространения сигналов, являются сложными и дорогостоящими, поскольку они требуют синхронизации по времени высокочастотных аналоговых систем измерения и обработки, высокочастотных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) и, как следствие, высоких вычислительных мощностей, что значительно усложняет и повышает стоимость системы.

Поэтому в ходе исследования были выбраны метод и алгоритм регистрации и локализации ЧР на основе среднего уровня мощности принимаемого сигнала (*RSSI*), пропорционального амплитуде разрядов в течение заданного времени измерения. Метод не требует сверхвысокой синхронизации по времени. Поскольку учитывается только средний уровень мощности принятого сигнала, основное преимущество метода *RSSI* по сравнению с методами *TDOA*, *TOA* и *AOA* заключается в том, что он не требует сложного и дорогостоящего оборудования для синхронного сбора данных, что значительно удешевляет систему мониторинга.

Материалы и методы (Materials and methods)

При периодическом диагностировании отследить тенденцию деградации изоляции практически невозможно. Уровень сигнала существенно зависит от погодных условий, ЧР наибольшей амплитуды достигают в период высокой влажности окружающей среды (дождь, роса) или зимой – при температуре таяния снега и образования изморозевых отложений на поверхности изоляторов. Поэтому непрерывный контроль состояния изоляции имеет преимущество по сравнению с методами, основанными на периодическом использовании приборов дистанционного диагностирования.

В работе предлагается алгоритм регистрации и локализации неисправного изолятора на основе приема среднего уровня мощности электромагнитного сигнала разряда, пропорционального амплитуде ЧР. В предлагаемом методе в заданном УВЧ диапазоне измеряется средний уровень мощности электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха. Синхронная фильтрация с привязкой к фазе приложенного напряжения представляет собой накопление и усреднение данных по уровню мощности излучения относительно периода фазы.

В предлагаемом методе по всей ширине спектра излучения ЧР с использованием нескольких каналов измеряется средний уровень мощности сигнала с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха. Это дает возможность исключить случайные высокочастотные помехи, так как частичные разряды возникают при одном и том же напряжении при определенном угле фазы. Кроме того, полосы спектра частот, на которых уровень шума не позволяет выделить полезный сигнал, отбрасываются.

Такой подход позволяет отделить сигнал ЧР от других сигналов в радиоэфире, исключить сохранение осциллограмм сигналов и сложную математическую обработку. Так, например, помехи, излучаемые на подстанции, имеют частоту менее 400 МГц [20, 22].

Перед проведением лабораторных измерений нами просканирован спектр частот от 30 МГц до 2,75 ГГц, исключены из сканирования полосы частот, на которых имеются помехи, например, от сотовой связи 934 МГц и сигналы Wi-Fi на 2,4 ГГц. Сканирование проводилось с помощью портативного анализатора спектра *Signal Hound* USB-SA44B, работающий на частотах от 100 кГц до 12,4 ГГц, и трех видов антенн для различных частот (рамочная антенна на низких частотах, разработанная логопериодическая антенна на 800 МГц, штыревая широкополосная антенна на 868 МГц, штыревая широкополосная

антенна на 2,4 ГГц).

Частичный разряд широкополосный и поэтому для идентификации сигнала рассматривается широкий диапазон частот от 30 МГц до 2,7 ГГц с шагом до 5 МГц, но за исключением частот с высокочастотными помехами.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех устройствах контроля с приемными УВЧ антеннами, установленных в известных координатах. Рассмотрим на рисунке 1 модель электромагнитного поля, излучаемого ЧР [21].

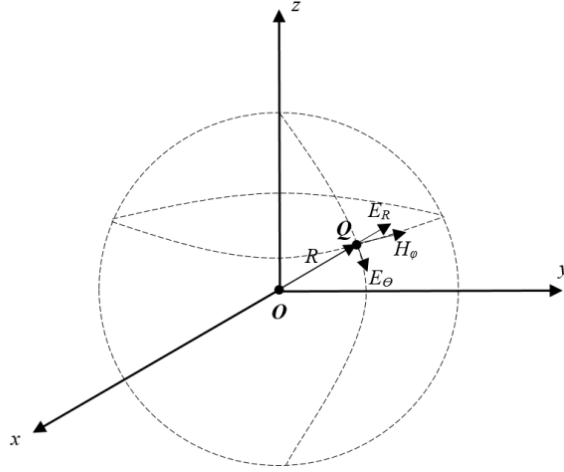


Рис.1. Модель электромагнитного поля излучения ЧР

Fig.1. Model of electromagnetic field of radiation of the CR

Предположим, что существует текущий элемент с током I и длиной l в точке O на рисунке 1. Согласно теории электромагнитных полей, для точки Q с расстоянием R до текущей ячейки O напряженность магнитного поля вдоль направления ϕ в точке Q может быть выражена как:

$$H_{\phi} = a_{\phi} \frac{Il}{4\pi} \sin \theta \left(\frac{jk}{R} + \frac{1}{R^2} \right) e^{-jkR} \quad (1)$$

Напряженность электрического поля в точке Q имеет направление E_R и направление E_{θ} , которые соответственно выражаются как:

$$E_R = a_R \frac{\eta_0 Il}{2\pi R^2} \cos \theta \left(1 + \frac{1}{jkR} \right) e^{-jkR} \quad (2)$$

$$E_{\theta} = a_{\theta} \frac{\eta_0 Il}{2\pi R^2} \sin \theta \left(1 + \frac{1}{jkR} - \frac{1}{k^2 R^2} \right) e^{-jkR} \quad (3)$$

где a_{θ} и a_R представляют единичные векторы трех направлений в системе координат, показанной на фиг. 1 соответственно; k – волновое число, которое можно обозначить как $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$, где ω , ϵ , μ – угловая частота тока, диэлектрическая и магнитная проницаемость соответственно, η_0 – собственный импеданс в вакууме, e^{-jkR} – разность фаз между точками Q и O . Поскольку ϵ и μ в воздухе равны 1, поэтому $k = \omega = 2\pi/\lambda$.

Поскольку время фронта волны импульсного тока ЧР обычно составляет наносекунды, длина волны электромагнитных волн, генерируемых ЧР, составляет около нескольких десятков сантиметров. Однако расположение устройств непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах, как правило, находится далеко от источника ЧР, что означает $R \gg \lambda/2\pi$. Следовательно, мы можем опустить $1/R^2$ и $1/R^3$ в (1)-(3), тогда:

$$H_{\phi} = a_{\phi} j \frac{Il}{2\lambda R} \sin \theta e^{-jkR} \quad (4)$$

$$E_{\theta} = a_{\theta} j \frac{\eta_0 \Pi}{2\lambda R} \sin \theta e^{-jkR} \quad (5)$$

Тогда:

$$|E_{\theta}| = \frac{\eta_0 \Pi}{2\lambda R} \sin \theta = M_1 \frac{\sin \theta}{R} \quad (6)$$

где M_1 является константой и относится только к текущей ячейке О.

В процессе генерации электрического разряда возбуждается электромагнитная волна, которая волновым фронтом облучает приемную антенну УВЧ с напряженностью падающей волны электрического поля E и напряженностью магнитного поля H , тогда плотность мощности S в этой точке может быть выражена как:

$$S = \frac{|E \cdot H^*|}{2} \quad (7)$$

Из (4), (5) и (7) мы имеем:

$$S = \frac{|E_{\theta}|^2}{2\eta_0} \quad (8)$$

Эффективная площадь антенны, обозначенная как A , выражается как:

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (9)$$

где G - коэффициент усиления антенны.

Из (8) и (9) принимаемая мощность антенны может быть записана как:

$$P = SA = \frac{G\lambda^2 |E_{\theta}|^2}{8\pi\eta_0} \quad (10)$$

Пусть сопротивление входной цепи антенны Z и амплитуда напряжения на выходе антенны, то есть амплитуда сигнала U , тогда мы имеем:

$$P = \frac{U^2}{Z} \quad (11)$$

Из (10) и (11) мы имеем:

$$U = M_2 |E_{\theta}| \quad (12)$$

где M_2 - постоянная величина, относящаяся только к используемой антенне.

Из уравнений (6) и (12) мы имеем:

$$U = M_1 M_2 \frac{\sin \theta}{R} \quad (13)$$

Уравнение (13) является основным выводом о связи между расстоянием до источника ЧР и амплитудной принимаемого сигнала. Следует отметить, что местоположение ЧР (θ и R) связано только со значением амплитуды (U).

Чтобы вывести уравнение локализации источника ЧР на основе значения амплитуды УВЧ, как показано на рисунке 2, мы предполагаем, что в точке О имеется источник ЧР, а в точке Q_i - антенна УВЧ.

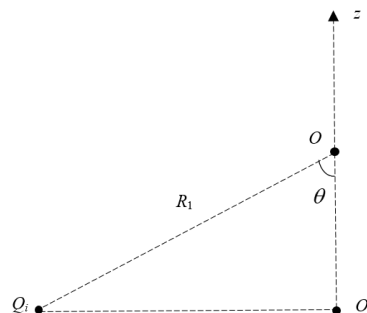


Рис. 2. Геометрическая схема между источником ЧР и УВЧ-антенной, где точка О - источник ЧР, точка Q_i - антенна УВЧ, R_1 - расстояние от источника до антенны

Fig. 2. Geometric diagram between CR source and UHF antenna, where O point is the source of CR, Q_i point is the UHF antenna, R_1 is the distance from source to antenna

Тогда

$$\sin \theta_i = \frac{Q_i O'}{O Q_i} = \frac{Q_i O'}{R_i} \quad (14)$$

Пусть координата точки О равна (x, y, z) , а координата точки Q_i равна (x_i, y_i, z_i) , тогда

$$\frac{\sin \theta_i}{R_i} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (15)$$

Следовательно, если используются четыре устройства непрерывного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтных изоляторов для определения дефектов в изоляторах, т.е. $i = 1, 2, 3, 4$, из (13) мы получаем

$$\begin{aligned} \frac{\sin \theta_2}{R_2} &= \frac{U_2}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \\ \frac{\sin \theta_3}{R_3} &= \frac{U_3}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \\ \frac{\sin \theta_4}{R_4} &= \frac{U_4}{U_1} \frac{\sin \theta_1}{R_1} \end{aligned} \quad (16)$$

Координата источника ЧР может быть получена путем решения (15) и (16).

2. Метод определения источника разряда по модели затухания электромагнитного излучения.

Разработка устройства (device development)

На основе описанного в предыдущей главе метода было разработано устройство для диагностики ВИ [23]. Устройство представляет собой диагностическую часть, состоящую из электромагнитного датчика, датчиков фазы, температуры и влажности, микропроцессорную часть с памятью, передающую часть, системы автономного питания (рис.3.)

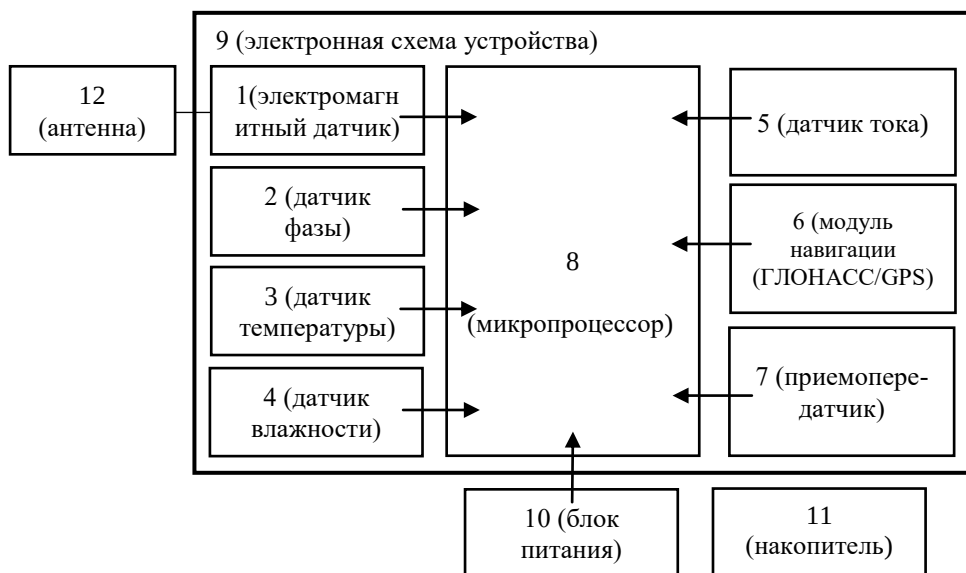


Рис.3. Структурная блок-схема

Fig.3. Structural flowchart

Устройства устанавливаются на фазные провода и формируются в группу для каждой опоры. Электромагнитный приемник 1 с помощью антенны непрерывно сканирует широкий диапазон частот узкими полосами по 5 МГц с усреднением, а полосы на которых уровень шума не позволяют выделить полезный сигнал – отбрасываются программным способом.

Все полученные данные синхронизируются в микропроцессорном модуле 8 с температурой и влажностью окружающего воздуха, полученные с помощью соответствующих датчиков 3, 4. Уровень влажности и температуры позволяет более точно определять наличие разрядов и дефектов в изоляторах от ЧР.

Далее данные с микропроцессора 8 передаются с помощью приемопередатчика 7 на диспетчерский пункт, где в специально разработанной программе (рис. 4) идет обработка данных с устройств и выявление дефектной гирлянды изоляторов.

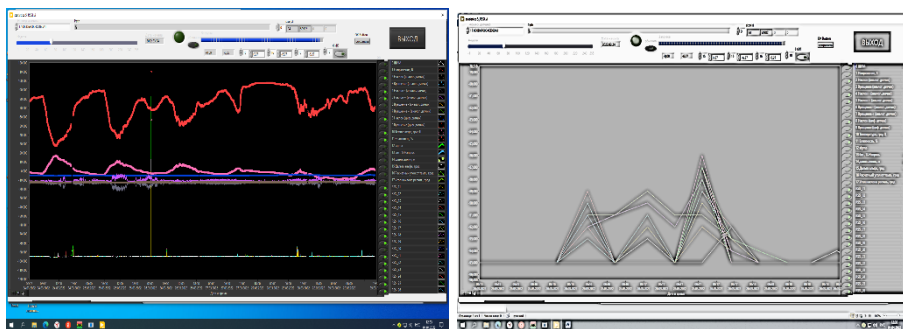


Рис. 4. Программное обеспечение обработки данных Fig. 4. Data processing software

На данный момент проводится опытная эксплуатация устройств мониторинга, установленных в ПАО «Татнефть» на ЛЭП 35 кВ.

Обсуждение результатов (Discussion of the results)

С целью проведения исследования разработанного метода и устройства мониторинга для регистрации ЧР в изоляторах в научно-исследовательской лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ» «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов энергетики» разработан лабораторный стенд [24], который состоит из следующих элементов: источник высокого напряжения АИД-70М, имеющего достаточно низкий уровень фоновых шумов с тем, чтобы иметь возможность измерять нормированную амплитуду частичного разряда при нормированном испытательном напряжении; дефектный и бездефектный стеклянный изолятор ПС70Е; защитное сопротивление, чтобы уменьшить фоновый шум от источника питания; и измерительная система, состоящая из электромагнитных датчиков, датчика фазы напряжения, соединительного кабеля, цифрового осциллографа и АЦП с ПК.

На лабораторном стенде проведен эксперимент с дефектным и бездефектным стеклянными изоляторами, находящимися под напряжением до 8,5 кВ. В ходе эксперимента замерялся средний уровень мощности электромагнитного сигнала с помощью высокочастотной антенны и электромагнитного модуля E70-868T14S. Уровень мощности накапливался и усреднялся в пределах одного периода сетевого напряжения. На рисунке 5 представлена схема проведения эксперимента.

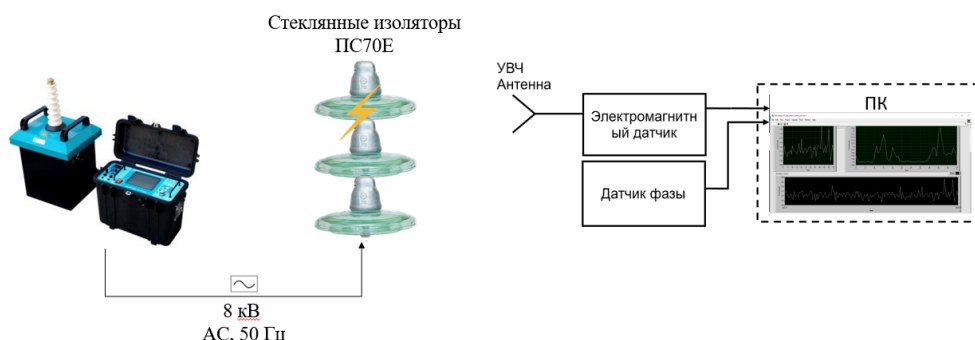


Рис.5. Схема проведения эксперимента

Fig. 5. Scheme of the experiment

На рисунке 6 представлена синхронная фильтрация среднего уровня мощности электромагнитного излучения относительно фазы приложенного напряжения. Данные накапливались и усреднялись в течение 15 минут (45000 периодов напряжения). Результаты измерения среднего уровня мощности электромагнитного излучения при подаче напряжения на бездефектный изолятор представлены на графике линией №1. Так как частичных разрядов в изоляции в этом случае не имеется, то результат показывает высокочастотный шум. Линией №2 показан результат измерения электромагнитным датчиков среднего уровня мощности при подаче напряжения на бездефектный изолятор.

Разница в принятой мощности сигналов на 2 дБм в каждом полупериоде сетевого напряжения позволяют выделить полезный сигнал и отделить частичные разряды, возникающие в дефекте.



Рис.6. Синхронная фильтрация среднего уровня мощности электромагнитного излучения в течение 15 минут (45000 периодов напряжения) относительно фазы приложенного напряжения у бездефектного и дефектного изоляторов. 1 – бездефектный изолятор, 2 – дефектный изолятор, 3 – фаза сетевого напряжения.

Fig. 6. Synchronous filtration of the average level of electromagnetic radiation power for 15 minutes (45,000 stress periods) relative to the phase of applied voltage at the defective and defective insulators. 1 - defective insulator, 2 - defective insulator, 3 - phase of the network voltage.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех датчиках. Для проверки теории и с целью соотношения расстояния от источника ЧР до одного из устройств контроля был проведен эксперимент по регистрации затухания электромагнитного (ЭМ) сигнала от ЧР (рис. 4), в котором один ЭМ датчик отдаляли от источника разряда на расстояния от 1 до 40 метров с шагом 1 метр и фиксировали в каждой точке значение мощности электромагнитного излучения. Схема эксперимента представлена на рисунке 7.



Рис. 7. Схема эксперимента по определению зависимости затухания ЭМ сигнала от расстояния

Fig. 7. Experiment scheme for determination of depreciation of EV signal from distance

В ходе эксперимента получена зависимость уровня мощности от расстояния до источника, представленная на рисунке 8, где черной линией (квадратные маркеры) указан полученный экспериментально график зависимости, а красной линией (круглые маркеры) – аппроксимация на основе алгоритма по уравнению [16, с. 5]

$$P_1 = P_0 - 10\alpha \lg \frac{d_1}{d_0}, \quad (17)$$

где P_1 – измеренный принимающим узлом уровень мощности сигнала в дБм, P_0 – уровень мощности сигнала в опорной точке, α – показатель потерь на пути, равный 1,4, d_1 – расстояние от источника разряда до точки измерения, d_0 – расстояние между опорной точкой и источником разряда.

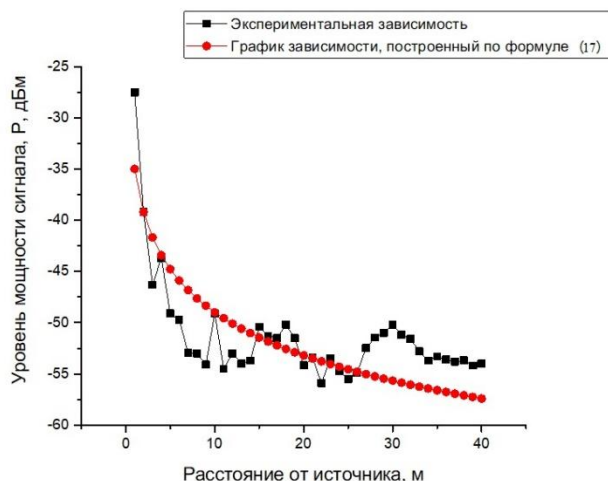


Рис.8. График зависимости уровня мощности сигнала от расстояния

Коэффициент корреляции Пирсона между экспериментальными и модельными данными составил 0,78. Значение P (p -value) составляет $3,8 \cdot 10^{-9}$. Полученная зависимость уровня мощности ЭМ сигнала подтверждает возможность использования предложенного метода.

Таким образом, имея одно приемное устройство, по уровню мощности электромагнитного излучения мы можем определить расстояние до источника разряда, но не его пространственное положение. Для того чтобы определить последнее, нам необходимо еще 3 таких же устройства и, применить систему уравнений (16).

Заключение (Conclusions)

Разработан метод регистрации и локализации неисправного изолятора на основе приема среднего уровня мощности электромагнитного сигнала разряда, пропорционального амплитуде ЧР. В предлагаемом методе в заданном УВЧ диапазоне измеряется средний уровень мощности электромагнитного излучения с синхронной фильтрацией с привязкой к фазе приложенного напряжения, с учетом влажности и температуры окружающего воздуха.

Используемый подход позволяет отделить сигнал ЧР от других сигналов в радиоэфире, исключить сохранение осциллограмм сигналов и сложную математическую обработку.

На разработанном лабораторном стенде проведен предварительный эксперимент с дефектным и бездефектным стеклянными изоляторами ПС70Е, находящимися под напряжением. Результаты измерения среднего уровня мощности электромагнитного излучения при подаче напряжения на дефектный изолятор на 2 дБм выше в каждом полупериоде сетевого напряжения, что позволяет выделить полезный сигнал и отделить частичные разряды, возникающие в дефекте. Планируется проведение экспериментов с различными видами изоляторов и с различными дефектами.

Пространственное определение дефектного изолятора производится с помощью измерения амплитуды мощности электромагнитного излучения одновременно на четырех датчиках, установленных в известных координатах.

Проведены предварительные эксперименты с одним электромагнитным приемником с УВЧ антенной и получена зависимость уровня мощности от расстояния до источника. Для того чтобы определить пространственное положение необходимо еще 3 таких же устройств. Планируется проведение дополнительных исследований.

Для практической реализации разработанного метода разработано устройство диагностики ВИ. Устройства устанавливаются на фазные провода и передают данные между собой и на блок приема-передачи по протоколу Zigbee. Предлагаемый метод диагностики высоковольтных изоляторов позволяет удаленно и непрерывно производить контроль технического состояния ВЛЭП без вывода ее из эксплуатации.

Литература

1. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». Утверждено решением Совета директоров ПАО «Россети» от 31.03.2021. (протокол от 02.04.2021 № 450)

2. Зарипов Д.К., Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции. // Известия высших учебных заведений.

Проблемы энергетики. 2006. № 3-4. С. 56-60.

3. Бирюлин В. И., Куделина Д. В., Горлов А. Н. Определение напряженности электрического поля высоковольтных воздушных линий при коронном разряде // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 4(48). С. 85-93.

4. Wang H., Cheng L., Liao R. et. al. Non-destructive testing method of micro-debonding defects in composite insulation based on high power ultrasonic. // High Voltage, vol. 4, no. 3, pp. 167–172, Sep. 2019.

5. Базанов В. П., Базанов В. П., Спирин М. В. и др. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35 -220 кВ // Энергетик. 2000. № 4. С. 16-17.

6. Голенищев-Кутузов А. В., Ахметвалеева Л. В., Еникеева Г. Р. и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127.

7. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>.

8. Хазиева Р. Т., А. В. Мухаметшин. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 145-155.

9. Zheng Q., Luo L., Song H., et al. Intelligent learning approach for UHF partial discharge localisation in air-insulated substations. // High Voltage. 2020. V. 5, no. 5, pp. 583–590.

10. Калинин Ю.А., Второва Л.В., Калинин Ф.А. Устройство ультразвукового контроля высоковольтных изоляторов под напряжением. Патент на полезную модель № RU(11) 59 258(13) U1. Заявка 2006129500/22, 14.08.2006, опубл. 10.12.2006 Бюл. 34.

11. Голенищев-Кутузов, А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018; 20 (3-4); с. 99-107.

12. 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. Т. 19. № 5-6.

13. Biswas S., Koley C., Chatterjee B., Chakravorti S. A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2012, 19, pp. 18–28.

14. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Синюгин И. Е. [и др.]. Дистанционная диагностика высоковольтных полимерных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 7-8. С. 77-82.

15. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Потапов А.А., и др. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21 (4). С. 123-133.

16. Khan U., Lazaridis P., Mohamed H., et al. An efficient algorithm for partial discharge localization in high-voltage systems using received signal strength // Sensors. 2018. Vol. 18, 4000; doi:10.3390/s18114000.

17. Portugues I.E., Moore, P.J., Glover I.A. et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations // IEEE Trans. Power Deliv. 2009. 24 (1), pp. 20–29.

18. Iorkyase T., Tachtatzis Ch., Lazaridis P., et al. Low-complexity wireless sensor system for partial discharge localization // IET Wireless Sensor Systems, V. 9, Is. 3. June 2019, pp. 158-165.

19. PD-Map – система оперативного поиска и локации дефектов оборудования открытых высоковольтных подстанций. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://dimrus.ru/pdmap.html>.

20. Вдовиков В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007.

21. Jia T., Zheng N., Sun A., et al. Partial Discharge Localization through a UHF Signal Amplitude Strength Attenuation Approach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 486, 2019 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019) 28–31 March 2019, Hangzhou, China.

22. Zhou N., Luo L., Sheng G. and Jiang X. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation // in IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. V. 34 (4), pp. 1291-1299. doi:

10.1109/TPWRD.2018.2882230.

23. Иванов Д.А., Горячев М.П., Садыков М.Ф., и др. Устройство оперативного онлайн-мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи. Патент на полезную модель RU211126U1, 23.05.2022. Заявка № 2020124117 от 21.07.2020.

24. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., и др. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80-87.

Авторы публикации

Галиева Татьяна Геннадьевна – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд-т техн. наук, доцент, н.с. лаборатории физического приборостроения Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского (ФИЦ КазНЦ РАН); доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника», Казанского государственного энергетического университета.

Садыков Марат Фердинантович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией физического приборостроения ФИЦ КазНЦ РАН; заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники», Казанского государственного энергетического университета.

Андреев Николай Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанского государственного энергетического университета.

Хамидуллин Ильдар Ниязович – студент, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Polozhenie PAO «Rosseti» «O edinoi tekhnicheskoi politike v elektrosetevom komplekse». Utverzhdeno resheniem Soveta direktorov PAO «Rosseti» ot 31.03.2021. (protokol ot 02.04.2021 № 450).

2. Zaripov DK, Lopukhova TV. Metod distantsionnoi diagnostiki vysokovol'tnoi izoliruyushchei konstruksii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2006; № 3-4:56-60.

3. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Opredelenie napryazhennosti elektricheskogo polya vysokovol'tnykh vozdushnykh linii pri koronnom razryade // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020; 12(4(48)): 85-93.

4. Wang H., Cheng L., Liao R. et. al. Non-destructive testing method of micro-debonding defects in composite insulation based on high power ultrasonic. *High Voltage*. 2019;4(3):167–172.

5. Bazanov VP, Bazanov VP, Spirin MV. Et al. Ul'trazvukovoi metod kontrolya farforovoi izolyatsii vozdushnykh linii elektroperedachi 35 -220 kV. *Energetik*. 2000; 4; 16-17.

6. Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR, et al. Distantsionnaya diagnostika defektov v vysokovol'tnykh izolyatorakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020; T. 22 (2):117-127.

7. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies* 2021,14,5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>

8. Khazieva RT, Mukhametshin AV. Razrabotka i issledovanie skhemy izmereniya toka utechki pri ispytanii izolyatsii povyshennym vypriamlennym napryazheniem // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021; 23(4): 145-155.

9. Zheng Q., Luo L., Song H., et al. Intelligent learning approach for UHF partial discharge localisation in air-insulated substations. *High Voltage*. 2020;5(5):583–590.

10. Kalinchuk YuA, Vtorova LV, Kalinchuk FA. Ustroistvo ul'trazvukovogo kontrolya vysokovol'tnykh izolyatorov pod napryazheniem. Patent na poleznuyu model' № RU(11) 59 258(13) U1. Zayavka 2006129500/22, 14.08.2006, opubl. 10.12.2006 Byul. 34.

11. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Distantsionnyi kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh vysokovol'tnykh izolyatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20 (3-4): 99-107.

12. Zaripova AD, Zaripov DK, Usachev A. E. Kriterii vyyavleniya defektov oborudovaniya dlya teplovizionnoi sistemy kontrolya elektricheskoi podstantsii. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2017; 19 (5-6).

13. Biswas S., Koley C., Chatterjee B., Chakravorti S. A methodology for identification and localization of partial discharge sources using optical sensors. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012, 19:18–28.

14. Katkov VI, Evdokimov YuK, Sagdiev RK, Okhotkin GP. Sposob i ustroystvo beskontaktnogo distantsionnogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh lineinykh izolyatorov vozdukhnykh linii elektropredach / Patent № RU2753811 C1, 23.08.2021 Byul.№24. Zayavka 2020126832, 29.04.2020.

15. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Potapov AA, et al. Ispol'zovanie beskontaktnykh metodov diagnostiki vysokikh elektricheskikh polei. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2019; 21 (4):123-133.

16. Khan U., Lazaridis P., Mohamed H., et al. An efficient algorithm for partial discharge localization in high-voltage systems using received signal strength. *Sensors*. 2018;18, 4000; doi:10.3390/s18114000.

17. Portugues I.E., Moore, P.J., Glover I.A. et al. RF-based partial discharge early warning system for air-insulated substations. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2009;24 (1):20–29.

18. Iorkyase T., Tachtatzis Ch., Lazaridis P., et al. Low-complexity wireless sensor system for partial discharge localization. *IET Wireless Sensor Systems*, 2019;9(3):158-165.

19. PD-Map – sistema operativnogo poiska i lokatsii defektov oborudovaniya otkrytykh vysokovol'tnykh podstantsii. [Elektronnyi resurs]: Rezhim dostupa: <https://dimrus.ru/pdmap.html>

20. Vdoviko V.P. Chastichnye razryady v diagnostirovanii vysokovol'tnogo oborudovaniya. Novosibirsk: Nauka, 2007.

21. Jia T., Zheng N., Sun A., et al. Partial Discharge Localization through a UHF Signal Amplitude Strength Attenuation Approach. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 486, 2019 4th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE 2019) 28–31 March 2019, Hangzhou, China.

22. Zhou N., Luo L., Sheng G. and Jiang X. High Accuracy Insulation Fault Diagnosis Method of Power Equipment Based on Power Maximum Likelihood Estimation. in *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019;34(4):1291-1299. doi: 10.1109/TPWRD.2018.2882230.

23. Ivanov DA, Goryachev MP, Sadykov MF et al. Ustroystvo operativnogo onlain-monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh linii elektropredachi. Patent na poleznuyu model' RU211126U1, 23.05.2022. Zayavka № 2020124117 ot 21.07.2020.

24. Galieva TG, Ivanov DA, Sadykov MF, et al. Laboratornyi stend dlya razrabotki metoda i sistemy nepreryvnogo beskontaktnogo nerazrushayushchego kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsionnogo oborudovaniya. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2021; 5 (179): 80-87.

Authors of the publication

Tatyana G. Galieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmitry A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Kazan, Russia.

Marat F. Sadykov – Kazan State Power Engineering University, Zavoisky Physical-Technical Institute FRC «Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences», Kazan, Russia.

Nikolai K. Andreev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ildar N. Khamidullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

06.06.2022 г.

Отредактировано

11.07.2022 г.

Принято

14.07.2022 г.

КОНЦЕПЦИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ЦБП

Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия
mail@gturp.spb.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка и реализация комплекса теоретических и практических рекомендаций по созданию научно обоснованных тепловых схем технологических процессов производства целлюлозы и бумаги, интенсификации теплообменных процессов при экономном расходовании энергоресурсов. *МЕТОДЫ.* Предложен метод термодинамического анализа на основе приращения эксергий в процессе взаимодействия тепловых потоков, позволяющий оценить энергетическую эффективность как отдельных аппаратов ЦБП, так и всего технологического потока; математическая зависимость между эксергетическим КПД технологических элементов и эксергетическим КПД сложной тепловой схемы; принципиальная схема теплорекуперационной установки сушильной части БДМ с замкнутым циклом воздуха, подаваемого на сушку. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведены термодинамические исследования по оценке энергетической эффективности оборудования ЦБП, получена зависимость коэффициента преобразования ТНУ от термодинамических свойств рабочих тел. Подробно рассмотрен процесс получения сульфатной целлюлозы. Показана низкая энергетическая эффективность существующей схемы, эксергетический КПД - 48%. Основная доля затраченной эксергии (71% от подведенной в схему) относится к процессу в СРК). Предложена схема гидрохимической переработки древесной технологической щепы, в которой отсутствуют СРК, вращающаяся печь обжига известняка. Снижаются риски от загрязнений воздушного и водного бассейнов. Приведены основные направления повышения энергоэффективности получения лигносульфонатов при сульфитном производстве целлюлозы. *ОБСУЖДЕНИЕ.* Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО). Положительные результаты исследований в области химии воды при сверхкритических параметрах дают основание прогнозировать успех в направлении разработки энергоэффективной технологии получения целлюлозы при воздействии на технологическую щепу водой при субкритических и сверхкритических параметрах. Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом. Термодинамическими исследованиями установлен низкий эксергетический КПД сушильной части БКДМ, который определяется неэффективной работой теплорекуперационной установки. Этим и определяется большой подвод пара низкого давления с ТЭЦ. Показаны основные направления по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БКДМ. Рассмотрены вопросы когенерации в целлюлозно-бумажной промышленности. Значительное внимание уделено экологической безопасности энергоэффективных технологий. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В настоящей работе приведены основные направления по повышению энергетической эффективности основных технологических процессов получения продукции целлюлозно-бумажных предприятий. На основании анализа эксергетического КПД отдельных элементов оборудования и в целом технологических схем выявлены «узкие» места и предложены мероприятия по их совершенствованию.

Ключевые слова: энергосбережение; энергетическая эффективность; эксергетический КПД; целлюлоза; технологические процессы; экологические процессы.

Для цитирования: Луканин П.В., Казаков В.Г., Зверев Л.О. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 178-191. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191.

CONCEPT OF PPI ENERGY TECHNOLOGY COMPLEX UPGRADING

PV. Lukanin, VG. Kazakov, LO. Zverev

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
Saint Petersburg, Russia

mail@gturp.spb.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development and implementation of a set of theoretical and practical recommendations for creating scientifically founded heat flow diagrams for pulp and paper processes, intensifying heat exchanging processes under the economical use of energy resources. *METHODS.* The method of thermodynamic analysis on the basis of exergy increments in the process of interaction of heat flows is proposed, it allows evaluating the energy efficiency of both individual PPI units and the entire process flow; mathematical relationship between exergy efficiency of process elements and that of a complex heat flow diagram; schematic diagram of a heat recuperator of PBM drying section with a closed loop for the air delivered to drying. *RESULTS.* Thermodynamic analysis was made to evaluate energy efficiency of PPI equipment; the relationship between conversion factor of thermal pumping plant and thermodynamic properties of actuating media was obtained. Sulfate pulp production was considered in detail. The low energy efficiency of the existing process flow diagram is shown, with its exergy efficiency being equal to 48%. A main share of the consumed exergy (71% of the incoming one) relates to the recovery boiler processes. The process flow diagram consisting of hydrochemical pulpchips processing is suggested. The recovery boiler and rotary-type lime kiln are removed from that flow diagram. Risks of air and water basins pollution fall. The main ways for increasing energy efficiency of lignosulfonates production at sulfite pulp plants are mentioned. *DISCUSSION.* Further development of energy efficient pulp technologies can be forecasted on the basis of application of fluid technologies such as supercritical water oxidation (SCWO). The positive results of research in water chemistry under supercritical parameters give promise to predict success in developing the energy efficient pulp technology by exposing pulpchips to water at the subcritical and supercritical parameters. Paper and board production relates to the complex physical–chemical and heat-wet processes. The thermodynamic studies allowed determining low exergy efficiency of a drying section of paper and board machine that is because of inefficient operation of the heat recuperation unit. This circumstance is responsible for the bulk supply of low pressure steam from a heat and power plant. The main ways for improving the heat flow diagram of PBM drying section are shown. Cogeneration issues in the pulp and paper industry are considered. The essential attention is given to environmental safety of energy efficient technologies. *CONCLUSION.* The paper presents main ways for increasing energy efficiency of basic production processes at pulp and paper enterprises. Based on the analysis of exergy efficiency of individual equipment elements and the entire process flow diagrams bottlenecks were revealed and measures for their removal were suggested.

Key words: energy saving; energy efficiency; exergy efficiency; pulp; processes; environmental processes.

For citation: PV. Lukanin, VG. Kazakov, LO. Zverev. Concept of ppi energy technology complex upgrading. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):178-191. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191.

Введение и литературный обзор

Главными целями основных положений «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р, является определение путей и условий наиболее эффективного использования энергетических ресурсов, формирование роли энергии как основного фактора, определяющего повышение качества жизни населения.

В Указе Президента РФ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» поставлен вопрос о повышении энергоэффективности и сформулирована целевая задача – снизить энергоёмкость валового внутреннего продукта (ВВП) на 40 % по сравнению с 2007 годом.

ЦБП является одной из самых энергоёмких отраслей промышленности. В структуре себестоимости производства целлюлозы 50 % затрат составляет исходное сырьё и примерно 40 % – энергозатраты. В себестоимости переработки технологической щепы для получения

целлюлозы статья энергозатрат составляет более 80 %, при этом стоимость древесины и энергетических затрат непрерывно растет. Заводы по выпуску целлюлозы уже сейчас работают на уровне рентабельности. На процессы снижения стоимости древесины и энергии влиять невозможно – они регулируются рынком. Работы, направленные на существенное снижение удельного расхода древесины в процессе производства, отсутствуют.

В таком же состоянии находится производство бумаги и картона. Это производство является крупным потребителем теплоты пара низкого давления. На производство отдельных видов бумаги расходуется до 20 ГДж/т.

Следует отметить не только большой удельный вес энергозатрат в себестоимости целлюлозы и бумаги, но и непрерывный рост цен на энергетическую составляющую.

В сложившихся условиях основным путем заметного повышения рентабельности процесса получения целлюлозы и бумаги является снижение энергетических затрат в технологических потоках целлюлозно-бумажного производства, что становится актуальной задачей на современном этапе.

Рациональное потребление топливно-энергетических ресурсов, отвечающее требованию времени должно рассматриваться с позиций энергосбережения, соответствовать высокой энергоэффективности, экологическому обеспечению технологических процессов при минимизации отвода в окружающую среду вредных газов.

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) относится к энергоемким отраслям промышленности. Основной продукцией предприятий ЦБП являются: сульфатная и сульфитная целлюлоза, бумага и картон. Производство сульфатной целлюлозы в нашей стране является определяющим и составляет около 90%, по сульфитному способу получают до 10% целлюлозы [1]. В себестоимости производство целлюлозы 50% затрат составляет исходное сырье и примерно 40% - энергозатраты. В целом технология производства сульфатной целлюлозы отвечает современному уровню лучших заводов зарубежных фирм [2]. Она построена на принципах ресурсо- и энергосбережения.

Получение энергии из продуктов переработки черного щелока практически полностью обеспечивает собственные нужды производства [3]. Избыточная, против необходимой для производства целлюлозы энергия отводится из процесса для обеспечения тепло и электроснабжения жилых массивов.

Следует отметить, что энергозатратными, капиталоемкими и экологически опасными являются аппаратурно-технологические схемы регенерации химикатов в содорегенерационных котлах (СРК), печах декарбонизации, выпарных станциях и варочных котлах [1].

За последние 50 лет в стране не построено ни одного крупного комбината. Поэтому изыскание способов снижения потребления энергоресурсов является приоритетной задачей модернизации целлюлозного производства. Научно обоснованный подход к разработке технологий теплоты в процессах производства целлюлозы основывается на термодинамическом (эксергетическом) исследовании технологических процессов. Согласно теории эксергетического анализа [4], эксергетические потери представляют величину пропорциональную расходу топлива для функционирования рассматриваемого технологического процесса, а эксергетический КПД – относительная характеристика термодинамического совершенства технологического процесса.

Ю.О. Лахтиков отмечает, что, в то время как практически все российские ЦБК являются энергопотребляющими, в мире уже есть много комбинатов, не только не использующих покупные энергоносители, но и производящих значительное количество энергии на продажу. Так, в августе 2017 года компания *Metsa* завершила крупнейший инвестиционный проект в ЛПК Финляндии, стоимостью 1,2 Млрд. Евро, в г. Энекоски запустила новый целлюлозный завод. Завод производит 1,3 млн. т целлюлозы, а также талловое масло, скипидар, лигнин, твердое биотопливо на основе коры. Кроме того, он производит 1,8 ТВтч электроэнергии (2,5% всей электроэнергии в стране) исключительно из отходов основного производства. Завод генерирует в 2,4 раза больше электроэнергии, чем потребляет [5].

Е.С. Алексеев, А.Ю. Алентьев, А.С. Белова подчеркивают, что дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий [6].

Научная значимость.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказана эффективность предлагаемых энергосберегающих технологий производства целлюлозы и бумаги;
- применительно к целлюлозно-бумажной промышленности предложено решение научно-технической проблемы по экономии энергетических ресурсов, охране окружающей среды и диверсификации технологических процессов целлюлозно-бумажного производства;
- изложены общие подходы к энергосбережению в ЦБП с учетом наилучших доступных технологий;
- раскрыты основные причины, позволяющие с большей степенью достоверности оценить энергетическую эффективность как отдельных видов оборудования, так и в целом сложных технологических систем целлюлозно-бумажного производства;
- изучено влияние режимных параметров оборудования ЦБП на критерий оптимальности, что позволило повысить энергетическую эффективность варочного оборудования, выпарных установок, СРК, обжиговых печей декарбонизации извести, сушильной части БДМ.

Практическая значимость

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны технологии энергосбережения в ЦБП;
- определены основные направления энергетической эффективности производства сульфатной и сульфитной целлюлозы.
- создана методология оценки эффективности работы оборудования ЦБП, в том числе с учетом энергосберегающих технологий.
- представлены новые технологические схемы энергосберегающих и экологически безопасных технологий получения продукции ЦБП.

Материалы и методы

На основе обследования целого ряда производств целлюлозы установлено, что технологический процесс получения сульфатной целлюлозы характеризуется низким (48%) эксергетическим КПД. Такой низкий эксергетический КПД определяется, прежде всего, высокой степенью необратимости процессов выпаривания воды из раствора и теплопередачи от продуктов сгорания к черному щелоку в СРК.

В направлении уменьшения эксергетических потерь ведутся интенсивные исследования за рубежом [7]. К ним следует отнести, например, работы [8] по выводу СРК из технологического процесса с заменой его автоклавным гидрохимическим процессом. К другим техническим решениям следует отнести повышение концентрации раствора черного щелока перед СРК. Нами предложен [9] способ глубокого охлаждения паросодержащих дымовых газов после СРК с передачей теплоты на выпаривание слабого черного щелока.

Возможность реализации такого инновационного технического решения определяется следующими соображениями. Как известно, СРК выполняет технологическую и энергетическую функцию в установке энерготехнологического комплекса производства целлюлозы. Технологическая функция состоит в регенерации щелочей, энергетическая – в получении пара давлением 6-7 МПа.

Одним из основных технологических процессов производства сульфатной целлюлозы (рис.1) является варка технологической щепы с получением черного щелока в варочных котлах. Современная энерготехнологическая установка не ограничивается варочными котлами. Она дополнена контурами регенерации химикатов (натриевых, сульфидных и сульфатных), а также извести. В контур регенерации натриевых щелоков включен СРК в котором получают плав. Плав растворяют слабым белым щелоком. После разделения жидкой и твердой фаз суспензию обрабатывают раствором оксида кальция: раствор натриевых солей возвращают в варочный котел, а известняк – во вращающуюся известерегенерационную печь для обжига при температуре 1250 °С. Обожженный известняк направляют на каустизацию зеленого щелока.

Для замыкания цикла по раствору в энерготехнологическую установку включена выпарная установка. Энергетические и капитальные затраты, а также экологическая безопасность процесса производства сульфатной целлюлозы определяется не только основным технологическим процессом- варкой технологической щепы в варочном котле, но

и циклами регенерации химикатов. Именно вспомогательные процессы и определяют энергозатраты, капитальные затраты и экологическую опасность процессов в энерготехнологической установке производства целлюлозы.

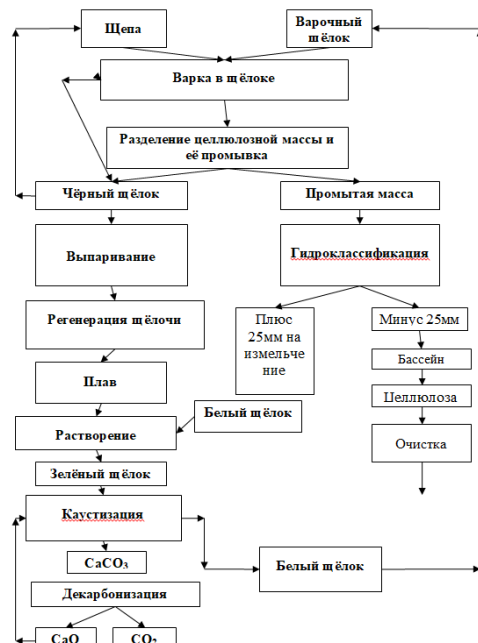


Рис. 1. Принципиальная схема производства сульфатной целлюлозы Fig. 1. Schematic diagram of sulfate pulp production

В предложенной энерготехнологической установке (рис.2) [9] отсутствуют такие составляющие с высокими капитальными затратами как, СРК, вращающаяся печь обжига известняка. Снижаются риски от загрязнений воздушного и водного бассейнов.

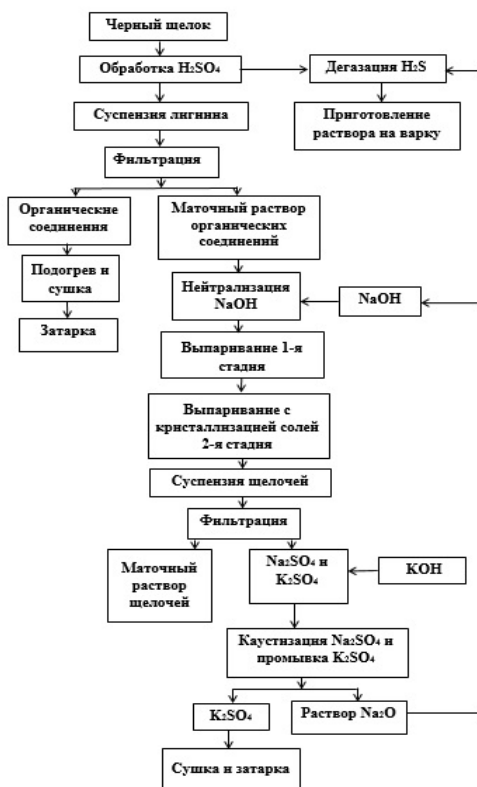


Рис. 2. Схема гидрохимической переработки древесной технологической щепы Fig. 2. Hydrochemical pulpchips processing diagram

В основе предложенной технологии лежит установленная в эксперименте возможность [9] вывода лигнин-углеводного комплекса из слабого черного щелока путем его обработки серной кислотой с последующим выпариванием раствора с кристаллизацией натриевых солей.

Сульфат натрия из этой смеси, в количестве необходимом для варки технологической щепы, восстанавливают до сульфида натрия. При этом в качестве топлива может быть использованы органические соединения, адсорбированные содосульфатной смесью при ее кристаллизации в выпарной батарее. Содосульфатную смесь растворяют в воде, раствор каустизируют и далее перерабатывают по принятой технологии. Частично [10] лигнин может быть выведен из раствора черного щелока при его карбонизации. Дальнейшее выделение лигнина и его структурных соединений возможно при кристаллизации в процессе выпаривания на развитой поверхности соды и сульфата натрия путем адсорбции. Остаток лигнина в маточном растворе натриевых солей после выпаривания возвращается на карбонизацию.

Переработкой черного щелока на лигнин и др. органические соединения получается экологически чистое топливо с высокой (в сравнении с черным щелоком) теплотой сгорания. В предлагаемой технологии лигнин может быть использован не только в качестве энергетического топлива, но и как ценного химического сырья.

Итак, по предлагаемому способу огнетехнические процессы в СРК заменяют гидрохимическими с получением натриевых солей и топлива на основе лигнина.

Водяной пар, получаемый в результате подготовленного к сжиганию лигнина, генерируется в обычном энергетическом котле. Продукты сгорания, как полученные от переработки возобновляемых источников энергии, согласно Киотского протокола и Парижского соглашения, являются экологически безопасными с точки зрения отвода парниковых газов в окружающую среду.

Варка технологической щепы. Термодинамическими исследованиями установлено, что эксергетический КПД этого технологического процесса низок и составляет 70%. Решение этой проблемы во многом определяются успехами в области гидродинамики волокнистых суспензий. Положительные результаты исследований в этом направлении позволяют:

- организовать процесс варки по однопоточной схеме;
- осуществить высокую степень регенерации теплоты (с КПД 90-95%) суспензии сваренной технологической щепы. Теплота используется для нагрева исходной суспензии технологической щепы в противоточном теплообменнике или теплообменнике смешанного тока. Такая регенерация теплоты позволит сократить расход пара от внешнего источника на порядок;
- модернизировать аппаратно-технологическую схему варки технологической щепы. Модернизация заключается в том, чтобы исключить эксплуатационно-сложную, энергетически не эффективную схему варки технологической щепы на непрерывно действующую однопоточную компактную автоклавную установку. В такой установке упрощается управление технологическим процессом с прогнозируемым получением выходных параметров.

Выпаривание черного щелока. Выпаривание черного щелока, с точки зрения степени термодинамического совершенства, в целом, отвечает $\eta = 82\%$ современным требованиям. Между тем следует заметить, что этот технологический процесс занимает первое место по подводу пара низкого давления с ТЭЦ в технологической цепочке производства целлюлозы и соответствует 1,5 т/т целлюлозы. Поэтому изыскание способов снижения расхода пара в этот процесс приобретает особую значимость [10].

Снижение расхода пара с ТЭЦ на выпаривание черного щелока реализуется по следующим основным направлениям:

- использование для выпаривания вторичных энергетических ресурсов. К вторичным энергетическим ресурсам следует отнести, прежде всего, паросодержащие дымовые газы СРК, корьевых котлов, а также дымовые газы технологических печей и энергетических котлов с глубоким (до 50°C) их охлаждением. Только использование теплоты газов СРК и корьевых котлов позволит сократить расход пара на выпаривание черного щелока на 30% - 50%;
- оптимизация параметров работы выпарных батарей. Как показали исследования по оптимизации числа ступеней выпаривания (по технико-экономическому критерию), их оптимальное количество, при существующей конъюнктуре цен на энергию составляет 8 -10 ступеней против 6-7 принятых в настоящее время. Это техническое решение позволит сократить расход пара с ТЭЦ еще на 30%;

- применение тепловых насосов. В последнее время в зарубежной практике выпаривания стали широко применять тепловые насосы как эжекционного типа, так и прямого компримирования. Введение в тепловую схему выпаривания тепловых насосов не только эффективно позволяет использовать теплоту с низким потенциалом, но и в ряде случаев исключается отвод материальных и тепловых потоков в окружающую среду, что позволяет обеспечить экологическую безопасность процесса выпаривания от тепловых и химических загрязнений.

Основной проблемой процесса выпаривания существующих выпарных батарей является низкая их производительность. На большинстве целлюлозных заводов производительность выпарных батарей составляет 70% и ниже от проектной производительности.

Проведенный энергетический аудит выпарных батарей ряда целлюлозных заводов позволил установить основные причины их низкой производительности:

- интенсивное образование накипи сложного химического и фазового состава теплообменных поверхностей выпарных аппаратов и регенеративных теплообменников выпарных батарей. Решение этой проблемы возможно путем использования [11, 12] ингибиторов накипеобразования, подготовки растворов к выпариванию путем перевода накипеобразующих компонентов в менее растворимые соединения, например, в фосфаты кальция. В ряде случаев эффективными могут оказаться физические методы воздействия [13, 14] на раствор, например, электрическими или магнитными полями;

- наличие неконденсируемых газов и летучих компонентов во вторичном паре. Эти газы не только создают термическое сопротивление в процессе теплопередачи. Часть из органических соединений способны к полимеризации на наружных теплообменных поверхностях, создавая твердые отложения с низкой теплопроводностью;

- в литературе мало уделяется внимание стабильной работе регенеративных теплообменников выпарных установок. Между тем именно от их эффективной работы зависит вентиляция корпусов выпарных аппаратов от неконденсирующихся газов и во многом определяется удельный расход пара на выпаривание раствора и производительность выпарных батарей. На практике частично или полностью регенеративные подогреватели выводятся из работы. Устранение этого недостатка мы видим в замене регенеративных подогревателей рекуперативного типа теплообменниками [15] смешения. В этом случае некоторое дополнительное разбавление раствора полностью окупается интенсификацией работы подогревателей и выпарных установок.

Большинство отечественных выпарных станций целлюлозных заводов укомплектованы выпарными аппаратами с восходящей пленкой или аппаратами с естественной циркуляцией. В таких аппаратах создаются условия для образования накипи вплоть до полной забивки выпарных аппаратов. Для успешного решения этой проблемы целесообразно выпарные аппараты такого типа реконструировать в современные аппараты с падающей пленкой, что замедляет образования накипи и проблемы забивки кипятильных труб. Часто используются выпарные батареи противоточного типа, что приводит к снижению их производительности.

- большой унос капель раствора с вторичным паром из сепараторов выпарных батарей. Вопросам очистки вторичного пара также уделяется не достаточно внимания. Между тем тенденция роста производительности выпарных батарей единичной мощности и экологические требования к чистоте конденсата остро ставят задачу тонкой очистки вторичного пара. Здесь можно рекомендовать жалюзийные и циклонные брызгоуловители.

Успешное решение этих проблем позволит не только достигнуть проектной производительности выпарных батарей, но и существенно ее превзойти.

Декарбонизация известняка. В существующем способе декарбонизации известняка процесс ведут во вращающихся печах на природном газе или мазуте. Выбор вращающейся печи обусловлен тем, что при вращении печи материал окатывается. Грануляция материала обеспечивает равномерный прогрев и уменьшение потерь с уносом.

Исследованиями установлено, что процесс декарбонизации характеризуется низким эксергетическим КПД (37%). Причиной этого является низкая степень регенерации теплоты прокаленной извести и дымовых газов. Для повышения эксергетического КПД печи предлагается освоить нагрев исходного материала (CaCO_3) в циклонных теплообменниках путем охлаждения дымовых газов. Прокаленный материал охлаждается в циклонных холодильниках, нагревая воздух, который подают на горение в печь. При такой схеме регенерации теплоты расход топлива может быть снижен на 25 – 30%. При этом производительность печи может быть увеличена вдвое.

Аналог аппаратурно-технологической схемы разработан немецкой фирмой «Klockner-Humboldt» для кальцинации глинозема.

Заметим, что для карбонизации раствора черного щелока при выводе СРК из схемы, вращающаяся печь – единственный концентрированный источник CO_2 . В связи с этим решается проблема исключения отвода в окружающую среду парниковых газов.

При получении сульфитной целлюлозы одним из продуктов переработки являются технические лигносульфонаты. До недавнего времени потребительский спрос на лигносульфонаты удовлетворялся жидкими концентратами сульфитных целлюлозных заводов. Падение спроса на жидкие концентраты и эксплуатационные осложнения при выпаривании привели к идее получения сухих продуктов. С этой целью в эксплуатацию введены установки по сушке жидких концентратов до сухих веществ, в распылительных сушилках. Эксплуатационная устойчивость работы распылительных сушилок определила требования к исходному раствору для сушки. В результате концентрация раствора после выпаривания снизилась до 38,5% против 50% по а.с.в. Снижение концентрации раствора после выпаривания с учетом получения сухих веществ привели к существенному увеличению энергетической составляющей в себестоимости получения лигносульфонатов.

Решение этой проблемы мы видим в следующих направлениях: освоение вместо распылительных сушилок – грануляторов кипящего слоя [16]. Эти аппараты менее чувствительны к концентрации исходного раствора. Перед этими сушилками можно выпаривать растворы до концентрации 50% а.с.в. и более, разработка внепечного процесса кристаллизации и грануляции получения сухих лигносульфонатов.

Производство бумаги и картона. Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом.

В 60-х годах прошлого века проф. П.А. Жучковым были разработаны основы теории сушки волокнистых материалов и методы расчета многоцилиндровых кондуктивно-конвективных сушильных установок бумаго- и картоноделательных машин (БКДМ).

Термодинамическими исследованиями установлен низкий эксергетический КПД сушильной части БКДМ при больших величинах термически взаимодействующих материальных потоках. Этим и определяется большой подвод пара низкого давления с ТЭЦ.

Процесс в сушильной части условно можно разделить на три части: сушка полотна, водоотделение, рекуперация паровоздушной смеси.

Проведенный термодинамический анализ позволил установить, что низкий эксергетический КПД сушильной части определяется неэффективной работой теплорекуперационной установки.

В качестве основных направлений по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БКДМ можно рекомендовать:

1. Повышение эксергетического КПД рекуперативной установки.
2. Оптимизация параметров сушильного воздуха.
3. Снижение влажности бумажного полотна, поступающего на сушку.
4. Создание автономных систем вентиляции и кондиционирования БДМ и общеобменной вентиляции.
5. Применение тепловых насосов с целью повышения энергетической эффективности тепловой схемы сушильной части БДМ, а также для установления необходимых графиков сушки при автономной работе группы цилиндров.

Обсуждение результатов

Приведенные результаты показывают необходимость внедрения принципиально новых технологий производства основных видов целлюлозно-бумажной продукции. Эти технологии должны отвечать требованиям экологической безопасности иметь высокую энергетическую эффективность.

Энерготехнологические комплексы на основе флюидных технологий

Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО). В настоящее время проведены достаточно основательные исследования на влияние воды при сверхкритических параметров на целлюлозу и лигнин.

А.А. Лунин и А.А. Галкин отмечают, что при газификации лигнина и целлюлозы в воде при $T=623\text{ K}$ и $p=25\text{ МПа}$ образуется водород, метан и углекислый газ. Состав газа и его количество сильно зависят от содержания лигнина. Вероятно, целлюлоза является донором для гидрирования лигнина, что приводит к изменению состава образующегося газа в зависимости от соотношения лигнин/целлюлоза. Вблизи критической точки скорость гидролиза целлюлозы резко возрастает (более чем на порядок). Поэтому в сверхкритической воде вывод продуктов гидролиза значительно выше чем в

субкритической. При температурах и давлениях ниже параметров критической точки процессы разложения сахаров преобладают над процессами разложения целлюлозы. Следовательно, варьируя температуру и давление можно получить из целлюлозы сахара (в сверхкритической воде) либо осуществить глубокую деструкцию отходов этого полимера (в субкритической воде).

Положительные результаты исследований в области химии воды при сверхкритических параметрах дают основание прогнозировать успех в направлении разработки энергоэффективной технологии получения целлюлозы при воздействии на технологическую щепу водой при субкритических и сверхкритических параметрах [17,18]. В технологии, основанной на применении воды при критических параметрах отсутствуют процессы и оборудование, определяющие высокие энергозатраты, экологическую опасность и высокие капитальные вложения: варка технологической щепы, выпаривание черного щелока, обжиг известняка. Отсутствуют также процессы получения зеленого щелока и каустизация. Варка технологической щепы заменена на процесс окисления лигнин-углеводного комплекса (химическое обогащение технологической щепы по целлюлозе). Предполагается, что на вход в технологический процесс производства целлюлозы поступает древесина со степенью сухости 80%, а на выходе – белая целлюлоза, газ с высокой теплотой сгорания и вода. Газ от окисления лигнин-углеводного комплекса, обогащенный водородом и метаном перерабатывается на теплоту и электроэнергию по парогазовому циклу. Заметим, что такой процесс можно организовать без потребления теплоты от внешнего источника. Компенсация потерь от необратимости осуществляется путем экзотермических реакций при окислении лигнин-углеводного комплекса. Заметим, что скорость реакции окисления в условиях СКВО составляет несколько десятков секунд, против существующего процесса варки технологической щепы 3-4 часа. Последнее определяет стоимость оборудования для изготовления химического реактора на сверхкритические параметры.

Когенерация в целлюлозно-бумажной промышленности.

Когенерация – это совместный процесс производства электрической и тепловой энергии внутри одного устройства – когенерационной установки (мини ТЭЦ, КГУ). Экономия топлива при выработке энергии в когенерационном цикле может достигать до 40% по сравнению с раздельным производством того же количества электроэнергии и при использовании теплоты от специального горелочного устройства.

Для технологических автономных установок малой мощности разрабатываются мини-ТЭЦ на основе газопоршневого двигателя и паровой турбины малой мощности. Для установок большой мощности газопоршневой двигатель заменен на газовую турбину.

Термодинамическая эффективность процесса когенерации состоит в том, что такой процесс организуется при большем эксергетическом КПД в сравнении с раздельной выработкой теплоты и электроэнергии. Повышение эксергетического КПД связано с снижением величины необратимости тепловых процессов. Так, например, котел генерирует водяной пар давлением 1,0 МПа. Технологическому потребителю требуется пар давлением 0,15 МПа. Снижение потенциала достигается путем установки редуционно-охладительной установки (РОУ). Здесь РОУ – источник эксергетических потерь, возникающих при дросселировании водяного пара, а, следовательно, перерасхода топлива. При когенерации при направлении водяного пара в турбину необратимость от дросселирования отсутствует. Ликвидация этой необратимости позволит в паровой турбине выработать дополнительное количество электроэнергии. Еще больший эффект достигается при установке газопоршневого двигателя или газовой турбины. Низкий эксергетический КПД паровых котлов (45 -50%) определяется большой величиной необратимости процесса теплообмена между дымовыми газами и получаемым водяным паром. Снижение этой необратимости возможно путем повышения температуры газов, образующихся при сгорании топлива, выработке электроэнергии в газовой турбине, последующей выработке дополнительной электроэнергии и получения теплоты в паровой турбине.

В настоящее время направление когенерации является одним из приоритетных направлений в мире. Когенерационные установки характеризуются следующими дополнительными преимуществами наряду с дешевой электрической- и тепловой энергией (по сравнению с покупаемой из сети): близостью к потребителю, отсутствием необходимости в дорогостоящих ЛЭП и подстанциях, экологической безопасностью, мобильностью, легкостью монтажа и многими другими факторами.

Малая энергетика является не только альтернативой централизованной системе – она становится основой для быстрого развития вновь осваиваемых районов, открывающихся новых производств и расширения существующих. Очень часто из-за изношенности

оборудования существующих электросетей затруднено подключение новых промышленных потребителей, а иногда и просто экономически нецелесообразно (в случае большого удаления потребителя от ЛЭП). В результате, применение автономных энергоисточников с комбинированным производством электрической и тепловой энергии обеспечивает определенный энергетический резерв в централизованной системе.

Экологическая безопасность энергоэффективных технологий. Требования к организации энергоэффективных технологических процессов во многом совпадают с требованиями их экологической безопасности. Эти требования, как минимум, связаны с уменьшением количества удельных взаимодействующих материальных и тепловых потоков при высокой регенерации теплоты. С позиций экологической безопасности выполнение этих требований обуславливает уменьшение или исключение отвода материальных и тепловых потоков в окружающую среду.

Основная концепция создания экологической безопасности теплоиспользующих процессов включает:

- создание замкнутых циклов по материальным потокам с обеспечением минимума вывода их в окружающую среду. При этом отводимые тепловые потоки характеризуются температурой близкой к температуре окружающей среды;
- уменьшение взаимодействующих материальных тепловых потоков в процессе теплопередачи;
- обеспечение малоотходных процессов путем вывода из материальных взаимодействующих потоков продуктов, имеющих повышенный потребительский спрос;
- снижение или исключение парниковых и других газов, отводимых в окружающую среду, получаемых в процессе переработки древесной технологической щепы на целлюлозу.

Экологическая безопасность энергоэффективных технологий должна обеспечивать чистоту водного и воздушного бассейнов.

В производстве целлюлозы источниками загрязнений водного бассейна являются промывные воды, конденсат водяного пара вакуумных корпусов выпарных аппаратов и др. Решение этой проблемы мы видим в создании замкнутых циклов. Для сведения материального баланса по воде, необходимо применить комплекс мероприятий, включающих процессы выпаривания, диафрагменные, ионообменные технологии. Целевая задача по решению проблемы охраны водного бассейна – полное прекращение вывода жидких продуктов в окружающую среду. При решении этой проблемы возникают задачи по выводу примесей из растворов для исключения их накопления, некоторые из этих примесей должны быть дополнительно переработаны на продукты, имеющие потребительский спрос.

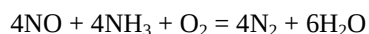
В производстве целлюлозы особое внимание следует уделить выводу из процесса лигнина и др. органических примесей. Проблема вывода лигнина из раствора является центральной как с точки зрения создания энергоэффективных технологий (вывод из технологической цепочки СРК), так и с позиций глубокой переработки древесины. Полученные продукты глубокой переработки по цене должны конкурировать с одной стороны с лигнином как топливом, с другой стороны эти продукты по стоимости должны быть конкурентоспособны с аналогичными продуктами, полученными по другим технологиям. При успешном решении задач по переработке лигнина на целевые продукты, этот процесс будет перманентным с непрерывным замещением лигнина как топлива, лигнином как химическим сырьем. Второй проблемой является вывод из раствора натриевых солей при гидрохимическом способе регенерации щелочей.

Основными источниками загрязнения воздушного бассейна в производстве целлюлозы являются варочные процессы, процессы выпаривания, процессы в СРК и энергетических паровых котлах. К основным продуктам целлюлозного производства, загрязняющим окружающую среду воздушного бассейна, следует отнести: метилмеркаптан, диметилдисульфид, сероводород, монооксид азота, углерода, парниковые газы. Источником всех серосодержащих газов является сульфид натрия. Для исключения «дурно пахнущих» газов предлагается разработать способы, обеспечивающие удаление сульфида натрия их раствора черного щелока до выпаривания. Это возможно осуществить как химико-технологическими приемами, так и аппаратурно-технологическими способами. Первое направление основано на основе связывания в менее растворимое, чем сульфид натрия, соединение с выводом из процесса новой фазы и регенерации из нее серы. Второе направление связано с аппаратурным направлением процесса переработки раствора после варки и в процессе выпаривания. Практическая реализация этого направления возможна путем обработки раствора воздухом или воздушно-паровой смесью в кавитационно-

вихревых аппаратах. В этих аппаратах генерируется озон, являющийся сильным окислителем.

В паровых котлах одним из вредных компонентов в дымовых газах является монооксид азота. Доведение до норм СНиП этого вида загрязнений предлагается путем:

- освоения в котельных агрегатах горелочных устройств, разработанных специалистами университета;
- введением в высокотемпературную зону потока дымовых газов ($950 - 1100^{\circ}\text{C}$) котла, по способу ВТИ, аммиачной воды или карбомида. При этом протекает реакция восстановления:



По-видимому, целесообразно использовать оба метода одновременно. Что касается монооксида углерода, то его доведение до норм СНиП достигается правильным проведением процесса горения топлива.

В настоящее время большое внимание уделяется снижению выбросов парниковых газов в окружающую среду. Следует отметить, что в излагаемой концепции энергоэффективных технологий процесса производства переработки древесной технологической щепы на целлюлозу практически парниковые газы отсутствуют. Такое заключение можно сделать из следующих соображений. В предлагаемой технологии СРК отсутствует, а, следовательно, и связанные с ним загрязнения. Печь декарбонизации является концентрированным источником CO_2 , который полностью потребляется в технологическом процессе при карбонизации черного щелока. Кроме того, работа печи обжига известняка предполагается на лигнине или тарифицированном угле в качестве топлива, т.е. на возобновляемом источнике сырья.

В сульфитном способе производства целлюлозы с точки зрения экологической безопасности процессов представляет интерес разработка способов внепечного получения сухих технических лигносульфонатов.

В производстве бумаги и картона по экологическому обеспечению технологического процесса сушки следует выделить освоение автономных замкнутых циркуляционных потоков воздуха в системах общеобменной вентиляции и кондиционирования.

В циркуляционном контуре БДМ сушильный воздух перед поступлением в сушильную часть машины очищается от волокна с возвращением его в процесс. В условиях эффективного использования энергии, при развитой схеме регенерации теплоты, вывод паровоздушной смеси в окружающую среду сведен к минимуму.

Заключение

Приведены основные направления по повышению энергетической эффективности основных технологических процессов получения продукции целлюлозно-бумажных предприятий.

Показана низкая энергетическая эффективность существующей схемы получения сульфатной целлюлозы, эксергетический КПД - 48%. Основная доля затраченной эксергии (71% от подведенной в схему) относится к процессу в СРК).

Предложена гидрохимический способ переработки древесной технологической щепы с получением сульфатной целлюлозы с высоким значением эксергетического КПД (90%), в котором отсутствуют СРК, вращающаяся печь обжига известняка.

Приведены основные направления повышения энергоэффективности получения лигносульфонатов при сульфитном производстве целлюлозы.

Дальнейшее развитие энергоэффективных технологий производства целлюлозы можно прогнозировать на основе применения флюидных технологий – сверхкритического водяного окисления (СКВО).

Процесс производства бумаги и картона является сложным физико-химическим и термовлажностным процессом.

Показаны основные направления по совершенствованию тепловой схемы сушильной части БКДМ.

Рассмотрены вопросы когенерации в целлюлозно - бумажной промышленности.

Значительное внимание уделено экологической безопасности энергоэффективных технологий.

Литература

1. Луканин П.В. Проблемы энергосбережения на целлюлозно-бумажных предприятиях России // IV научно-техническая конференция «Леса России: политика,

промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 22-25 мая 2019: тезисы докладов. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. С.304-306.

2. Луканин П. В. Оценка энергетической эффективности производства сульфатной целлюлозы методом приращения эксергий / П.В. Луканин// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 3-11.

3. Луканин П.В. Особенности сжигания биотоплива и их взаимосвязь с упруго-релаксационными свойствами исходного сырья и его химическим составом / П.В. Луканин, О.В. Федорова, А.А. Пекарец, Э.Л. Аким// Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти профессора В.И. Комарова (Архангельск, 9–11 сентября 2021 г.) / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2021. С. 383-388.

4. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Упрощенный метод определения эксергетического КПД сложной тепловой схемы технологического процесса//Промышленная энергетика. 2010. №1. С. 38-41.

5. Лахтиков Ю.О. Проблемы развития биоэнергетики на предприятиях ЦБП // Биотопливный Конгресс.19-20 марта 2019, СПб.

6. Сверхкритические флюиды в химии / Е. С. Алексеев, А. Ю. Алентьев, А. С. Белова [и др.] // Успехи химии. 2020. Т. 89. № 12. С. 1337-1427.

7. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sektor: Chenges. Practices and Prospects // Taylor & Francis Group (NY); 2017.

8. Song A. A filler distribution factor and its relationship with the critical properties of mineral-filled paper//BioResources/ 2018. V.13. №3. P.6631-6641.

9. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Технология теплоты в процессе производства лигносульфонатов // Промышленная энергетика. 2012. №7. С.35 – 39.

10. Alen R., Sjöström E., Vaskikari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors // Cellulose Chemistry and Technology.- 1985.-V. 19.- № 5.-P.c. 537-541.

11. Nimish D., Morrish K. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi- Circular Groove// International Journal of Science and Research. 2017. V.6. № 6.p.2200-2207.

12. Spitzer D.P. Chamberlain Q, Franz C., Lewellyn M., and Qi Dai, “MAX HT™ sodalite scale inhibitor: plant experience and impact on the process”, Light Metals 2008 (Edited by David H. De Young, The Minerals, Metals & Materials Society, 2008), 57-62.

13. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Эксергетический анализ технологии производства сульфатной целлюлозы // Промышленная энергетика. 2011. №7.С.37-42.

14. Патент № 2651412 Российская Федерация, МПК D21C 3/02 (2006.01). Способ упаривания щелоков в производстве целлюлозы: № 2017122502: заявл.26.06.2017: опубл.19.04.2018 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., Субботина К.О.; заявитель ГОУВПО СПбГУПТД. 6 с.

15. Патент №2670855 Российская Федерация, МПК D21C 3/02 (2006/01). Способ варки технологической щепы в производстве целлюлозы: №2017122501: заявл. 26.06.2017: опубл.25.10.2018 / Луканин П.В., Казаков В.Г., Федорова О.В., Субботина К.О.; заявитель ФГБОУВО СПбГУПТД. 2с.

16. Казаков В.Г., Луканин П.В., Смирнова О.С. Технология теплоты в гидрохимическом способе регенерации химикатов производства сульфатной целлюлозы// Промышленная энергетика. 2011. №7. С.44-48.

17. Казаков В.Г., Луканин П.В., Громова Е.Н. Вертикальный варочный котел. Патент на полезную модель № 208723. 11.01.2022.

18. Казаков В.Г., Луканин П.В. Громова Е.Н. Способ получения целлюлозы. Патент на изобретение № 2771348. 29.04.2022.

Авторы публикации

Луканин Павел Владимирович – к.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, первый проректор, директор Высшей й школы технологии и энергетики, email: lukanin@gturp.spb.ru,

Зверев Леонид Олегович – Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, студент. email: zverevleonid28@mail.ru

Казаков Владимир Григорьевич – д.т.н., старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, профессор кафедры Промышленной теплоэнергетики, email: k64089@yandex.ru

References

1. Lukanin PV. *Energy saving problems at Russia's pulp and paper enterprise*. IV Scientific and technical conference «Forests of Russia: Politics, Industry, Science», Saint Petersburg, May 22-25, 2019: abstracts of reports. Saint Petersburg: POLITEKCH-PRESS. 2019; 304-306.
2. Lukanin PV. Assessment of energy efficiency of sulfate pulp production with the method of exergy increments. *News of Higher Educational Institutions. Energy Problems*. 2020; 2, 3-11.
3. Lukanin PV, Fiodorova OV., Pekarets A.A., et al. Biofuel burning features and their interrelationship with relaxational-elastic properties of raw material and its chemical composition. *Problems of Mechanics of Pulp and Paper Materials: Proceedings of VI International scientific and technical conference in commemoration of Professor V.I. Komarov (Arkhangelsk, September 9-11, 2021) / Lomonosov Northern (Arctic) Federal University*. Arkhangelsk: NARFU, 2021. 383-388.
4. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova. A simplified method for determining the exergy efficiency of a complex thermal process flow diagram. *Industrial Energy*. 2010; 1, 38 - 41.
5. Lakhtikov YuO. *Problems of Bioenergy Development at PPI Enterprises*. Biofuel Congress, March 19-20, 2019, SPb.
6. Alekseev ES, Alent'ev AYU., AS. Belova, et al. Sverxkriticheskie fluidy v khimii. *Uspehi khimii*. 2020. T. 89. № 12. pp 1337-1427.
7. Hansen E, Panwar R, Vlosky R. *The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects*. Taylor & Francis Group (NY); 2017.
8. Song AA filler distribution factor and its relationship with the critical properties of mineral-filled paper. *BioResources*. 2018. V.13. №3. P.6631-6641.
9. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Heat technology in the lignosulfonates production. *Industrial Energy*. 2012; 7, 35-39.
10. Alen R, Sjöström E, Vaskikari P. Carbon dioxide precipitation of lignin from alkaline pulping liquors. *Cellulose Chemistry and Technology*. 1985;19(5):537-541.
11. Nimish D, Morrish K. CFD Analysis of Fluid Flowing Through a Heat Exchanger Tube Having a Twisted Tape with a Centrally Placed Semi-Circular Groove. *International Journal of Science and Research*. 2017;6(6):pp.2200-2207.
12. Spitzer DP, Chamberlain Q, Franz C., Lewellyn M., and Qi Dai, MAX HTTM sodalite scale inhibitor: plant experience and impact on the process, *Light Metals 2008* (Edited by David H. De Young, The Minerals, Metals & Materials Society, 2008), 57-62.
13. Kazakov VG, Lukanin PV, Smirnova OS. Exergy analysis of sulfate pulp technology. *Industrial Energy*. 2011; 7, 37 - 42.
14. Patent № 2651412 the Russian Federation, MPK D21C 3/02 (2006.01). *The Method for evaporation of liquors in pulp production*: № 2017122502: decl. 26.06.2017: publ. 19.04.2018 / Lukanin PV, Kazakov VG, Fiodorova OV, Subbotina KO. declarant FSBEIHE SPbSUITD. 6pp.
15. Patent № 2670855 the Russian Federation, MPK D21C 3/02 (2006.01). *The method of pulpchips cooking in pulp production*: № 2017122501: decl. 26.06.2017: publ. 25.10.2018 / Lukanin PV, Kazakov VG, Fiodorova OV, Subbotina KO. declarant FSBEIHE SPbSUITD. 2p.
16. Kazakov V.G., Lukanin P.V., Smirnova O.S. Heat technology at the hydrochemical recovery of chemicals in sulfate pulp production. *Industrial Energy*. 2011; 7, 44-48.
17. Kazakov VG., Lukanin PV., Gromova EN. *Vertical digester*. Patent for useful model № 208723. 11.01.2022.
18. Kazakov VG., Lukanin PV, Gromova EN. *Method for producing pulp*. Patent for an invention № 2771348. 29.04.2022.

Authors of the publication

Pavel V. Lukanin – PhD in Engineering, Professor, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. First Vice Rector; Higher School of Technology and Energy. Director. e-mail: lukanin@gturp.spb.ru.

Leonid O. Zverev – Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; Institute of Energy and Automation, e-mail: zverevleonid28@mail.ru.

Vladimir G. Kazakov – D.Sc. in Engineering, Senior Researcher, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; Professor, Department of Industrial Heat-and-Power Engineering. email: k64089@yandex.ru.

Получено ***22.06.2022 г.***

Отредактировано ***24.06.2022 г.***

Принято ***06.07.2022 г.***

Номенклатура-переходник журнала «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики»

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты	2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы	
05.09.12 – Силовая электроника	
05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений)	
05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)	
05.14.01 – Энергетические системы и комплексы	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы	2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатации и вывод из эксплуатации	
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика	2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)
05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки) 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Сдано в набор
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ №
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная