

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) 2 / 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

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, № 2
Март-Апрель
ISSN 1998-9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

В журнале публикуются 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

АРАКЕЛЯН Э.К.
БУХМИРОВ В.В.
ГУМЕРОВ Ф.Х.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ИВШИН И.В.
ЛАПТЕВ А.Г.
ТЮТИКОВ В.В.
ЧИЧИРОВА Н.Д.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ЯКИМОВ Н.Д.
ФРОЛОВ В.Я.
РАССЫЛКИН А.С.

КОРОВКИН Н.В.
ВИНОГРАДОВ А.В.
ДОВГУН В.П.
СИНЮКОВА Т.В.
ЩИННИКОВ П.А.
MICHAIL KOLCUN
НИКОЛАЕВА Л.А.
САДЫКОВ М.Ф.
ДМИТРИЕВ А.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.
НИКОЛАЕВА Л.А.

КАЛАЙДА М.Л.

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, № 2
March-April
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

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

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: 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:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND
SYSTEMS

TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

Editorial board:

EDIK K. ARAKELYAN
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
FARID M. GUMEROV
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
ANATOLY G. LAPTEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
NATALIYA D. CHICHIROVA
ELVIRA R. ZVEREVA
NIKOLAY D. YAKIMOV
VLADIMIR YA. FROLOV

NIKOLAY V. KOROVKIN
ALEXANDR V. VINOGRADOV
VALERY P. DOVGUN
TATYANA V. SINYUKOVA
PAVEL A. SHCHINNIKOV
MICHAIL KOLCUN
LARISA A. NIKOLAEVA
MARAT F. SADYKOV
ANDREY V. DMITRIEV
ALEXANDR I. FEDOTOV
ALEXANDR V. GOLENISHEV-
KUTUZOV
NIKOLAEVA L.A.
KALAYDA M.L.

ANTON RASSÖLKIN

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/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЛУКУТИН Б.В., АЛЬ-МАЖДИ КАРРАР ХАМИД. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулярованием солнечной энергии.	3
РОТАЧ Р.Р., ВАНЬКОВ Ю.В. Повышение эффективности котельной при использовании винтовых расширительных машин.	14

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ИВШИН И.В., ГАЛЯУТДИНОВА А.Р., ВЛАДИМИРОВ О.В., НИЗАМИЕВ М.Ф., КАРПОВ Е.Н., МЕЛЬНИК Э.П. Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ.	24
АЛЬЗАККАР А., МЕСТНИКОВ Н.П., МАКСИМОВ В.В., ВАЛЕЕВ И.М. Оценка индекса устойчивости напряжения электрических сетей питающих зарядные станции электромобилей с применением многослойного персептрона.	36
МАСКОВ Л.Р., КОРНИЛОВ В.Ю. Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной системой электроснабжения в программе matlab/simulink.	50
БИРЮЛИН В.И., КУДЕЛИНА Д.В. Разработка модели для анализа способов снижения несимметрии напряжений в системах электроснабжения.	72
ЛЫУ КУОК КЫОНГ., МАКЛЕЦОВ А.М., АЛЬЗАККАР А. МАКСИМОВ В.В., ГАЛИЕВ И.Ф. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии.	86
РУСИНА А.Г., ТУВШИН О., МАТРЕНИН П.В., ПОПОВ Н.С. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии.	98
СИНЮКОВ А.В., СИНЮКОВА Т.В., ГРАЧЕВА Е.И., MICHAL KOLCUN. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов.	108

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

ХУСНУТДИНОВ Р.Р. Аппаратно-программный комплекс для определения подлинности лекарственных препаратов методом ядерного квадрупольного резонанса.	119
ИВАНОВ Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса.	132

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

БЛИНОВ А.О., БОРИСОВ А.В., КОНЧИНА Л.В., МАСЛОВА К.С. Модель опорной ноги антропоморфного робота или экзоскелета с двумя подвижными звеньями с учетом динамики электропривода.	147
МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ЧИЛЯЕВА М.Р., ИМАМИЕВ А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели.	160

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

КАЛАЙДА М.Л., САЕТОВ А.Р. Водные биологические ресурсы в структуре экологических проблем энергетических объектов.	175
НИКОЛАЕВА Л.А., ЗАЙНУЛЛИНА Э.Р. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики.	186

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

LUKUTIN BV, KARRAR HAMEED KADHIM. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy.	3
ROTACH RR, VANKOV YUV. Increasing the efficiency of the boiler house using screw expansion machines.	14

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

IVSHIN IV, GALYAUTDINOVA AR, VLADIMIROV OV, NIZAMIEV ME, KARPOV EN, MELNIK EP. The intelligent system for assessing the technical condition a transformer substation of 35/6(10) Kv.	24
ALZAKKAR A, MESTNIKOV N, MAKSIMOV VV, VALEEV IM. Assessment of the voltage stability index of electric networks supplying charging stations using a multilayer perceptron.	36
MASKOV LR, KORNILOV VYU. Development of a model of an electrical complex for gas air cooling devices of gas field №1 gazprom dobycha Yamburg LLC with a centralized power supply system in the matlab/simulink programm.	50
BIRYULIN VI, KUDELINA DV. Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems	72
LUU QUOC CUONG, MAKLETSOV AM, ALZAKKAR A, MAKSIMOV VV, GALIEV IF. Development of an algorithm for symmetrizing loads in networks of 0,4 kV at a distributed load along a line.	86
RUSINA AG, TUVSHIN O, MATRENIN PV, POPOV NS. Forecasting the daily energy load schedule of working days using meteofactors for the central power system of Mongolia.	98
SINYUKOV AV, SINYUKOVA TV, GRACHEVA EI, MICHAL KOLCUN. Neural network technologies in control systems of cargo movement mechanisms.	108

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

KHUSNUTDINOV RR. Hardware and program system for determination of authenticity of medicines by nuclear quadrupole resonance method.	119
IVANOV DA. Study of electrophysical processes and aging of the material of high-voltage insulators to determine their working life.	132

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

BLINOV AO, BORISOV AV, KONCHINA LV, MASLOVA KS. Model of the supporting leg of an anthropomorphous robot or exoskeleton with two movable links taking into account the dynamics of the electric drive.	147
MALEV NA, POGODITSKY OV, CHILYAEVA MR, IMAMIEV AR. Algorithm for parametric identification of the dc electric drive using the inverse model.	160

TECHNOSPHERE SAFETY

KALAIIDA ML, SAETOV AR. Water biological resources in the structure of environmental problems of energy facilities.	175
NIKOLAEVA LA, ZAINULLINA ER. Investigation of the process of desalination of the concentrate of reverse osmosis plants by energy waste.	186



ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ И ТЕПЛОВЫМ АККУМУЛИРОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Б.В. Лукутин, Аль-Мажди Каррар Хамид

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск

lukutin48@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Изучение возможности строительства гибридных электростанций для снижения дефицита и стоимости энергии в условиях Ирака за счет совместного использования солнечных электрохимических и электротепловых аккумуляторов фотоэлектростанций. *МЕТОДЫ.* Аналитические методы в области построения систем энергоснабжения потребителей от фотоэлектрических станций, методы компьютерного математического моделирования. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведен анализ суточных алгоритмов функционирования солнечной теплоэлектрической системы энергообеспечения на примере социального объекта в Ираке с использованием электрохимических и электротепловых систем аккумулирования электроэнергии с учетом варьирования уровня солнечной радиации, температуры окружающей среды и энергопотребления по сезонам года. Предложен оптимальный, для рассматриваемых условий, алгоритм функционирования системы солнечного энергоснабжения и её элементов. Обозначены пути построения интеллектуального термоэлектрического контроллера, обеспечивающего преобразование максимальной доступной мощности фотоэлектростанции в тепловую энергию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано, что предложенная структура построения фотоэлектростанций с комбинированным аккумулированием электроэнергии предпочтительнее для потребителей со значительным объемом тепловых нагрузок поскольку эффективность непосредственного преобразования электроэнергии от фотоэлектрических модулей в тепловую энергию выше, чем эффективность ее теплового преобразования через промежуточное звено - электрохимическую батарею. В работе предложен принцип создания интеллектуальных электротепловых контроллеров, обеспечивающий работу фотоэлектростанции в режиме максимальной мощности.

Ключевые слова: фотоэнергетика; гибридная электрохимическая и электротепловая системы аккумулирования; компьютерное моделирование; электротепловой контроллер.

Для цитирования: Лукутин Б.В., Аль-Мажди Каррар Хамид. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24, № 2. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.

OPTIMIZATION OF ENERGY BALANCES OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT WITH ELECTROCHEMICAL AND THERMAL STORAGE OF SOLAR ENERGY

B.V. Lukutin¹, Karrar Hameed Kadhim¹,

¹National Research Tomsk Polytechnic Russia. Tomsk

lukutin48@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Exploring the possibility of building hybrid power plants to reduce the shortage and cost of energy in Iraq through the combined use of solar electrochemical and thermal batteries. *METHODS.* Analytical methods in the field of construction of consumer energy supply systems from photovoltaic plants, methods of computer-mathematical modeling. *RESULTS.*

The analysis of daily algorithms for the operation of a solar thermal energy supply system was carried out using the example of a social facility in Iraq using electrochemical and thermoelectric energy storage systems, taking into account the variation in the level of solar radiation, ambient temperature and energy consumption by seasons. An optimal algorithm for the conditions under study is proposed for the operation of the solar energy supply system and its elements. Methods for building an intelligent thermoelectric controller have been defined, which ensure the conversion of the maximum available energy of the PV power plant into thermal energy. CONCLUSION. It turns out that the proposed structure for the construction of photovoltaic power plants with combined storage of electricity is preferable to consumers with large thermal loads, because of the efficiency of direct conversion of electricity from photovoltaic modules to thermal energy is higher than the efficiency of thermal conversion through an intermediate link - an electrochemical battery. The paper proposes the principle of creating intelligent thermoelectric controllers, which ensure the operation of a photovoltaic power plant in maximum power mode.

Key words: photovoltaic; hybrid electrochemical and electrothermal storage systems; computer modeling; electrothermal controller.

For citation: Lukutin BV., Karrar Hameed Kadhim. Optimization of energy balances of a photovoltaic power plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13.

Введение

Мировой спрос на энергию, особенно на возобновляемые источники энергии, быстро растет. Охрана окружающей среды путем борьбы с загрязнением, особенно выбросами парниковых газов, стала серьезной проблемой во всем мире. Энергия ископаемого топлива сегодня еще доступна, но время обильной недорогой энергии подходит к концу. В настоящее время большое значение приобретает исследование альтернативных источников энергии, в частности возобновляемых, а также решение экологических проблем, связанных с этими источниками. Прогнозируется, что к 2040 году на производство возобновляемой энергии будет приходиться 50% производства электроэнергии в Европейском союзе, около 30% в Китае и Японии и более 25% в Соединенных Штатах и Индии; на уголь будет приходиться менее 15% производства электроэнергии за пределами Азии [1]. Из-за растущего расхождения в электрических нагрузках между пиковыми и непиковыми часами управление спросом на энергию становится все более сложным. Временной дисбаланс между пиковым спросом и производством возобновляемой энергии становится все более важным по мере увеличения вклада возобновляемых источников энергии в общий энергобаланс. Калифорнийский независимый системный оператор (*California Independent System Operator*) опубликовал график в 2012 году, на котором изображено производство и потребление электроэнергии в течение дня. Из-за огромного роста фотовольтаики в Калифорнии график, известный как кривая утки, изображает растущее несоответствие между утренним и вечерним спросом на энергию по сравнению с полуденным [2]. Рост «зеленой» энергетики обеспечил стабилизацию негативного воздействия выбросов углерода, а также темпов сокращения ресурсов ископаемого топлива. Возобновляемые источники энергии препятствуют изменению климата, обеспечивают надежное энергоснабжение, новые возможности трудоустройства, гигиену окружающей среды и доступ к энергии в отдаленных районах. Солнечная энергия является одним из перспективных возобновляемых энергоресурсов и имеет потенциал для удовлетворения значительного объема мирового спроса на энергию. Эволюция возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, способна обеспечить человечество неисчерпаемой чистой энергией [3-8].

Возобновляемые источники энергии, особенно солнечная энергия, могут быть использованы в системах электроснабжения, в первую очередь в районах, где централизованные энергетические системы недоступны или когда доступная электроэнергия является дорогостоящей. Высокая стоимость фотоэлектрического силового оборудования электростанции остается барьером для их более широкого использования. Это относится к электрохимическим аккумуляторам, которые обычно используются для координации энергетического баланса солнечной системы. Аккумуляторы, также, чувствительны к температуре, имеют короткий срок службы и стоят дорого. Электрическая

энергия от фотоэлектрических станций может аккумулироваться не только электрохимическим способом, но и в менее дорогих электротермических потребителях – аккумуляторах - водонагревательных установках. Это позволяет снизить стоимость фотоэлектрической установки за счет уменьшения емкости дорогостоящих аккумуляторов, при одновременном обеспечении потребителя горячей водой [9].

В зависимости от конструкции и технических качеств стоимость единицы площади коллектора разных конструкций варьируется. Солнечные коллекторы с простейшими конструкциями стоят 2,3 тысячи рублей за квадратный метр [10]. Недостатком солнечных водонагревателей является то, что их эффективность сильно зависит от солнечных и погодных условий. На эффективность фотоэлектрического преобразования существенно не влияет достаточно широкий диапазон изменений энергии солнечной радиации, что позволяет фотоэлектрическим станциям расширять свои возможности, в том числе и обеспечения горячего водоснабжения [11].

В иракской системе распределения электроэнергии был исследован коэффициент разнообразия электрических нагрузок. Согласно исследованию, бытовая и промышленная нагрузка увеличивается быстрее по сравнению со средним увеличением. Бытовые нагрузки являются наиболее значимыми компонентами иракских электрических сетей. Электрические приемники в доме включают бытовую технику, освещение, отопление помещений, охлаждение и нагрев воды. Опрос показал, что нагрев воды потребляет больше всего электроэнергии, составляя 32,29 процента [12]. Избегая более высоких тарифов в часы пик, тепловое аккумулирование экономит счета за электроэнергию. Пользователи, которые могут адаптироваться к изменяющемуся предложению и спросу на энергию, получают выгоду от аккумулирования энергии [13].

Фотоэлектрическая (PV) технология преобразует солнечную энергию в электричество для использования в различных целях, таких как подогрев воды и отопление помещений, использование электроэнергии для бытовых приборов и приготовления пищи. Эффективность преобразования фотоэлементов из солнечной энергии в электричество снижается по мере повышения рабочих температур. Объединение солнечных тепловых коллекторов и фотоэлементов в системе, известной как тепловая фотоэлектрическая (PVT), может снизить рабочую температуру и повысить эффективность системы. Гибридные системы PVT, объединяющие фотоэлектрические и солнечные тепловые технологии, очень перспективны для одновременного производства электрической и тепловой энергии [14-17].

Очень актуальной проблемой для иракской энергетики является снижение нагрузки на энергетическую систему, в том числе за счет ввода в эксплуатацию мощностей по производству возобновляемой энергии, в первую очередь солнечной [18]. Учитывая дефицит иракской энергосистемы, которая восполняется за счет импорта около 22% электроэнергии из Ирана (на фоне санкций США в отношении участников сотрудничества с Ираном), снижение нагрузки на энергосистему является весьма актуальной проблемой для энергетики Ирака.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии MRPT-технологий солнечных контроллеров для применения не только для зарядки электрохимических аккумуляторов, но и для электротепловых утилизаторов электроэнергии фотоэлектрических станций. Предложен алгоритм функционирования гибридной электрохимической и электротепловой системы аккумулирования.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании применения и разработке рекомендаций по построению фотоэлектрических станций с гибридной системой аккумулирования электроэнергии для обеспечения социально-бытовых объектов электроэнергией и горячей водой в условиях Ирака.

Материалы и методы

Почасовая генерация массива фотоэлектрических элементов в районе установки фотоэлектростанции в течение года и его основные характеристики показаны на рисунке 1 и в таблице 1. Онлайн-приложение Глобального солнечного атласа (<https://globalsolaratlas.info/>), на основе базы данных о солнечных ресурсах, позволяет определить параметры фотоэлектрической генерации для конкретного объекта.

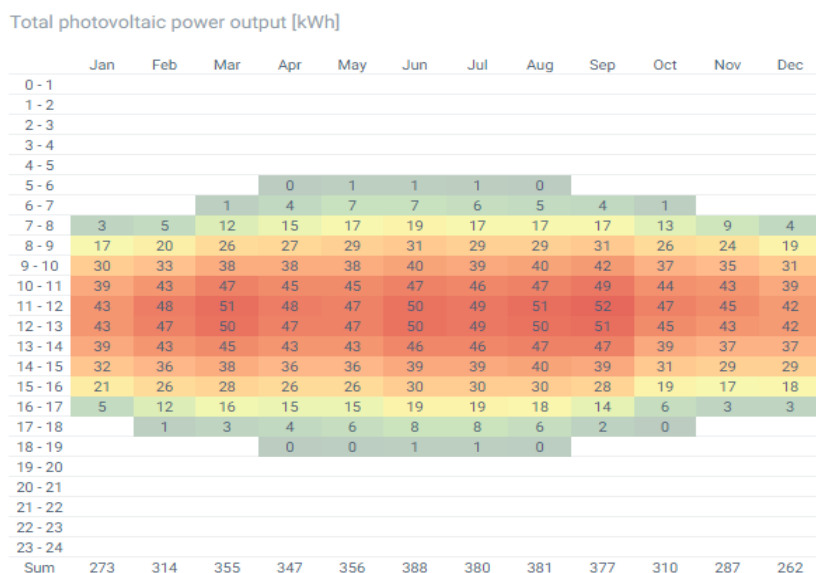


Рис.1. Часовые изменения фотоэлектрической генерации для характерных суток каждого месяца в течение года

Fig.1. Hourly changes in photovoltaic generation for a typical day during the year

Таблица 1

Параметры массива фотоэлектрических модулей.

Pv system	Small residential
Azimuth of PV panels	180°
Tilt of PV panels	30°
Installed capacity	76 kWp

Объект и методы исследования

Обширная территория и низкая плотность населения Ирака с высоким потенциалом солнечной энергетики определяют перспективы использования фотоэлектрических станций. Территория Ирака находится под влиянием солнечной энергии, получая около 2000 кВт*ч/м²/год, что определяет актуальность использования технологий солнечной энергетики для поддержки экономики страны за счет снижения потребления электроэнергии в иракской национальной электросети. Ирак считается второй страной в мире по энергоемкости солнца. На основе построенной карты распределения инсоляции по территории Ирака потенциальные площади для создания крупных крупномасштабных солнечных электростанций показывают, что Ирак входит в число стран, наиболее пригодных для использования солнечной энергии [19]. Выбор оборудования для децентрализованных фотоэлектрических установок определяется графиками инсоляции и потребления электроэнергии. Схема предлагаемой независимой гибридной фотоэлектрической установки с резервированием от дополнительного источника энергии - дизель-генератора - или централизованной сети показана на рисунке 2. Схема отличается от обычной фотоэлектрической установки с электрохимическим накопителем электроэнергии и резервным дизель-генератором наличием тепловых нагрузок, которые питаются непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальный электротермический контроллер.

Принятые на рисунке 2 обозначения: PV/T - массив фотоэлектрических модулей; TL - электротермический аккумулятор; TC - электротермический контроллер; В - батарея электрохимических аккумуляторов; CC - контроллер заряда аккумулятора; I - инвертор; DG - дизель-генератор или другой источник энергии; AU - автоматический переключатель энергоисточников; EL - электрическая нагрузка. Исследуемый район - Ирак, Мухафаза Аль-Анбар, расположен на высоте 45 м над уровнем моря. Город расположен на 32.5598° северной широты, 41.9196° восточной долготы.

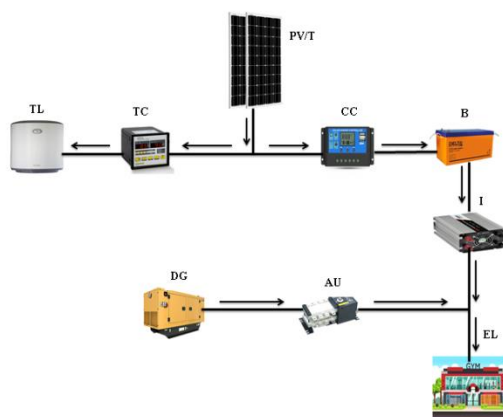


Рис. 2. Блок-схема фотоэлектрической системы с электрохимическими и электротермическими аккумуляторами

Fig. 2. Block diagram of a photovoltaic system with electrochemical and electrothermal batteries

Распределенная генерация с аккумулированием энергии и интеллектуальным управлением генерацией и потреблением электроэнергии составляет большинство решений для возобновляемой энергетики. Различные исследования показывают, что для устойчивой и надежной работы таких энергосистем требуется разработка соответствующих методов и алгоритмов управления энергией, включая её аккумулирование и потребление. Необходимо, также, тщательный анализ экономической целесообразности интеграции солнечной электростанции с сетью.

В качестве примера объекта электроснабжения был выбран социальный объект – тренажерный зал. Площадь зала составляет 200 м² и рассчитана на прием 30 посетителей в день, с рабочим периодом 12 часов в день. Социальный объект нуждается в электрической энергии и горячей воде.

Общий суточный расход энергии на тренажерный зал будет определяться следующим образом:

$$W_{но} = W_{э} + W_{н} \dots\dots\dots (1)$$

где $W_{но}$ – общее энергопотребление, $W_{э}$ - электроэнергия, потребляемая электрическими нагрузками; $W_{т}$ - электричество, потребляемое при нагревании воды.

В зависимости от сезона, суммарная мощность $W_{но}$, мощность электрических нагрузок $W_{э}$ и мощность электрического нагревателя $W_{н}$ за день приведены в таблице 2 [20].

Таблица. 2

Энергетический баланс тепловых и электрических нагрузок.

Сезон	Баланс энергии в течение характерного дня сезона, кВтч		
	$W_{но}$	$W_{э}$	$W_{н}$
Зима	530	360	170
Весна	302	158	144
Лето	340	196	144
Осень	451	281	170

Эти объемы электроэнергии должны ежедневно вырабатываться фотоэлектрической установкой или любым другим источником энергии, а для фотоэлектрической станции необходимое количество этой энергии должно быть предоставлено спортивному объекту с использованием систем аккумулирования из-за различных периодов времени солнечной радиации и электропотребления. По данным рисунка1 и таблицы 2 можно построить энергетический баланс системы электроснабжения с учётом применяемых систем аккумулирования электроэнергии, приведённый в таблице 3.

Таблица 3

Суточные энергетические балансы фотоэлектрической системы энергоснабжения

Время суток, часы	Суточные зависимости почасовой энергии фотоэлектрической генерации WPV, потребления электрической нагрузкой WE и электрической тепловой нагрузкой WH по сезонам года, кВтч											
	Зима			Весна			Лето			Осень		
	WPV	WE	WH	WPV	WE	WH	WPV	WE	WH	WPV	WE	WH
0-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5-6	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6-7	0	0	0	1	0	1	7	0	7	1	0	1
7-8	3	0	3	12	0	12	19	0	19	13	0	13
8-9	17	0	17	26	0	26	31	0	31	26	0	26
9-10	30	0	30	38	0	38	40	0	40	37	0	37
10-11	39	30	9	47	13	34	47	16	31	44	23	21
11-12	43	30	13	51	13	38	50	16	34	47	23	24
12-13	43	30	13	50	13	37	50	16	34	45	23	22
13-14	39	30	9	45	13	32	46	16	30	39	23	16
14-15	32	30	2	38	13	25	39	16	23	31	23	8
15-16	21	21-30	0	28	13	15	30	16	15	19	19-23	0
16-17	5	5-30	0	16	13	3	19	16	3.0	6	6-23	0
17-18	0	0	0	3	3-13	0	8	8-16	0	0	0	0
18-19	0	0	0	0	13	0	1	1-16	0	0	0	0
19-20	0	0	0	0	13	0	0	16	0	0	0	0
20-21	0	0	0	0	13	0	0	16	0	0	0	0
21-22	0	0	0	0	13	0	0	16	0	0	0	0
22-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Специфика электрических нагрузок спортивного зала позволяет принять электрическую нагрузку (освещение, электроотопление и кондиционирование, тренажёры и пр.) постоянной в течение рабочего дня. В таблице 3 эта нагрузка, для рассматриваемого объекта, равна: зимняя -30 кВт, весенняя -13 кВт, летняя – 16 кВт, осенняя – 23 кВт. При отсутствии инсоляции электрические нагрузки весной и летом питаются от аккумуляторов, осенью и зимой – от дополнительного источника, восполняющего недостаток фотогенерации для увеличенного зимнего спроса на электроэнергию. Величина этой энергии, например для лета, составляет за время с 17 до 22 часов 70 - 80 кВтч. Эта обменная энергия должна предварительно восполняться в аккумуляторах в течение светового дня, продолжающегося 13 – 14 часов. Из этого времени разумно вычесть утренние часы до начала рабочего дня, чтобы направить электроэнергию фотоэлектростанции на подогрев воды к началу рабочего дня – 10 часов. Дополнительный энергоисточник осенью и зимой необходимо включать на 5 – 6 часов.

Затраты энергии на нагрев воды можно рассчитать по формуле:

$$Pt = M \cdot C_w \cdot (H_2 - H_1), \quad (2)$$

где t - время нагрева воды [сек.], период дискретизации процессов равен 1 часу или 3600 сек.; P - мощность нагревательного элемента [кВт]; M - масса воды [кг]; $C_w = 4,2$ кДж/кг град - удельная теплоемкость воды; H_2 и H_1 – конечная и начальная температуры воды [20]. Расчёты показывают, что 600 литров воды и рассматриваемых условиях.

Временные диаграммы почасового изменения энергетического баланса системы энергообеспечения объекта в условиях рассматриваемого примера приведены на рисунке 3.

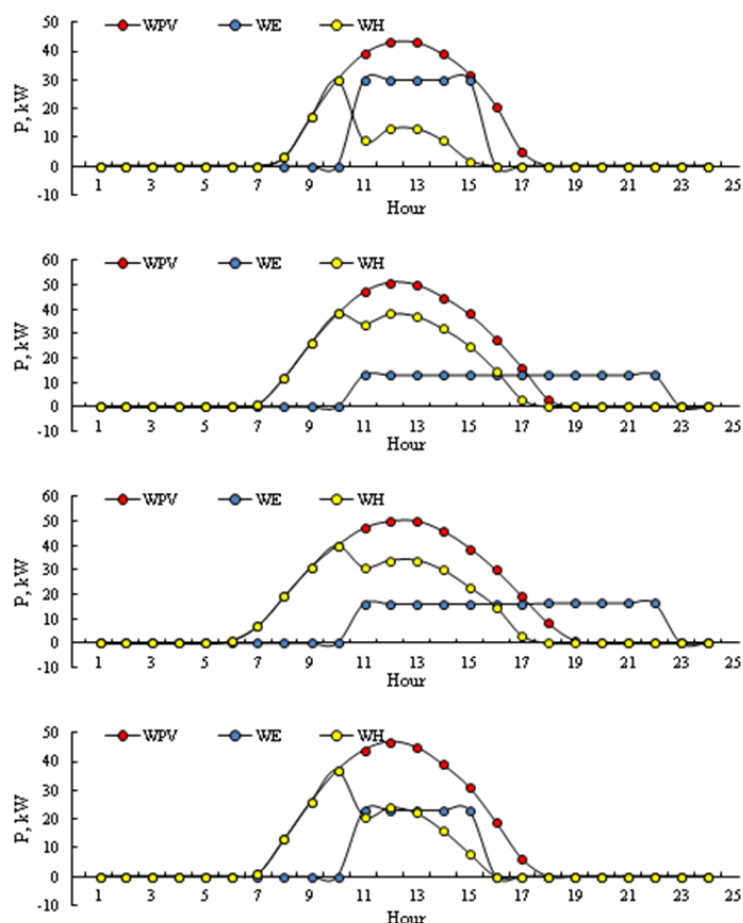


Рис. 3. Временные зависимости усреднённой энергии потребления электрических нагрузок WE, электронагревательных нагрузок WH и энергии генерации фотоэлектростанции WPV в течение средних суток сезонов года.

Fig. 3. Time dependence of the average energy of electrical loads WE, electrical heating loads WH and the generation energy of a photovoltaic power plant WPV during the average day of the seasons.

Результаты

В результате исследований установлено, что электроэнергия массива фотоэлектрических модулей установленной мощностью 76 кВт, достаточно для полного обеспечения тренажерного зала электрической и тепловой энергией в весенний и летний сезоны. В осенне-зимний период фотоэлектрическая генерация не покрывает более половины необходимой объекту электроэнергии, поэтому в вечернее время рабочего дня электрические нагрузки необходимо обеспечивать электроэнергией от дополнительного энергоисточника.

Формирование оптимального алгоритма функционирования фотоэлектрической системы электроснабжения с электрохимическими и электротепловыми аккумуляторами и дополнительным источником энергии основывается на уравнении энергетического баланса:

$$WPV - WES + WDG = WE + WH. \quad (3)$$

где WPV, WES, WDG, WE, WH - соответственно, энергия фотоэлектрической генерации, энергия заряда или разряда аккумуляторной батареи, энергия дополнительного источника, электроэнергия электрических нагрузок, электроэнергия для горячего водоснабжения.

Особенностью фотоэлектростанций является генерация максимума мощности для текущей инсоляции при соответствующих значениях взаимоувязанных параметров тока и напряжения. В фотоэлектростанциях с электрохимическими аккумуляторами максимальная производительность достигается с помощью контроллеров заряда аккумуляторов, использующих технологию поиска точки максимальной мощности на вольт-амперных характеристиках фотоэлектрических модулей (так называемая MPPT технология).

В рассматриваемом случае электроэнергия фотоэлектростанции распределяется между электрическими нагрузками – через электрохимический аккумулятор с контроллером заряда и электротепловыми – через электротепловой контроллер.

Следовательно, возникает задача использования МРРТ технологий для таких энергосистем с целью повышения их энергоэффективности. Очевидно, что применение МРРТ технологии, при условии электропитания тепловых нагрузок отдельно от электрических (без использования аккумуляторов), возможно только для одного типа электрических нагрузок – тепловых. Контроллер заряда электрохимических аккумуляторов в этом случае может быть выполнен по технологии широтно-импульсной модуляции с простым методом заряда постоянным током. Электротепловой контроллер выполняется на основе регулятора мощности, обеспечивающего съём максимальной мощности с фотоэлектрических модулей для текущей инсоляции с учётом действующих электрических нагрузок.

Функциональная схема, реализующая рекомендованный выше принцип управления гибридным энергокомплексом приведена на рисунке 4.

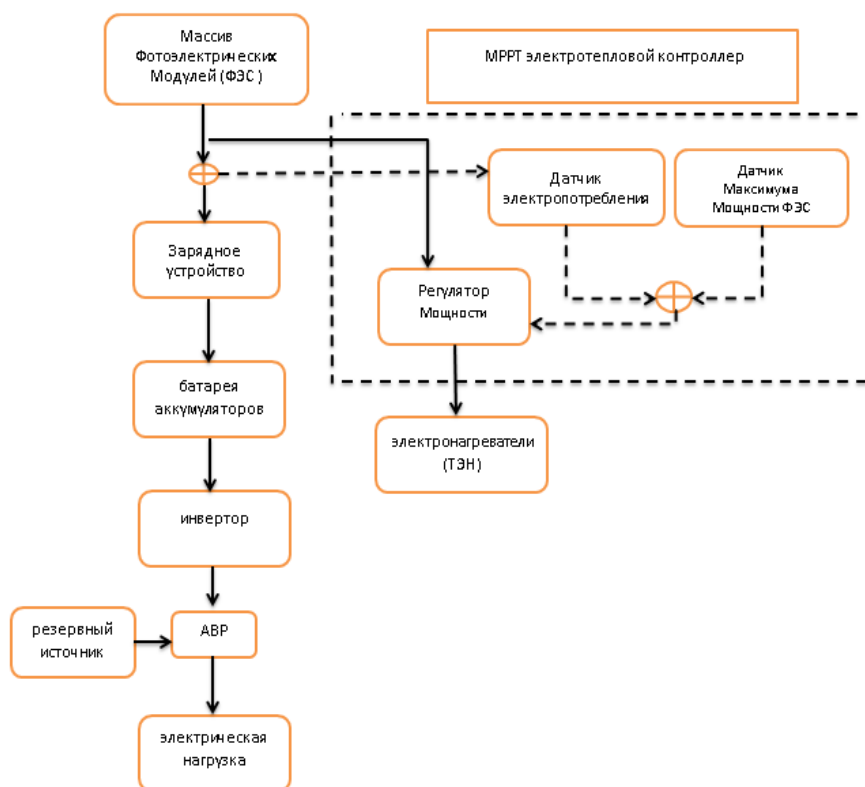


Рис.4. Функциональная схема гибридного фотоэлектрического комплекса.

Fig.4. Functional diagram of a hybrid photovoltaic complex.

Функционирование канала электропитания электрических нагрузок осуществляется обычным способом - последовательным преобразованием электроэнергии фотоэлектрических модулей: контроллер заряда, батарея аккумуляторов, инвертор и электрическая нагрузка с возможностью включения через АВР резервного источника энергии.

Алгоритм работы электротеплового канала основан на поддержании оптимального баланса мощностей системы электроснабжения путём добавления к текущей мощности электрических нагрузок, регулируемой мощности электронагревательных элементов до максимального приближения к потенциально возможной, для действующей инсоляции, мощности фотоэлектрической системы. Эту функцию выполняет регулятор мощности, задающим воздействием для которого является разность между текущими мощностями: максимально возможной, для действующей инсоляции, генерацией фотоэлектрических модулей и мощности, потребляемой в это время электрическими нагрузками. Определение потенциально возможной мощности фотоэлектрической системы для изменяющейся во времени энергии солнечного излучения и температуры для конкретных солнечных модулей осуществляется «Датчиком максимума мощности ФЭС». Мощность электрических нагрузок определяется «Датчиком электропотребления».

Обсуждение и заключение

Материалы исследований, приведённые в статье, являются оригинальными и обладают научной новизной. Отличительными особенностями результатов по сравнению с

известными публикациями по близкой тематике являются: обоснование применения электротепловых технологий для аккумулирования электроэнергии фото-электростанций, разработка МРРТ-алгоритма функционирования для тепловых контроллеров, разработка рекомендаций по построению фото-электростанций для обеспечения электрической и тепловой энергией социально-бытовых потребителей Ирака.

Основные результаты можно резюмировать следующим образом:

1. Для снижения стоимости фотоэлектростанций, питающих потребителей с высокой долей электротеплых нагрузок, например бытовые и социальные объекты, целесообразно питать электронагреватели непосредственно от массива фотоэлектрических модулей через специальные электротепловые контроллеры. Это позволяет снижать установленную мощность энергетического оборудования для питания только электрических нагрузок. Кроме того, использование систем аккумулирования солнечной энергии с электрохимическими и электротепловыми накопителями позволяет уменьшить запас энергии, необходимый для электрохимических батарей из-за высвобождения энергии, потребляемой тепловыми нагрузками. Особенно перспективно использование фотоэлектростанций с комбинированным аккумулированием в регионах с высоким энергетическим потенциалом солнечного излучения, в частности в Ираке.

2. Моделирование энергетических балансов фотоэлектрической системы электроснабжения с комбинированной системой аккумулирования, проведенное для разных сезонов года, показало, что предложенная технология позволяет полностью обеспечивать электричеством и горячей водой бытовые и социальные объекты Ирака большую часть времени. Дополнительный источник энергии потребуется на несколько часов в осенне – зимний период.

3. Реализация МРРТ технологий в предложенной фотоэлектрической системе электроснабжения имеет особенности, связанные с выделением тепловых нагрузок. Установлено, что обеспечение максимальной эффективности использования массива фотоэлектрических модулей, в рассматриваемой энергетической системе, целесообразно осуществлять путём использования электронагревательных элементов как управляемого потребителя – аккумулятора части генерируемой электроэнергии фотоэлектростанции, выделяемой для нагревания воды.

4. Предложен алгоритм функционирования фотоэлектростанций с электрохимическими и электротепловыми аккумуляторами. Будущие исследования в рассматриваемой области целесообразно посвятить более детальному рассмотрению МРРТ технологиям в подобных энергетических системах

Литература

1. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение: статистика мирового рынка и особенности российского опыта // Теплоэнергетика. 2018. No 10. С. 78–88.
2. Свидерская О.В. Основы энергосбережения // ТетраСистемс. 2019. 176с.
3. Nazri N.S, et al. Energy economic analysis of photovoltaic thermal-thermoelectric (PVT-TE) air collectors // Renewable and Sustainable Energy Review. 2018. V. 92. pp. 187-97.
4. Эльмохлови А.Э., Очков В.Ф., Казанджан Б.И. оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21(1-2). С. 43-54.
5. Nazri N.S, et al. Mathematical modeling of photovoltaic thermal thermoelectric (PVT-TE) air collector // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. Vol. 9. N.2. pp. 795-802.
6. Fudholi A, et al. Review on energy and energy analysis of solar air heater // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9. no. 1. pp. 420-26.
7. Fudholi A., et al. Review on solar collector for agricultural produce // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9. no. 1. pp. 414-19.
8. Fudholi A., et al. Primary study of tracking photovoltaic system for a mobile station in Malaysia // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2018. V. 9(1). pp. 427-32.
9. Абасс А.З., Павлюченко, Д.А., Кобобель, И.В. Перспективы использования солнечной энергии в Ираке // Вестник Казанского Государственного Энергетического Университета. 2020.Т(45) №1.С. 63-70.
10. Абасс А.З., Павлюченко Д.А., Балабанов А.М., и др. Включение в парогазовый цикл газотурбинных электростанций ирака солнечной энергии как способ решения дефицита мощности энергосистемы страны // Известия высших учебных заведений.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22(2). С. 98-107.

11. Лукутин Б.В., Муравьев Д.И. Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020.Т. 331. No 6. URL:<http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU/TPU/book/376831>.

12. Секретарев Ю.А., Панова Я.В. Выбор и принятие Решений в электроэнергетике // Новосибирск, 2018.

13. Мировые тарифы: газ, бензин, и электроэнергия. Электронный ресурс. Доступно по URL: antonio-merloni.ru/world-gas-tariffs (Ссылка активна на: 26.02.2022).

14. Пашкевич Р.И., Павлов К.А. Математическое моделирование комбинированной дизель-солнечной электростанции для децентрализованного электроснабжения потребителей // Электрические станции. Возобновляемая энергетика. 2019. No 9. С. 30–35.

15. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Максимов Н.А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро- солнечной электростанции // Промышленная энергетика. 2019. No 10. С. 47–53.

16. Лукутин Б.В. Интеллектуальные системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. 115 с.

17. Ахмед З. Абасс, Павлюченко Д.А., Лесс В.М. Математическая модель оптимального размещения гибридной электростанции с комбинированным циклом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. No 1. С. 18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.

18. Iraq. Power engineering // Polpred.com. № 3607553. doi: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32).

19. NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Available at: <http://www.instea.com/Solar/grid.cgi.htm> (accessed 26.02.2022).

20. Лукутин Б.В., Кадхим К.Х. Фотоэлектрические электростанции с электрохимическим и тепловым накопителем энергии в Ираке // Томского политехнического университета Geo Assets Engineering, 2021. Т.332(1). С.174-183.

Авторы публикации

Лукутин Борис Владимирович – д-р. техн. наук, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Аль-Мажиди Каррар Хамид – аспирант, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Reference

1. Butuzov VA. Solar heat supply: statistics of the world market and features of the Russian experience. *Teploenergetika* 2018;10:78–88.

2. Sviderskaya OV. *Fundamentals of energy saving* / TetraSystems, 2019. 176 p.

3. NS. Nazri, et al. *Energy economic analysis of photovoltaic thermal-thermoelectric (PVT-TE) air collectors*. Renewable and Sustainable Energy Review. 2018; 92:187-97, 2018.

4. Elmohlawy AE, Ochkov VF, Kazandzhan BI. Evaluation of the performance and energy efficiency of integrated solar combined cycle power plant. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):43-54. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-43-54>.

5. N.S. Nazri, et al. Mathematical modeling of photovoltaic thermal thermoelectric (PVT-TE) air collector. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2018;9(2):795-802.

6. A. Fudholi, et al. Review on exergy and energy analysis of solar air heater. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1):420-26, 2018.

7. A. Fudholi, et al. Review on solar collector for agricultural produce. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1):414-19, 2018.

8. A. Fudholi, et al. Primary study of tracking photovoltaic system for a mobile station in Malaysia. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2018;9(1): 427-32.

9. Abass AZ, Pavlyuchenko DA, Kobobel I.V. Prospects for the use of solar energy in Iraq. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2020;1(45):63-70.

10. Ahmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A, Balabanov A.M, VM. Less. Inclusion of solar energy in iraq gas-turbine power plants as a method of solving the country's energy system shortage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-98-107.
11. Lukutin BV, Muravyov DI. Prospects for decentralized DC power supply systems with distributed solar generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(6). Available at: <http://catalog.lib.tpu.ru/catalogue/simple/document/RU/TPU/book/376831> (accessed 15 November 2020).
12. Sekretarev YuA, Panova YaV. *Choice and decision-making in the electric power industry*. Novosibirsk, 2018.
13. *World Tariffs: Gas, Gasoline, and Electricity*. Available at: anto-nio-merloni.ru/world-gas-tariffs (accessed 26.02.2022).
14. Pashkevich RI, Pavlov KA. *Mathematical modeling of a combined diesel-solar power plant for decentralized power supply to consumers*. *Electric Stations. Renewable Energy* 2019;9:30-35.
15. Lavrik AYU, Zhukovsky YuL, Maksimov N.A. *Determination of the optimal composition of a backup hybrid wind-solar power plant*. *Industrial Energy*. 2019;10:47–53.
16. Lukutin BV. *Intelligent power supply systems with wind and solar power plants*. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University. 2019. 115 p.
17. Akhmed Z. Abass, Pavlyuchenko D.A., Less V.M. *Mathematical model of the optimal placement of a hybrid power plant with a combined cycle*. *journal of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(1):18-32. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-18-32.
18. Iraq. *Power engineering*. *Polpred.com*. № 3607553. doi: [polpred.com>news/?cnt=618/sector=19](http://polpred.com/news/?cnt=618/sector=19).
19. *NASA Surface Meteorology and Solar Energy*. Available at: www.instesre.com/Solar/grid.cgi.htm (accessed 26.02.2022).
20. Lukutin BV, Kadhim KH. *Photovoltaic Power Plants With Electrochemical And Thermal Energy Storage In Iraq*. *The Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*. 2021;332(1):174-183.

Authors of the publication

Boris V. Lukutin – National Research Tomsk Polytechnic University.

Karrar Hameed Kadhim – National Research Tomsk Polytechnic University.

Получено 20.03.2022г.

Отредактировано 04.04.2022г.

Принято 11.04.2022г.



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИНТОВЫХ РАСШИРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Р.Р. Ротач, Ю.В. Ваньков

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

rita-nurkaeva@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Повышение эффективности работы котельной. Разработка схемы внедрения винтовых расширительных машин (ВРМ) в тепловую схему котельной. Расчет основных технических характеристик ВРМ и сетевых подогревателей. Расчет экономического эффекта и оценка целесообразности применения энергосберегающих технологий на промышленном предприятии. *МЕТОДЫ.* В работе использованы методы вычислительной математики, теории теплообмена, методы технико-экономических расчетов в энергетике, термодинамического анализа энергоустановок. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье приведен вариант повышения эффективности работы котельного цеха в г. Нефтекамск путем включения в работу паровых котлов ДКВР, стоящих на консервации, и внедрения винтовых расширительных машин. Предлагается в неотапливаемый период (апрель – сентябрь) включать паровые котлы для выработки пара. Пар будет проходить через ВРМ, понижая свое давление до необходимого для сетевых подогревателей для последующего подогрева воды на горячее водоснабжение. При этом на генераторах ВРМ будет вырабатываться электроэнергия, которая будет передаваться на шины собственных нужд котельной. По результатам расчетов, к установке было выбрано две ВРМ мощностью 700 кВт каждая, а также три сетевых подогревателя. При рассматриваемом включении дополнительных паровых котлов и ВРМ в неотапливаемый период года, выработанная электроэнергия полностью покрывает затраты на собственные нужды котельной. Срок окупаемости проекта составит 5 лет. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты технико-экономических расчетов показывают целесообразность внедрения ВРМ в тепловую схему котельной как энергосберегающее мероприятие.

Ключевые слова: винтовая расширительная машина; котельная; паровой котел; выработка электроэнергии; собственные нужды котельной; энергосбережение; когенерация.

Для цитирования: Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В. Повышение эффективности котельной при использовании винтовых расширительных машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE BOILER HOUSE USING SCREW EXPANSION MACHINES

RR. Rotach, YuV. Vankov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

rita-nurkaeva@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Improving the efficiency of the boiler house. Development of a scheme for the introduction of screw expansion machines (SEM) into the thermal scheme of a boiler house. Calculation of the main technical characteristics of SEM and network heaters. Calculation of the economic effect and assessment of the feasibility of using energy-saving technologies in an industrial enterprise. *METHODS.* The work uses methods of computational mathematics, the theory of heat and mass transfer, methods of technical and economic calculations in the energy sector, and thermodynamic analysis of power plants. *RESULTS.* The article presents a variant of improving the efficiency of the boiler shop in Neftekamsk by putting into operation the steam boilers DDVWT, which are mothballed, and introducing screw expansion machines. It is proposed in the non-heating period (April - September) to turn on steam boilers to generate steam. The steam will pass through the SEM, lowering its pressure to that required for network heaters for subsequent heating of water for hot water supply. At the same time, electricity will be generated on the SEM generators, which will be transmitted to the auxiliary tires of the boiler house. According

to the results of calculations, two SEM with a capacity of 700 kW each, as well as three network heaters, were selected for the installation. With the considered inclusion of additional steam boilers and SEM in the non-heating period of the year, the generated electricity will fully cover the costs for the auxiliary needs of the boiler house. The payback period of the project will be 5 years. **CONCLUSION.** The results of technical and economic calculations show the feasibility of introducing SEM into the thermal scheme of the boiler house as an energy-saving measure.

Keywords: screw expansion machine; boiler room; steam boiler; power generation; own needs of the boiler room; energy saving; cogeneration.

For citation: Rotach RR, Vankov YuV. Increasing the efficiency of the boiler house using screw expansion machines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):14-23. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-14-23.

Введение

Необходимым условием повышения энергоэффективности экономики России является максимально возможное использование тепловых нагрузок для организации комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (когенерации), позволяющей максимально эффективно реализовать потенциал топлива с получением не только теплоты, но и электроэнергии. При этом коэффициент использования теплоты (КИТ) может достигать 85-90% [1-3].

В последние годы особенность развития когенерации заключается в активном сооружении крупными предприятиями собственных электрогенерирующих источников малой и средней мощности. Это позволяет им в короткие сроки решить локальные проблемы дефицита электроэнергии, повысить надежность электроснабжения, уменьшить производственные издержки.

В малой энергетике уровень внедрения малых когенерационных установок остается пока весьма низким. Это объясняется в основном экономическими факторами – необходимостью привлечения заемных инвестиций, их высокой стоимостью. Однако продолжающийся рост цен на топливо и совершенствование оборудования когенерационных установок в скором времени могут изменить ситуацию. Если раньше в нашей стране потребности в тепловой и электрической энергии (в джоулях) соотносились как 2:1, то сегодня это соотношение 1:1, и в будущем будет стремиться к 1:2. Это означает, что выработанная когенерационными установками электроэнергия будет крайне востребована [4-7].

Зарубежный опыт показывает, что именно благодаря когенерации и энергоэффективности системы централизованного теплоснабжения оказываются очень экологичны и рентабельны. Без когенерации система ЦТ оказывается не конкурентоспособной и проигрывает локальным системам теплоснабжения [8-11].

Важной предпосылкой для крупномасштабного развития когенерации в нашей стране является наличие большого количества котельных, суммарной мощностью около 450 тыс. Гкал/ч, из которых примерно 75% - газовые котельные, в первую очередь пригодные для преобразования в мини-ТЭЦ [12].

Развитие когенерации будет способствовать снижению потребностей во вводах новых генерирующих мощностей, сокращению объемов нового электросетевого строительства, уменьшению потерь в электрических сетях. Когенерационные установки имеют преимущества в части сроков сооружения и заблаговременности инвестиций по сравнению с крупными ТЭС [13,14] (табл. 1).

Таблица 1

Энергетический потенциал котельных России [1]

Показатель	Мощность котельной, Гкал/ч			Всего
	<3	3-20	20-100	
Суммарная мощность котельных, на базе которых эффективны установки с когенерацией, тыс.Гкал/час	10	27	35	72
Потенциал электрической мощности, ГВт	4	23	14	41
Потенциал выработки электроэнергии за счет когенерации, млрд.кВт·ч/год	22	94	59	175
Емкость рынка (программа на 10 лет), млрд.руб/год	24	81	77	182

В большинстве паровых котельных установлены котлы различных типов, вырабатывающие пар с давлением 1,3 МПа. В то же время потребители используют его, как правило, при давлении 0,3-0,4 МПа. Снижение давления пара осуществляется в дроссельных устройствах, при этом потенциальная энергия его теряется безвозвратно.

Неоправданных потерь поможет избежать полезное использование этого перепада давления посредством установки паровых двигателей или противодавленческих турбин малой мощности, вырабатывающих электроэнергию на базе теплового потребления и выполняющих функцию редуктора при снижении давления пара до требуемого потребителями. Использование в данных котельных малогабаритных паровых двигателей с генератором электроэнергии, работающих за счет избыточного давления пара, будет способствовать обеспечению полного или частичного автономного электроснабжения предприятия, повышению надежности его энергообеспечения, значительному снижению расходов на потребляемую из системы электроэнергию [15-16].

Одним из путей решения вопроса реконструкции относительно небольших паровых котельных в мини-ТЭЦ можно считать использование винтового двигателя, который работает на теремом в дроссельных устройствах перепада давления.

Материалы и методы

Описание объектов и методов исследования.

Объектом исследования является котельный цех №2 с водогрейными и паровыми котлами в г. Нефтекамск.

В статье рассматривается модернизация КЦ-2 БашПТС-Нефтекамск путем ее надстройки винтовыми расширительными машинами для выработки электроэнергии для покрытия собственных нужд.

Котельный цех-2 (КЦ-2), расположенный в г. Нефтекамск, респ. Башкортостан, является теплоснабжающим предприятием, обеспечивающим население теплом и горячей водой. Рабочее топливо котельной-природный газ, резервное-мазут.

На сегодняшний день в КЦ-2 установлено 5 водогрейных котлов, из них 3 котла марки ПТВМ-100, 2 котла ПТВМ-50. Также в котельной установлено 6 паровых котлов: 3 котла марки ДКВР-10-13, 2 котла ДКВР-20-13. Два котла ДКВР-10 (ст. №5 и ст. №6) находятся в работе для подогрева мазута в мазутном хозяйстве, котлы работают попеременно. Остальные 4 котла находятся на длительной консервации и в работе котельной не участвуют. Все котлы работают на общий коллектор пара.

Рассматривается вариант модернизации, состоящий в выведении из консервации одного котла ДКВР-20 и одного котла ДКВР-10 в неотапливаемый период года (с апреля по сентябрь). Пар после котла предлагается направлять в винтовую расширительную машину (ВРМ) для дальнейшего снижения давления пара и выработки электроэнергии на собственные нужды котельной. Отработанный в турбине пар поступает в установленные сетевые подогреватели для нагрева сетевой воды потребителям для нужд ГВС.

Этот эффект не ограничивается только энергосбережением, но и позволяет значительно повысить надежность электроснабжения котельной, а также полностью или частично отказаться от покупки электроэнергии извне на покрытие собственных нужд, получая при этом значительную экономию.

Электроэнергию с генераторов винтовых машин предлагается направлять покрытие собственных нужд котельного цеха.

К расходу электроэнергии на собственные нужды котельной относятся затраты на: электродвигатели тягодутьевых установок котлов; электродвигатели сетевых, рециркуляционных, питательных, подпиточных, насосов химводоочистки, мазутного хозяйства; приводы электрифицированных задвижек; электродвигатели систем отопления и вентиляции производственных помещений; электродвигатели ремонтных мастерских; освещение производственных помещений. Расходы электроэнергии на рециркуляцию воды в котел, на перекачку сырой, подпиточной, питательной воды, на рециркуляцию мазута определялись по соответствующим характеристикам насосов при их средней эксплуатационной производительности и составили 437 кВт и 353 кВт соответственно для отопительного и летнего периодов. Расход электроэнергии на тягодутьевые установки определялся при испытаниях котлов. Расход электроэнергии на прочие нужды (электропривод задвижек, освещение, вентиляцию и отопление производственных помещений и т.д.) определялись по установленной мощности соответствующих механизмов производственных нужд с учетом их загрузки и составили 196 кВт и 134 кВт соответственно для отопительного и летнего периодов.

Краткое описание паровых котлов котельной

ДКВР-10/13, ДКВР-20/13 - газомазутные котлы, предназначенные для выработки

насыщенного пара при сжигании жидкого и газообразного топлива. Котлы являются вертикально-водотрубными, двухбарабанными, экранированными, с естественной циркуляцией. Оборудованы питательным экономайзером некипящего типа. На котлах установлены газомазутные горелки ГМГ-5,6. Подача воздуха осуществляется вентилятором ВД10/20, а тяга обеспечивается дымососом Д-13,5. Котел предназначен для выработки насыщенного пара при сжигании жидкого и газообразного топлива. Проектная производительность 10/20 т/час. Давление пара 13 кгс/см².

Характеристики паровых котлов ДКВР, установленных в КЦ-2, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики паровых котлов

Наименование	ДКВР-20-13	ДКВР-10-13
Производительность, т/ч	20	10
Давление на выходе из котла, МПа	1,3	1,3
Температура на выходе из котла, °С	195	195
Энтальпия на выходе из котла, кДж/кг	2809,65	2809,65

По методике, изложенной [2], были выполнены расчеты по определению мощности машины. По итогу расчетов (табл.3), было выбрано к установке 2 ВРМ мощностью 700 кВт.

Таблица 3

Характеристики винтовых расширительных машин

Наименование	Значение
Производительность, кг/с	8,3
Давление на входе, МПа	1,3
Температура на входе, °С	195
Давление на выходе, МПа	0,3
Температура на выходе, °С	133
Теоретический расход пара, кг/с	8,3
Диаметр роторов, м	0,4
Длина роторов, м	0,516
Мощность на валу генератора, кВт	700

На рисунке 1 представлена схема внедрения ВРМ в котельный цех.

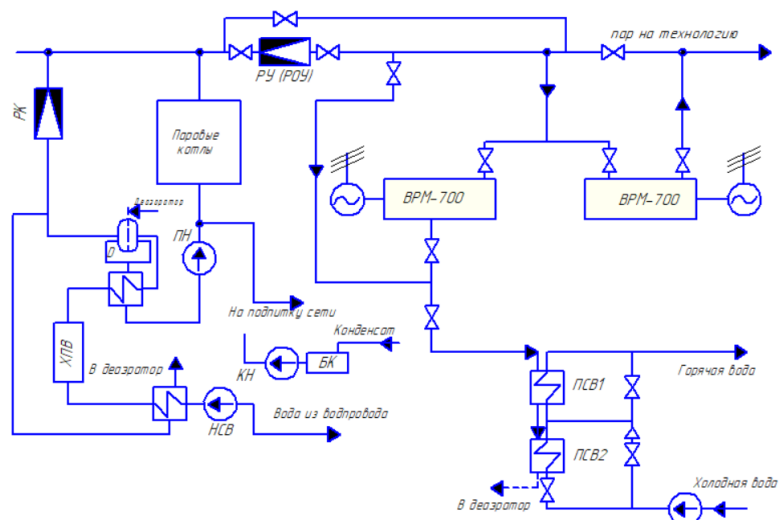


Рис.1. Схема внедрения ВРМ в котельный цех
РЧ – редуцирующий клапан, РУ- редуцирующее устройство, ХПВ – химическая подготовка воды, КН – конденсатный насос, БК – бак конденсата, НСВ – насос сетевой воды, ПСВ – подогреватель сетевой воды

Fig.1. SEM implementation scheme in the boiler room
PRV – pressure reducing valve, RD- reducing device, CWT – chemical water treatment, CP – condensate pump, CT – condensate tank, NWP – network water pump, HWH – heating water heater, FP – feed pump

Таблица 4

Исходные данные для расчета подогревателя сетевой воды

Наименование	Значение
Давление греющего пара, p_n , МПа	0,3
Температура пара, t_n , °C	133
Температура насыщения, t_n , °C	95
Энтальпия греющего пара, i_n , кДж/кг	2724,9
Температура воды на входе в подогреватель, $t_{в.вх}$, °C	50
Энтальпия воды на входе в подогреватель, $i_{в.вх}$, кДж/кг	209,93
Температура конденсата, t_k , °C	93
Энтальпия конденсата, i_k , кДж/кг	389,6
Энтальпия насыщения, i_n , кДж/кг	398,18
Расход пара, D_n , кг/с	6,94

На рисунке 2 представлена схема входящих и выходящих потоков в сетевой подогреватель.

Тепловой расчет подогревателя сетевой воды

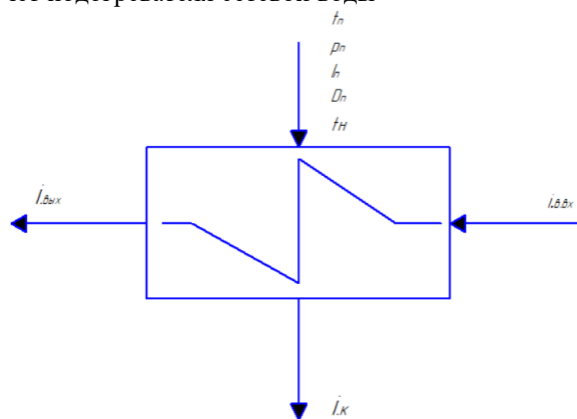


Рис. 2. Схема входящих и выходящих потоков в сетевой подогреватель

Fig.2. Scheme of incoming and outgoing flows to the network heater

Пар поступает в подогреватель из ВРМ. Тепловой баланс по паровой стороне позволяет определить расход воды:

$$D_n (i_n - i_k) = \frac{1}{\eta} D_{\text{в}} (i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}) \quad (1)$$

$$D_{\text{в}} = \frac{D_n (i_n - i_k) \eta}{i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}} = \frac{6,94 \cdot (2724,9 - 389,6) \cdot 0,995}{377,38 - 209,93} = 96,3 \text{ кг/с} \quad (2)$$

По режиму потребителю в летний период отпускается 800 т/ч (222 кг/с) горячей воды. Исходя из расчетов, необходимо поставить три подогревателя сетевой воды.

Тепловая нагрузка подогревателя определяется по водяной стороне:

$$Q = D_{\text{в}} \cdot (i_{\text{в.вых}} - i_{\text{в.вх}}) = 96,3 \cdot (377,38 - 209,93) = 16125 \text{ кВт} \quad (3)$$

Среднегеометрическая разность температур в подогревателе:

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}}{\ln \frac{t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}}}{\theta}} \quad (4)$$

Примем величину недогрева $\theta =$

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{90 - 50}{\ln \frac{90 - 50}{\theta}} = 13,35^\circ \text{C} \quad (5)$$

Средняя температура воды:

$$t_f = t_n - \Delta t_{\text{ср.лог}} = 95 - 13,35 = 81,65^\circ\text{C} \quad (6)$$

Трубы латунные, следовательно, $\delta = 0,0012$ м, $d_6 = 0,016$ м.

По таблицам воды и водяного пара определяем физические свойства воды при $t_f = 81,65$:

$$\lambda_f = 0,688 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot K, \rho_f = 970,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \nu_f = 3,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \text{Pr}_f = 2,18$$

Скорость жидкости для стационарных теплообменников обычно принимается 1,5...2,5 м/с. Принимаем $\omega_6 = 1,5$ м/с.

Коэффициент B_1 , зависящий от комплекса B , учитывающий свойства пленки конденсата при теплоте конденсации r' , определим при средней температуре стенки. Определим величину B при $t_n = 95^\circ\text{C}$.

По таблицам воды и водяного пара определяем физические свойства воды при $t_n = 95^\circ\text{C}$:

$$\mu_{\text{ж}} = 0,0003 \text{ Н} \cdot \frac{\text{с}}{\text{м}^2}, \lambda_{\text{ж}} = 0,6755 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot K, \rho_{\text{ж}} = 962 \text{ кг} / \text{м}^3$$

$$B = \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot g}{\mu_{\text{ж}}}} = \sqrt[4]{\frac{0,6755^3 \cdot 962^2 \cdot 9,81}{0,0003}} = 310,8 \quad (7)$$

Определим величину B_1 при определяющем геометрическом размере $h=0,498$ и удельной теплотой парообразования $r'=2335,3$ кДж/кг.

$$B_1 = cB(r')^{0,25} h^{-0,25} = 1,15 \cdot 310,8 \cdot (2335,3 \cdot 10^3)^{0,25} \cdot 0,468^{-0,25} = 1681 \quad (8)$$

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} - \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} q = 13,35 - \frac{0,001}{107} q \quad (9)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стенки, для латуни примем 107 Вт/(м·К).

По результатам преобразования выражения (9), значение величины $q=60000$ Вт/м·К.

Далее находим поправочный коэффициент:

$$k = \frac{q}{\Delta t_{\text{ср.лог}}} = \frac{60000}{13,35} = 4494 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (10)$$

Поверхность нагрева сетевого подогревателя равна

$$F = \frac{Q_{n4}}{\Delta t_{\text{ср.лог}}} = \frac{16125 \cdot 10^3}{4494 \cdot 13,35} = 268,8 \text{ м}^2 \quad (11)$$

С запасом на заглушаемые при эксплуатации трубки принимаем расчетную поверхность нагрева $F_p = 270$ м².

Результаты теплового расчета сетевого подогревателя представлены в Таблице 5

Таблица 5

Результаты расчета подогревателя сетевой воды

Наименование	Значение
Расход воды, $D_{\text{в}}$, кг/с	96,3
Тепловая нагрузка подогревателя, Q , кВт	16 125
КПД подогревателя, %	0,995
Мощность удельного потока, q , Вт/м·К	60 000
Площадь поверхности нагрева подогревателя, F , м ²	270

Технико-экономический расчет

Средний расход электроэнергии КЦ на собственные нужды с апреля по сентябрь составляет 6000 тыс.кВт·ч.

При работе ВРМ 6 месяцев в год (апрель-сентябрь), будет выработано 6 048 тыс.кВт·ч электроэнергии.

Таким образом, ВРМ полностью покроют затраты на собственные нужды котельной в неотапливаемый период.

Результаты расчетов и их обсуждение

В таблицах 6,7 представлены основные показатели экономической эффективности при внедрении ВРМ в котельный цех за последующие 10 лет.

При анализе таблиц, можно увидеть устойчивую тенденцию к росту всех затрат проекта вследствие ежегодного увеличения коэффициентов индексации. Однако итоговая экономия денежных средств остается достаточно высокой.

Таблица 6

Оценочный расчет экономической эффективности внедрения ВРМ за период 2023-2027 гг.

Год	2023	2024	2025	2026	2027
Экономия э/э на СН, тыс.кВт·ч/год	6048	6048	6048	6048	6048
Цена кВт·ч с учётом индексации, руб./тыс.кВт·ч	4,340	4,488	4,645	4,807	4,975
Экономия на СН, тыс. тыс.руб/год	26 248,32	27 140,76	28 090,69	29 073,86	30 091,45
Затраты на ремонт (среднегодовые) тыс.руб.	400,00	415,20	429,32	444,34	459,89
Потребление газа котлом ДКВР-20, тыс.м ³	3 196,80	3 196,80	3 196,80	3 196,800	3 196,800
Цена газа с учетом индексации, руб./тыс.м ³	5 012,38	5 182,80	5 364,20	5 551,95	5 746,26
Затраты на сжигание газа, тыс.руб.	16 023,58	16 568,38	17 148,27	17 748,46	18 369,66
Итоговая экономия, тыс. руб./год	9 824,74	10 157,18	10 513,10	10 881,06	11 261,90

Таблица 7

Оценочный расчет экономической эффективности внедрения ВРМ за период 2028-2032 гг.

Год	2028	2029	2030	2031	2032
Экономия э/э на СН, тыс.кВт·ч/год	6048	6048	6048	6048	6048
Цена кВт·ч с учётом индексации, руб./тыс.кВт·ч	5,150	5,330	5,516	5,709	5,909
Экономия на СН, тыс. тыс.руб/год	31 144,65	32 234,71	33 362,93	34 530,63	35 739,20
Затраты на ремонт (среднегодовые) тыс.руб.	475,99	492,65	509,89	527,74	546,21
Потребление газа котлом ДКВР-20, тыс.м ³	3 196,80	3 196,80	3 196,80	3 196,80	3 196,80
Цена газа с учетом индексации, руб./тыс.м ³	5 947,39	6 155,54	6 370,99	6 593,97	6 824,76
Затраты на сжигание газа, тыс.руб.	19 012,59	19 678,04	20 366,76	21 079,60	21 817,39
Итоговая экономия, тыс. руб./год	11 656,06	12 064,03	12 486,27	12 923,29	13 375,60

В таблице 8 представлены основные экономические показатели проекта.

Проект внедрения ВРМ в котельную имеет хорошие экономические показатели. Об этом свидетельствует внутренняя норма доходности, процент которой больше ставки дисконтирования, равный 10%. Индекс прибыльности проекта больше 1, что тоже является хорошим показателем. Период окупаемости составляет 5 лет. Для энергетической отрасли данное значение является оптимальным.

Таблица 8

Экономические показатели проекта по внедрению ВРМ

№	Показатель	Значение
1	Чистый дисконтированный доход (NPV), тыс.руб.	18 881,60
2	Внутренняя норма доходности (IRR), %	17,70
3	Индекс прибыльности (PI)	1,37
4	Период окупаемости (PBP), лет	5

Выводы

В статье рассмотрен вариант повышения эффективности котельной в г. Нефтекамск путем внедрения ВРМ в тепловую схему котельной. Предлагается в неотапливаемый период (апрель – сентябрь) включать паровые котлы, находящиеся на консервации, для выработки пара. Пар будет проходить через ВРМ, понижая свое давление до необходимого для сетевых подогревателей для последующего подогрева воды на горячее водоснабжение. При этом на генераторах ВРМ будет вырабатываться электроэнергия, которая будет передаваться на шины собственных нужд котельной.

По результатам расчетов было выбрано к установке 2 ВРМ мощностью 700 кВт каждая, а также 3 сетевых подогревателя, с площадью поверхности 270 м².

Включение двух дополнительных паровых котлов ДКВР с установкой трех сетевых подогревателей в неотапливаемый период, а также надстройка котельной двумя винтовыми расширительными машинами, даст возможность полностью покрывать собственные нужды котельной в электроэнергии на данный период.

Положительная экономическая эффективность проекта обусловлена следующими расчетными показателями: ЧДД = 18881,60 тыс.руб., ВНД = 17,7%, индекс прибыльности = 1,37, период окупаемости – 5 лет. Итоговая экономия в 2023 г. составит 9824,74 тыс. руб. и будет расти из года в год, учитывая изменение коэффициента индексации

Литература

1. Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А. Схемы ПГУ-КЭС и ПГУ-ТЭЦ с системами одновременного совмещенного производства тепла и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 1 (87). С. 20–23.
2. Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Зиганшин Ш.Г., Измайлова Е.В. Оптимизация тепловой схемы путем внедрения паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. №21(5). С. 14-21.
3. Березин С. Р., Носков А. Н., Щеглов Г. А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 1. С. 50-56.
4. Калинин Н.В., Жигулина Е.В., Мартынов А.В. Эффективность расширительных машин в составе установок и систем // Надежность и безопасность энергетики. 2017. №4 (35). С.46-49.
5. Куличихин В.В., Тюняев М.В. Детандер-генераторные агрегаты в энергетике России. Мифы и реальность // Надежность и безопасность энергетики. 2017; (4):62-69.
6. Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н. Совместная генерация произведенных энергоносителей (обзор) // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 6–29.
7. Агабабов В.С., Петин С.Н., Борисова П.Н. Термодинамический анализ схемы бестопливной установки для одновременной генерации электроэнергии и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 4 (102). С. 39–45.
8. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии // АВОК. 2017. № 1. С. 51-55.
9. Wei He, Jihong Wang. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V.87. pp.77-95.
10. Rotach R., Vankov Y., Ziganshin S., 2019b. Efficiency of Introducing a Steam Screw-Rotor Machine to the Heating Power Plant Circuit. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE), Volume 140, pp. 1–4
11. Vankov JV, Rotach RR, Laptev SV, Ziganshin SG, Afanaseva OV. Introduction of a Steam Screw-Rotor Machine to Improve the Energy and Economic Efficiency of Chemical Enterprises: International Journal of Technology (IJTech). 2020. V. 11. No 8.
12. Antonio Giuffrida. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles: Applied Energy. 2017. V. 193.
13. Giuseppe Bianchi, Stuart Kennedy, Obadah Zaher, Savvas A. Tassou, Jeremy Miller, Hussam Jouhara. Numerical modeling of a two-phase twin-screw expander for Trilateral Flash Cycle applications: International Journal of Refrigeration. 2018. V. 88.
14. Dumont O., Parthoens A. Experimental investigation and optimal performance assessment of four volumetric expanders (scroll, screw, piston and roots) tested in a small-scale organic Rankine cycle system: Energy. 2018. V.165. pt A. pp.1119-1127.

15. G.Li, B.Lei, Yu.Wu. Influence of inlet pressure and rotational speed on the performance of high pressure single screw expander prototype: *Energy*. 2018. V.147. pp. 279-285.
16. Diao A., Wang Yu., Guo Yu. Development and application of screw expander in natural gas pressure energy recovery at city gas station: *Applied Thermal Engineering*. 2018. V.14. pp. 665-673.

Авторы публикации

Ротач Рита Рустемовна – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Klimenko AV, Agababov VS, Rogova AA, Tideman PA. Schemes of CCGT-CPP and CCGT-CHP with systems of simultaneous combined production of heat and cold. *Energy saving and water treatment*. 2017;1(87):20-23.
2. Rotach RR, Vankov YuV, Ziganshin ShG, Izmaylova EV. Optimization of the thermal circuit by introduction of the steam screw-rotor machine. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):14-21. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-14-21.
3. Berezin SR, Noskov AN, Shcheglov GA. Determination of the parameters of the working process of a steam screw engine. *News of higher educational institutions. Engineering*. 2016;1:50-56.
4. Kalinin NV, ZHigulina EV, Martynov AV. Efficiency of expansion machines in plants and systems. *Reliability and security of energy*. 2017;4(35):46-49.
5. Kulichikhin VV, Tyunyaev MV. Expander-generator units in the energy sector of Russia. Myths and reality. *Reliability and safety of energy*. 2017;4:62-69.
6. Klimenko AV, Agababov VS, Borisova PN. Co-generation of produced energy carriers (overview). *Scientific and technical statements of SPbPU. Natural and engineering sciences*. 2019;26-29. doi: 10.18721/JEST.25201.
7. Agababov VS, Petin SN, Borisova PN Thermodynamic analysis of the scheme of a fuel-free installation for the simultaneous generation of electricity and cold. *Energy saving and water treatment*. 2017;4 (102):39-45.
8. Tabunshchikov YuA, Brodach MM. Experimental studies of optimal energy consumption control. *ABOK*. 2017;1:51-55.
9. Wei He, Jihong Wang. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;87:77-95.
10. Rotach R, Vankov Y, Ziganshin S. 2019b. *Efficiency of Introducing a Steam Screw-Rotor Machine to the Heating Power Plant Circuit*. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE), V. 140, pp. 1–4.
11. Vankov JV, Rotach RR, Laptev SV. Introduction of a Steam Screw-Rotor Machine to Improve the Energy and Economic Efficiency of Chemical Enterprises: *International Journal of Technology (IJTech)*. 2020;11:8.
12. Antonio Giuffrida. Improving the semi-empirical modelling of a single-screw expander for small organic Rankine cycles: *Applied Energy*. 2017. V. 193.
13. Giuseppe Bianchi, Stuart Kennedy, Obadah Zaher, Savvas A. Tassou, Jeremy Miller, Hussam Jouhara. Numerical modeling of a two-phase twin-screw expander for Trilateral Flash Cycle applications: *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 88.
14. Dumont O, Parthoens A. Experimental investigation and optimal performance assessment of four volumetric expanders (scroll, screw, piston and roots) tested in a small-scale organic Rankine cycle system: *Energy*. 2018;165(A):1119-1127.
15. Li G, Lei B, Wu Yu. Influence of inlet pressure and rotational speed on the performance of high pressure single screw expander prototype: *Energy*. 2018;147:279-285.
16. Diao A, Wang Yu, Guo Yu. Development and application of screw expander in natural gas pressure energy recovery at city gas station: *Applied Thermal Engineering*. 2018;142:665-673.

Authors of publication

Rita R. Rotach – graduate student, Kazan State Power Engineering University.

Yurii V. Vankov – doctor of technical sciences, professor, Department of Industrial heat power and heat supply systems, Kazan state power engineering university.

Получено **31.03.2022г.**

Отредактировано **01.04.2022г.**

Принято **04.04.2022г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



УДК 621.311.4

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ 35/6(10) КВ

И.В. Ившин¹, А.Р. Галяутдинова¹, О.В. Владимиров¹, М.Ф. Низамиев¹, Е.Н. Карпов²,
Э.П. Мельник²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский юридический университет МВД России

Alsu296@ya.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является создание интеллектуальной системы оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, которая в режиме реального времени будет мониторить состояние параметров и оценивать техническое состояние оборудования трансформаторной подстанции. *МЕТОДЫ.* Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции основывается на определении интегрального показателя технического состояния оборудования, а также используется метод парных сравнений. При принятии решений в системном анализе применяется метод декомпозиции. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассмотрена структура интеллектуальной системы. Создана программная часть данной системы, которая в режиме реального времени рассчитывает коэффициенты экспресс-анализа оборудования трансформаторной подстанции. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработанная интеллектуальная система позволяет провести дистанционное наблюдение, снизить вероятность появления аварийных ситуаций, осуществить контроль состояния действующего оборудования, спрогнозировать изменения технического состояния и перейти к организации технического обслуживания и ремонта основного энергетического оборудования по фактическому состоянию.

Ключевые слова: интеллектуальная система оценки; трансформаторная подстанция; техническое состояние; контроль; диагностика; система мониторинга; методика оценки; диагностируемые параметры; экспресс-анализ.

Для цитирования: Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф., Е.Н. Карпов Е.Н., Э.П. Мельник Э.П. Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 24-35. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35.

THE INTELLIGENT SYSTEM FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION A TRANSFORMER SUBSTATION OF 35/6(10) KV

IV. Ivshin¹, AR. Galyautdinova¹, OV. Vladimirov¹, MF. Nizamiev¹, EN. Karpov²,
EP. Melnik²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Law University of Russia, Kazan, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* The purpose of this work is to create an intelligent system for assessing the technical condition of a 35/6 (10) kV transformer substation, which will monitor the state of parameters in real time and evaluate the technical condition of the transformer substation equipment. *METHODS.* The method of online assessment of the technical condition of a transformer substation is based on the determination of an integral indicator of the technical condition of the equipment, and the method of paired comparisons is also used. When making decisions in system analysis, the decomposition method is used. *RESULTS.* The structure of the intellectual system is considered. The software part of this system has been created, which calculates the coefficients of express analysis of transformer substation equipment in real time. *CONCLUSION.* The developed intelligent system allows for remote monitoring, reducing the likelihood of emergencies, monitoring the condition of existing equipment, predicting changes in the technical condition and proceeding to the organization of maintenance and repair of the main power equipment according to the actual condition.

Keywords: intellectual evaluation system; transformer substation; technical condition; control; diagnostics; monitoring system; evaluation technique; diagnosed parameters; express analysis.

For citation: Ivshin IV, Galyautdinova AR, Vladimirov OV, Nizamiev MF, Karpov EN, Melnik EP. The intelligent system for assessing the technical condition a transformer substation of 35/6(10) Kv. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):24-35. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-24-35.

Введение и литературный обзор

Цифровизация топливно-энергетического комплекса во всем мире привела к активному внедрению цифровых технологий и платформенных решений во все сегменты отрасли. Актуальная в Российской Федерации концепция «Цифровая трансформация 2030» в электроэнергетике предъявляет высокие требования к системе контроля и обеспечения надежности функционирования оборудования [1]. Проблема надежности системы электроснабжения в современном мире является одним из главных аспектов обеспечения энергетической безопасности. Эффективность работы электротехнического оборудования зависит от его технического состояния. В процессе эксплуатации под воздействием различных факторов, условий и режимов работы исходное состояние оборудования непрерывно ухудшается, снижается надежность и увеличивается вероятность возникновения отказов. Надежность электрооборудования зависит не только от качества изготовления, но и от правильного технического обслуживания, своевременного ремонта. Использование системы планово-предупредительных ремонтов для поддержания необходимой эксплуатационной готовности оборудования становится затратным и неэффективным[2].

Целью работы является создание интеллектуальной системы оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, которая состоит из системы мониторинга и методики онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ. Интеллектуальная система позволяет:

- совершенствовать методы раннего выявления и локализации дефектов электрооборудования электрических подстанций;
- эффективно использовать энергетическое оборудование на основе организации технического обслуживания и ремонта оборудования с учетом оценки технического состояния;
- проводить дистанционное обследование в процессе эксплуатации под нагрузкой;

- проводить статистическую обработку данных, получаемых от установленных датчиков на трансформаторной подстанции в режиме онлайн.

В интеллектуальной системе оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ применяются цифровые сквозные технологии, как технология беспроводной связи (*Ethernet*), обработка Больших данных (*Big Data*), обработка данных в режиме реального времени.

Объектами оценки технического состояния являются основное оборудование трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ: силовой трансформатор, высоковольтный выключатель, разъединитель, ОПН, кабельные линии (рис. 1)



Рис.1. Установленное оборудование на трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ

Fig.1. Installed equipment at the transformer substation 35/6(10) kV.

Методы

В технических системах для получения информации, ее анализа и принятия решений необходимо создавать автоматизированные информационные системы[3]. Интеллектуальная система – автоматизированная система, которая основана на знаниях, или комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для реализации основной задачи – осуществления поддержки деятельности человека и поиска информации в режиме продвинутого диалога на естественном языке. Система реализуется путем создания следующих шести основных блоков (рис.2).

- 1) Подсистема сбора данных
- 2) Подсистема предобработки данных
- 3) База данных и система управления базами данных (СУБД)
- 4) Подсистема обработки данных
- 5) Подсистема извлечения знаний
- 6) Подсистема вывода [4].



Рис.2. Структура интеллектуальной системы

Fig.2. The structure of the intellectual system.

На этапе сбора данных определяются все возможные источники данных. Данный блок требуется для оценивания объема данных, определения порядка их поступления и необходимого объема хранилища для формирования базы данных на следующем этапе. Источниками информации могут быть:

- протоколы диагностики и испытаний;
- система диагностики и датчики;
- система мониторинга.

В разработанной системе источниками информации являются данные диагностируемых параметров, полученных из системы мониторинга. Система мониторинга имеет три уровня:

- уровень сбора данных, который включает в себя датчики и контрольно-измерительные приборы;
- уровень первичной обработки измеряемых параметров, команд управления и передача данных на верхний уровень (программируемые логические контроллеры);

Контроллер диагностики, установленной на трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ состоит производит опрос внешних подключаемых устройств и передает информацию в заданном формате на верхний уровень подстанции.

- уровень консолидации, хранения, визуализации и анализа данных (диспетчерский пункт, автоматизированное рабочее место, серверы).

В таблице 1 приведен перечень диагностических параметров, которые поступают в подсистему сбора данных и оборудование для их регистрации.

Таблица 1

Перечень измерений для анализа основного оборудования подстанции

Тип оборудования	Диагностические параметры	Оборудование
Силовой трансформатор ТМН – 6300 35/6,3	Хроматографический анализ масла	<i>Intellix GLA 100</i>
	Влагосодержание	<i>TDM-10</i>
	Температуры масла в баке	<i>TDM-S/ TDM-10</i>
	Температура контактных соединений вводов	<i>RFSens, WDM-T</i>
	Уровень частичных разрядов	<i>TDM-S, TDM-10</i>

Продолжение таблицы 1

	Вибрация	Датчики вибрации ИВД-3Ц-3, <i>TDM-10</i>
ВВН – СЭЩ – 35	Коммутационный ресурс выключателей	<i>BDM, BMP3 - 100</i>
	Токи нагрузки по фазам выключателя	
	Форма графиков токов соленоидов	
Разъединители 35 кВ	Температура контактов	<i>RFSens, WDM-T</i>
ОПН 35 кВ	Информация о срабатывании	ОПН-2, <i>WDM</i>
	Импульсы тока	ОПН-2, <i>WDM</i>
Кабельные линии	Уровень частичных разрядов	<i>CDM-15</i>

Подсистема предобработки данных состоит из двух последовательных этапов – предварительной обработки данных и формирования базы данных. Наличие предварительного этапа обработки данных необходимо для структуризации и нормировки данных, а также исключения из их числа выбросов. На основе обработанной информации формируется набор данных об объекте исследования, хранящийся некоторым упорядоченным способом (базой данных). База данных формируется из следующих сведений об объекте исследования:

- паспортные данные оборудования;
- данные мониторинга основного оборудования подстанции;
- нормативно-техническая документация.

Подсистема обработки данных состоит из двух блоков – «интеллектуальный анализ» и «база знаний». Под интеллектуальным анализом понимается подсистема анализа данных, на основе разработанной методики онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ представляет собой процесс определения интегрального показателя технического состояния (коэффициента экспресс-анализа) по результатам экспресс-анализа оборудования подстанции. Результатом оценки служит КЭА оборудования, который представляется в виде численной величины от 0 (наихудшее значение) до 100 (наилучшее значение).

Как известно из [3], для решения задач системного анализа наиболее эффективным способом является метод декомпозиции. Данный метод использован при разработке архитектуры системы оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, которая включает в себя:

- оценку параметров экспресс-анализа оборудования;
 - расчет КЭА параметров оборудования;
 - расчет КЭА всей трансформаторной подстанции;
 - сравнение КЭА с диапазоном по 100-бальной шкале;
- определение технического состояния для каждого оборудования подстанции и всей ПС в целом.

Подсистема извлечения знаний представляет собой накопление, передачу и преобразование данных для подсистемы вывода. В качестве минимального набора исходных данных для определения состояния оборудования подстанции необходимы данные системы мониторинга. На основании методики онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции[5], разработаны алгоритмы расчета КЭА для каждого элемента подстанции и всей трансформаторной подстанции. КЭА каждого элемента трансформаторной подстанции рассчитывается индивидуально по выбранным параметрам. Каждый измеренный параметр технического состояния оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений от предельно-допустимых. Весовой коэффициент каждому параметру присваивается по важности. Для определения весовых коэффициентов применяется метод Саати[6]. Идея метода состоит в том, что попарно сравниваются каждые два объекта и определяется первенство одного из них. Расчет КЭА основного оборудования трансформаторной подстанции вычисляется по формуле:

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

где KB_i – значение весового коэффициента выбранных параметров;

B_i – значение, определенное в соответствии с методикой балльной оценки параметров[4].

Далее приведен расчет КЭА для каждого оборудования трансформаторной подстанции:

$$КЭА_{тр} = 100 \times (0,287 \times x_1 + 0,287 \times x_2 + 0,138 \times x_3 + 0,138 \times x_4 + 0,07 \times x_5 + 0,05 \times x_6 + 0,03 \times x_7) / 4 = 25 \times (0,287 \times x_1 + 0,287 \times x_2 + 0,138 \times x_3 + 0,138 \times x_4 + 0,07 \times x_5 + 0,05 \times x_6 + 0,03 \times x_7),$$

где x_1 – значение уровня растворенных в масле газов: H_2 , CO в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_2 – значение разрядной активности в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_3 – значение балл влагосодержания в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_4 – значение виброскорости в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_5 – значение температуры масла в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_6 - значение температуры вводов в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_7 - значение срока службы в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки[7].

$$КЭА_{\text{выкл}} = 100 \times (0,34 \times x_1 + 0,33 \times x_2 + 0,33 \times x_3) / 4 = 25 \times (0,34 \times x_1 + 0,33 \times x_2 + 0,33 \times x_3),$$

где x_1 - значение времени отключения в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки;

x_2, x_3 - значения числа срабатываний при $I_{\text{ном}}$ и $I_{\text{откл}}$ в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки.

$$КЭА_{\text{ОПН}} = 100 \times (1 \times x_1) / 4 = 25 \times x_1,$$

где x_1 – значение тока утечки в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки параметров.

$$КЭА_{\text{разъед}} = 100 \times (1 \times x_1) / 4 = 25 \times x_1,$$

где x_1 – значение температуры фаз в баллах, определенное в соответствии с методикой балльной оценки параметров.

КЭА для однотипных элементов (отходящий выключателей на 6 кВ, кабельных линий на 6 кВ) вычисляется как среднее арифметическое КЭА. Например, КЭА выключателей 6 кВ первой секции шин определяется по формуле:

$$КЭА_{\text{В1 6 кВ}} = \frac{\sum КЭА_{\text{В1}}}{N_{\text{В1}}},$$

где $\sum КЭА_{\text{В1}}$ - сумма коэффициентов экспресс-анализа выключателей 6 кВ первой секции шин;

$N_{\text{В1}}$ - количество выключателей 6 кВ первой секции шин[8].

Итоговый КЭА определяется по способу соединения элементов трансформаторной подстанции:

$$КЭА = \sum (КЭА \times B), (2)$$

где КЭА - итоговый КЭА основного оборудования ПС (силового трансформатора, высоковольтного выключателя, разъединителя, ОПН, кабельных линий 6 кВ, выключателей 6 кВ);

B - весовой коэффициент оборудования трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по степени важности, на основании статистики отказов[9].

Результаты оценки экспресс-анализа основного оборудования формируется в зависимости от соответствия полученного значения КЭА одному из диапазонов (рис.3) и выводятся в подсистему вывода.

Критическое (красный) $КЭА \leq 25$	Неудовлетворительное (оранжевый) $25 < КЭА \leq 50$	Удовлетворительное (желтый) $50 < КЭА \leq 70$	Хорошее (зеленый) $70 < КЭА \leq 85$	Очень хорошее (Т-зеленый) $85 < КЭА \leq 100$
---	---	--	--	---

Рис 3. Шкала оценивания КЭА.

Fig. 3. CEA rating scale.

Таким образом, математически оценку состояния основного оборудования подстанции (SS) можно представить в следующем виде:

$$SS = TR \cup CL \cup Q \cup QR \cup OPN, (3)$$

где TR - множество оценок состояния силовых трансформаторов;

CL - множество оценок состояния кабельных линий электропередачи;

Q - множество оценок состояния выключателей;

QR - множество оценок состояния разъединителей;

OPN – множество оценок состояния ОПН.

Программное обеспечение для расчета КЭА разработано на ядре программного средства *Grafana* - платформы с открытым исходным кодом для визуализации, мониторинга

и анализа данных. Grafana является универсальным клиентом для систем хранения метрик, с помощью нее осуществляется получение данных из базы данных. Полученные результаты Grafana отображает в доступном виде[10]. Это могут быть как простые таблицы, так и графики, распределения и десятки других форматов отображения данных. Запросы отрисовываются на графиках, в таблицах или выводятся напрямую в абсолютных значениях. Сами отображения могут быть сгруппированы между собой и собраны в интерактивные дашборды[11]. Верхним уровнем системы мониторинга подстанции является портал *kgeu*. Данные, собираемые с датчиков посредством контроллера диагностики, установленных на соответствующих узлах оборудования, передаются на портал *kgeu* в режиме реального времени.

На рис.4 представлен температурный график трансформатора №2 на напряжение 35/6 кВ по трем фазам с указанием минимального, максимального и текущего значений. Данные температуры вводов трансформатора передаются в режиме реального времени из системы мониторинга - датчика *RF-Sens*, установленный на трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ.

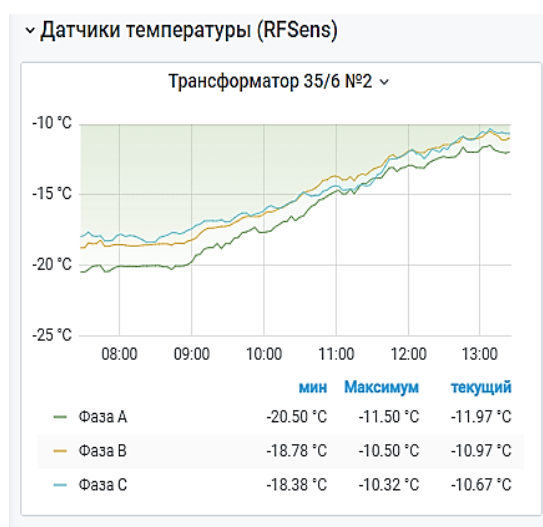


Рис.4. График температур от датчика RF-Sens

Fig.4. Temperature graph from the RF-Sens sensor.

На рисунке 5 представлены данные, получаемые из датчиков ОПН блока *WDM*: количество импульсов тока по трем фазам в четырех группах: до 1 кА, до 5 кА, до 10 кА, более 10 кА и среднеквадратичное значение тока по трем гармоникам. Энергия всех зарегистрированных импульсов суммируется, и полученное значение сравнивается с допустимым паспортным значением для оценки остаточного ресурса ОПН.

В портале *kgeu* создана вкладка диагностика, где выводятся расчетные КЭА оборудования трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, согласно разработанным алгоритмам[12]. На рисунке 6 представлены эти данные. Для визуализации все данные сохраняются в виде графиков, соответственно можно отследить время выхода из строя элементов трансформаторной подстанции.



Рис.5. Получаемые данные от датчиков ОПН блока WDM *Fig.5. Received data from block WDM arrester sensors.*

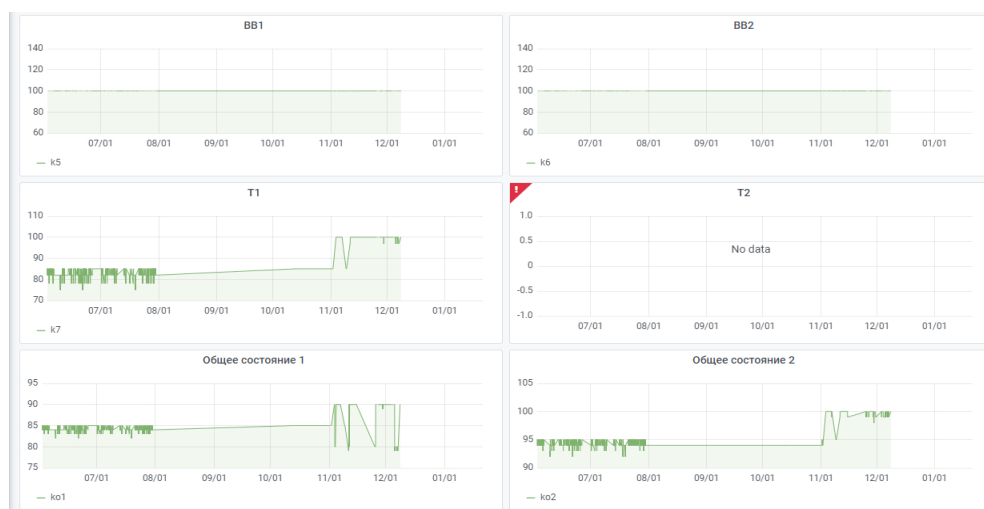


Рис. 6. Расчетные КЭА оборудования *Fig. 6. Calculated CEA equipment of transformer substation.*

Цветовая сигнализация системы оценки технического состояния трансформаторной подстанции осуществляется на верхнем уровне системы [13]. Исходя из того, в какой диапазон попадает КЭА, на экране высвечивается цвет диапазона из рисунка 3. При необходимости можно посмотреть техническое состояние отдельного оборудования подстанции и их параметров, не выезжая на трансформаторную подстанцию.

Результаты

Создана интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ, которая включает в себя систему мониторинга и методику онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ. Алгоритм расчета КЭА составлен на основании вышеописанной методики онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции. Алгоритмы расчета КЭА основного оборудования трансформаторной подстанции реализованы в программном обеспечении. Разработанное программное обеспечение предназначено для визуального отображения параметров оборудования подстанции. На основании полученных данных в режиме реального времени рассчитывается КЭА, производится их запись в базу данных.

Заключение

Большинство систем контроля технического состояния, на сегодняшний день, работают отдельно друг от друга и позволяют оценить техническое состояние каждого элемента подстанции индивидуально [14]. Разработанная интеллектуальная система обеспечивает процесс удаленного наблюдения и контроль состояния действующего оборудования, прогнозирования изменения технического состояния на основе собранных данных; позволяет оценить техническое состояние трансформаторной подстанции комплексно [15]. Программное обеспечение методики позволяет проводить статистическую обработку данных и выводить полученные знания в подсистему вывода (АРМ) в режиме реального времени.

В рамках разработки интеллектуальной системы оценки была создана и установлена система мониторинга технического состояния основного оборудования; разработаны алгоритмы расчета КЭА всей трансформаторной подстанции. Разработана методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции, которая реализована в разработанном программном обеспечении.

Интеллектуальная система оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ подходит под актуальную концепцию «Цифровая трансформация 2030», т.к. применяются сквозные технологии. Данная система позволяет проводить оценку технического состояния эксплуатируемого оборудования, повысить надежность и отказоустойчивость их функционирования, уменьшить вероятность возникновения аварийных ситуаций, снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт основного оборудования трансформаторной подстанции.

Литература

1. Rozhentcova N.V., Galyautdinova A.R., Khayaliev R.A. et al. Automated Diagnostic System for Power Transformers using a QR Code // International Journal of Technology. 2020. T.11(8). С. 1519-1527.
2. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017г. №676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».
3. Byerly J.M., Schneider C., Schloss R et al. Real-time circuit breaker health diagnostics // 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2017. pp.1-6.
4. Khalyasmaa A., Matrenin P., Eroshenko S. Averaged Errors as a Risk Factor for Intelligent Forecasting Systems Operation in the Power Industry // Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 2021. pp.192-196.
5. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф., Усманов И.К. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по коэффициенту экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 14-26.
6. www.edu.tltsu.ru Метод анализа иерархий (метод Т.Л. Саати).
7. Денисова А.Р., Спасов Д.П., Галяутдинова А.Р. и др. Исследование работоспособности и качества функционирования трансформаторного оборудования электротехнических систем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ 2020. Т. 22. №3. С. 23-35.
8. Khruslov L., Rostovikov M., Shishov V. Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education // Proceeding of the International Scientific and Practical Conference – INFORNO-2016. 2016.pp 639-642.
9. Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. и др. Разработка системы мониторинга технического состояния основного оборудования трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ // Материалы Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения - 2021 «Энергетика и цифровая трансформация», Казань, 28-30 апреля 2021. Т.1. С. 97-101.

10. Nikulin S.A., Karnavsky E.L. Optimization of modes of installations of electrochemical protection // Control systems and information technologies. 2014. No. 3 (57).pp. 64-68.
11. Li Z., Yang J., Zhang Z. et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2018. pp. 1-4. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm // 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development. 2021. 651. pp.1-8.
12. Gao Q., Zhong C., Wang Y., Wang P., Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm // 3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development. 2021. V. 651. pp.1-8.
13. Eroshenko, S.A., Khalyasmaa, A.I., Snegirev, D.A., Dubailova, V.V., Romanov, A.M., Butusov, D.N. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation // Applied Sciences (Switzerland), 10(22), art. no. 8265, 2020. pp.1-22.
14. Farhadi M., Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power // International Journal of Electrical and Computer Engineering. August 2019. V.9(4). pp. 2205-2211.
15. Alimi, O.A., Ouahada, K., Abu-Mahfouz, A.M. A Review of Machine Learning Approaches to Power System Security and Stability // IEEE Access, 8, art. no. 9121208. 2020. pp. 113512-113531.

Авторы публикации

Ившин Игорь Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Галаяутдинова Алсу Ренатовна – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Карпов Евгений Николаевич – канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры «Тактико-специальная и огневая подготовка», Казанский юридический институт МВД России.

Мельник Эдуард Петрович – старший преподаватель кафедры «Тактико-специальная и огневая подготовка», Казанский юридический институт МВД России.

References

1. Rozhentcova NV, Galyautdinova AR, Khayaliev RA. et al. *Automated Diagnostic System for Power Transformers using a QR Code*. International Journal of Technology. 2020;11(8):1519-1527.

2. Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation 26.07.2017 № 676 *On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and power lines of power plants and electrical networks.*
3. Byerly JM, Schneider C, Schloss R et al. Real-time circuit breaker health diagnostics. 70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), 2017:1-6.
4. Khalyasmaa A, Matrenin P, Eroshenko S. *Averaged Errors as a Risk Factor for Intelligent Forecasting Systems Operation in the Power Industry.* Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021. 2021:192-196.
5. Ivshin IV, Galyautdinova AR, Vladimirov OV, Nizamiev MF, et al. *Methodology for online assessment of the technical condition of a 35/6(10) kV transformer substation by the express analysis coefficient.* ENERGY PROBLEMS.2021;23(4):14-26(2021).
6. www.edu.tltsu.ru Method of analysis of hierarchies (method of T.L. Saati).
7. Denisova AR, Spasov DP, Galyautdinova AR. et al. Research of working capacity and quality of functioning of transformer equipment of electrical systems. *ENERGY PROBLEMS.* 2020;22(3):23-35.
8. Khruslov L, Rostovikov M, Shishov V. *Web-based power quality monitoring system of smart transformer substation RTP-34 MPEI for engineering education.* Proceeding of the International Scientific and Practical Conference-INFORNO-2016. 2016: 639-642.
9. Galyautdinova AR, Vladimirov OV, Nizamiev MF. *Development of a system for monitoring the technical condition of the main equipment of a 35/6 (10) kV transformer substation.* Materials of the International Youth Scientific Conference Tinchurin Readings-2021 Energy and Digital Transformation. 2021;1:97-101.
10. Nikulin SA, Karnavsky EL. Optimization of modes of installations of electrochemical protection. *Control systems and information technologies.* 2014;3 (57):64-68.
11. Li Z, Yang J, Zhang Z, et al. Real Time Evaluation Algorithm for Measurement Performance of Substation Voltage Transformer Based on Artificial Neural Network. *2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2018:1-4.
12. Gao Q, Zhong C, Wang Y, Wang P, Yu Z., Zhang J. Defect analysis of the same batch of substation equipment based on big data analysis algorithm. 2021. 651:1-8.
13. Eroshenko SA, Khalyasmaa *3rd International Conference on Green Energy and Sustainable Development.* AI, Snegirev DA, Dubailova VV. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. Applied Sciences (Switzerland). 2020: 1-22:10(22), art. no. 8265.
14. Farhadi M, Mollayi N. Application of the least square support vector machine for point-to-point forecasting of the PV power. *International Journal of Electrical and Computer Engineering.* 2019;9(4): 2205 – 2211.
15. Alimi OA, Ouahada K, Abu-Mahfouz AM. A Review of Machine Learning Approaches to Power System Security and Stability. *IEEE Access*, 8, art. no. 9121208, 2020: 113512-113531.

Authors of the publication

Igor V. Ivshin –Kazan State Power Engineering University.

Alsu R. Galyautdinova – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University.

Evgeny N. Karpov - Kazan Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia.

Eduard P. Melnik - Kazan Law University of Russia, Kazan, Russia.

Получено ***25.03.2022г.***

Отредактировано ***13.04.2022г.***

Принято ***13.04.2022г.***



ОЦЕНКА ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПИТАЮЩИХ ЗАРЯДНЫЕ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА

А. Альзаккар¹, Н.П. Местников², В.В. Максимов¹, И.М. Валеев¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com¹

Резюме: Обеспечение устойчивости напряжения энергетической системы является одним из ключевых проблем в планировании и эксплуатации энергосистемы. В настоящий момент в результате ряда технологических инцидентов в виде нарушения устойчивости напряжения энергосистемы были испытаны многослойные перцептроны на территории различных странах ЦЕЛЬ. Разработка интеллектуального подхода к оценке Индекса Устойчивости Напряжения нагрузки (ИУН) в энергосистеме с использованием методов вычислительного интеллекта (нейронные сети). МЕТОДЫ. В ходе проведения данных исследований применен способ оценки ИУН, который применяется для мониторинга устойчивости напряжения в энергосистеме с помощью метода «СмартПарк». РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены результаты обеспечения этапа разработки, который обосновывает возможность применения Многослойного Перцептрона (МСП) для оценки ИУН с высокой степенью точности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В ходе выполнения данных исследований авторами статьи выдвинуты следующие выводы: представлен подход, основанный на базе многослойной перцептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью; проведена оценка ИУН на примере энергосистемы с применением метода «СмартПарк»; представленный подход нейронной сети не зависит от напряжения холостого хода на определенной шине нагрузки; наличие показателей активной мощности, реактивной мощности и напряжения на шине нагрузки достаточно для проведения оценки ИУН; подход МСП позволяет точно оценить ИУН даже при изменении топологии и условий эксплуатации. Полученные показатели могут быть применены в изменении методики оценки устойчивости напряжения в электротехнических системах и комплексах и расчета их рабочих режимов.

Ключевые слова: устойчивость; линия электропередачи; СмартПарк; ИУН; нейронная сеть; многослойный перцептрон.

Благодарности: выражаем слова благодарности в адрес доктора технических наук, профессора И.М. Валеева за экспертные советы и поддержку на протяжении всей научно-исследовательской работы, а также доктора технических наук, профессора Максимова В.В. за поддержку по лабораторной части настоящей статьи. Вместе с тем данная статья выполнена во исполнение обязательств Гранта СВФУ им. М.К. Аммосова на публикацию научно-исследовательских статей от 01.2022 года.

Для цитирования: Альзаккар А., Местников Н.П., Максимов В.В., Валеев И.М. Оценка индекса устойчивости напряжения электрических сетей питающих зарядные станции электромобилей с применением многослойного перцептрона // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 36-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49.

ASSESSMENT OF THE VOLTAGE STABILITY INDEX OF ELECTRIC NETWORKS SUPPLYING CHARGING STATIONS USING A MULTILAYER PERCEPTRON

A. Alzakkar¹, NP. Mestnikov², VV. Maksimov¹, IM. Valeev¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-8355-189X>, Ahmadalzakkar86@gmail.com¹

Abstract: Ensuring power system voltage stability is one of the key challenges in power system planning and operation. At the moment, as a result of a number of technological incidents in the form of a violation of the stability of the voltage of the power system, multilayer perceptrons were tested on the territory of various countries. **PURPOSE.** Development of an intelligent approach to assessing the Load Stability Index (LSI) in the power system using computational intelligence methods (neural networks). **METHODS.** In the course of these studies, a method for estimating the ISI was used, which is used to monitor the stability of voltage in the power system using the "Smart Park" calculation method. **RESULTS.** The results of providing the development stage are obtained, which substantiate the possibility of using the Multilayer Perceptron (MLP) for estimating the IEL with a high degree of accuracy. **CONCLUSION.** In the course of these studies, the authors of the article put forward the following conclusions: an approach based on a multilayer perceptron (MPP) neural network with feed-forward is presented; an assessment of the ISI was carried out on the example of a power system using the calculation method "Smart Park"; the presented neural network approach does not depend on the open-circuit voltage on a particular load bus; the presence of indicators of active power, reactive power and voltage on the load bus is sufficient to assess the IPL; The MSP approach allows for an accurate assessment of the ISI even when the topology and operating conditions change. The obtained indicators can be applied in changing the methodology for assessing the stability of voltage in electrical systems and complexes and calculating their operating modes.

Key words: Stability; transmission lines; Smart Park; VSI; neural network; multilayer perceptron.

Acknowledgments: We express our gratitude to the Doctor of Technical Sciences, Professor I.M. Valeev for expert advice and support throughout the research work, as well as the Doctor of Technical Sciences, Professor Maximov V.V. for support in the laboratory part of this article. At the same time, this article was fulfilled in fulfillment of the obligations of the Grant of SVFU named after M.K. Ammosov to publish research articles of 01.2022.

For citation: Alzakkar A, Mestnikov NP, Maksimov VV, Valeev IM. Assessment of the voltage stability index of electric networks supplying charging stations using a multilayer perceptron. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):36-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-36-49.

Введение

В последние годы устойчивость напряжения энергосистемы стала проблемой, вызывающей серьезную озабоченность, как при планировании, так и при эксплуатации энергосистем, в результате ряда крупных отключений электроэнергии (Блэкаут), которые произошли во многих странах из-за проблем с устойчивостью напряжения [1, 2].

Это произошло в основном из-за того, что энергосистемы работали ближе к своим пределам устойчивости из-за повышенного спроса на электроэнергию [3].

Было проведено множество исследований по оценке индексов устойчивости напряжения в целях определения перечня необходимых действий для снижения риска возникновения неустойчивости в энергосистеме путем улучшения устойчивости ее напряжения.

Сравнительные исследования и анализ шести различных индексов устойчивости напряжения рассмотрены, и представлены A. Mehrizi-Sani, R. Iravani [4].

Авторы R. Nuqui, A. Phadke [5] представили ИУН для простых, но эффективных средств измерения расстояния силовой системы к его пределу устойчивости.

В своих работах авторы R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, Н. П. Шкитина [6, 7] исследовали влияние плагинов Подключаемых Электромобилей (ПЭМ) к стойке для парковки (*СмартПарк*) на устойчивость энергосистемы.

В частности, в процессе исследования, выявлены характеристики напряжения после изменения потребности в мощности ПЭМ. Когда ПЭМ разряжается в сети питания, усиливается поддержка напряжения системы, в то время как действие зарядки сопровождается падением напряжения в области нагрузки. Способ оценки ИУН, разработанный в данном исследовании, применяется для мониторинга устойчивости напряжения в энергосистеме с помощью (*СмартПарк*).

СмартПарк - это специализированное место для парковки автомобилей, созданное с использованием датчиков и современных технологий для быстрого и удобного поиска

парковочных мест, обеспечения безопасности и автоматизации процесса постановки автомобиля на стоянку.

СмартПарк состоит из подключаемых электромобилей (ПЭМ) к энергосистемам. Величина нагрузки ПЭМ в любой момент времени зависит от количества транспортных средств, подключенных к сети, и состояния заряда аккумуляторной батареи. ПЭМ могут, как обеспечивать активную мощность системы, когда батарея разряжена, так и получать энергию от системы во время зарядки. Когда ПЭМ отдают энергию в сеть, они служат дополнительным источником энергии и, следовательно, помогают улучшить запас устойчивости сети. В частности, от ПЭМ можно реализовать дополнительную поддержку реактивной мощности, что улучшает устойчивость напряжения системы.

Авторы С. Canizares, A. de Souza, V. Quintana [8] в своем исследовании описали влияние, используя индекс производительности для обнаружения близости к точке статического коллапса напряжения.

Авторы Р. Kessel, Н. Glavitsch [9] разработали индекс устойчивости по напряжению на основе решения уравнения потока мощности, считая, что индекс является количественной мерой для оценки расстояния фактического состояния системы до предела устойчивости.

Авторы Воропай Н.И., Томин Н.В. [10] исследовали влияние характеристических индикаторов устойчивости ЭЭС (коэффициенты матрицы Якоби установившегося режима, индекс ИНУ) в реализации необходимых мероприятий по предотвращению серьезных аварий.

Научная значимость данного исследования заключается в том, что недостатком использования ИУН является зависимость его расчета от фазора напряжения без нагрузки на шине нагрузки для данной топологии системы. Поскольку напряжение без нагрузки зависит от топологии и операционной точки системы, или изменения рабочей точки. На практике трудно получить напряжение холостого хода в шине.

Авторы G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian [11] в своем исследовании описали эксплицитные выражения двух важных ожиданий, на основе которых получили усредненные уравнения многослойных персептронов.

Предлагаемый нами многослойный персептрон (МСП), способный оценить ИУН без непосредственного получения напряжения, без нагрузки, преодолевает это ограничение и облегчает определение в режиме онлайн и использование ИУН. Количество объектов передачи электроэнергии быстро увеличивается и требует внедрения новых технологий для эффективного и быстрого контроля, чтобы обеспечить их надежность работы.

Материалы и методы.

А. Индекс Устойчивости Напряжения (ИУН):

Индекс нагрузки устойчивости напряжения (ИУН), используемый в этой статье, рассчитывается из измерений Единицы Измерения Фазора (ЕИФ) [5] величин и углов напряжения при нагрузочных шинах. ЕИФ может предоставить измерения в реальном времени фазорам напряжения и фазорам тока инцидента. Данная информация может быть адекватно использована для определения запаса устойчивости напряжения непосредственно из данных проведенных замеров и в режиме реального времени [12]. Минимальное количество ЕИФ, которое наблюдается системой, помещается на заранее определенные шины, чтобы предпринять прямые измерения, в то время как информация фазора напряжения на оставшихся шинах рассчитывается из этих измерений и известных импульсов передачи системы.

Математическая формулировка технологии индекса устойчивости напряжения, используемая в этой статье, получена из уравнений напряжения двухшинной сети (рис.1).

Рассмотрим строку, соединяющую две шины, шины 1 и шина 2, где P_1 и Q_1 являются активной, и реактивной мощностью, вводимыми в линию на шине 1 и P_2 и Q_2 - это активная и реактивная мощность на шине 2, как показано ниже. V_1 и V_2 являются величинами напряжения на шине 1 и шина 2 соответственно и θ_1 и θ_2 и соответствующие углы фазы напряжения [13, 14].

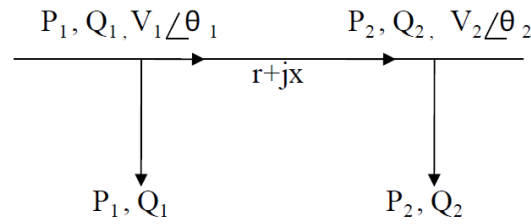


Рис.1. Две шины сети.

Fig. 1. Two buses of the network.

Следующие уравнения могут быть получены в виде выражения 1:

$$|I_1|^2 = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_1^2} \quad (1)$$

Активная мощность на шине 1 вычисляется в виде выражения 2:

$$P_2 = P_1 - P_{\text{потр}} \quad (2)$$

Реактивная мощность на шине 2 вычисляется в виде выражения 3:

$$Q_2 = Q_1 - Q_{\text{потр}} \quad (3)$$

Потери активной мощности вычисляются в виде выражения 4:

$$P_{\text{потр}} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot r \quad (4)$$

Потери реактивной мощности вычисляются в виде выражений 5-7:

$$Q_{\text{потр}} = \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot x \quad (5)$$

$$|I_1|^2 = \frac{\left[P_2^2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot r \right]^2 + \left[Q_2^2 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) \cdot x \right]^2}{V_1^2} \quad (6)$$

$$V_1^2 = V_2^2 + 2(P_2 \cdot r + Q_2 \cdot x) + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_2^2} \right) (r^2 + x^2) \quad (7)$$

Уравнение напряжения может быть записано в виде выражения 8:

$$V_2^4 + V_2^2 \left[2(P_2 r + Q_2 x) + (P_2^2 + Q_2^2)(r^2 + x^2) \right] \quad (8)$$

Выражение представляет собой квадратное уравнение V_2 и имеет действительные корни и вычисляется в виде выражения 9:

$$8P_2 Q_2 r \cdot x - 4V_1^2 (P_2 r + Q_2 x) + V_1^4 - 4(P_2^2 r^2 + Q_2^2 x^2) \geq 0 \quad (9)$$

Что можно упростить вычисляется в виде выражения 10:

$$\frac{4 \left[V_1^2 (P_2 r + Q_2 x) + (P_2 r - Q_2 x)^2 \right]}{V_1^2} \leq 1 \quad (10)$$

Следовательно, индекс устойчивости напряжения определяется выражением 11:

$$ИУН = \frac{4[V_1^2(P_2 r + Q_2 x) + (P_2 r - Q_2 x)^2]}{V_1^2} \quad (11)$$

Но необходимо учесть дополнительные граничные условия:

$$V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - V_2^2 = P_2 r + Q_2 x \quad (12)$$

$$V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) = P_2 r - Q_2 x \quad (13)$$

Подстановка уравнений (12) и (13) в (11) дает закономерность определения показателя ИУН в виде выражения 14:

$$ИУН = \frac{4[V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - V_2^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_2)]}{V_1^2} \quad (14)$$

Уравнение для ИУН применяется к эквивалентной схеме Тевенина [15] с учетом шины нагрузки, как показано на рисунке 2.

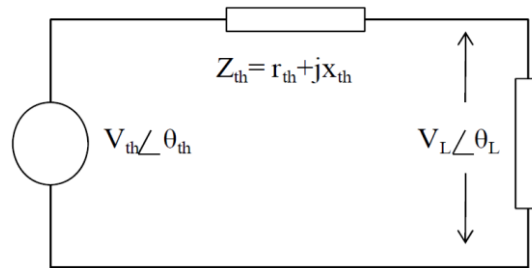


Рис.2. Эквивалентная сеть Тевенина

Fig.2. Equivalent Tevenin network

Шаги, используемые для получения эквивалента Тевенина, имеет следующие положения:

А) Решения по распределению нагрузки используются для определения профиля напряжения системы при заданных условиях нагрузки.

Б) Напряжение на входе определяется за счет потока нагрузки системы при отключенной нагрузке на соответствующей шине.

Применение уравнения (14) к эквивалентной схеме Тевенина дает уравнение для ИУН в виде выражения 15:

$$ИУН = \frac{4[V_0 V_L \cos(\theta_0 - \theta_L) - V_L^2 \cos^2(\theta_0 - \theta_L)]}{V_0^2} \quad (15)$$

где V_0 и V_L — величины напряжения с и без нагрузки на шине, а θ_0 и θ_L — измерения фазового угла напряжения с и без нагрузки соответственно. Величина индекса нагрузки устойчивости напряжения меняется от нуля на холостом ходу до единицы в точке предела устойчивости напряжения или обрушения. Индекс показывает расстояние шины до предела устойчивости напряжения. Точка предела устойчивости напряжения, соответствующая $ИУН=1$ является точкой, в которой коэффициент нагрузки максимален (рис.3).

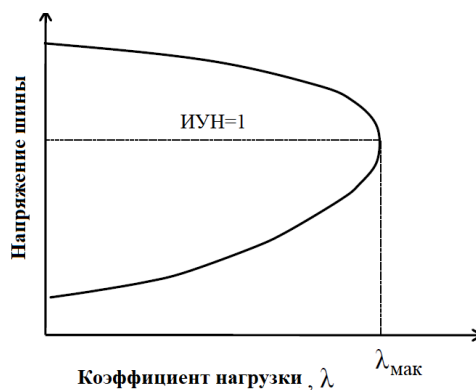


Рис.3. Кривая P-V на шине нагрузки, Fig.3. The P-V curve on the load bus showing the показывающая ИУН=1 при максимальном UL=1 at the maximum load coefficient. коэффициенте нагрузки.

Б. Оценка ИУН с использованием многослойного персептрона (МСП)

Многослойная нейронная сеть персептрона [16] с прямой связью может использоваться для оценки ИУН устойчивости напряжения на шине. Выражения (10) и (14) показывают, что индекс ИУН является функцией активной мощности (P), реактивной мощности (Q), а также величины напряжения (V) и фазы (θ) на шине. Величины выбираются в качестве входных переменных при оценке ИУН с использованием нейронной сети МСП, как показано на рисунке 4.

МСП состоит из 4 нейронов входного слоя, 35 нейронов скрытого слоя и 1 нейрона выходного слоя. Входными данными нейронной сети являются измерения активной и реактивной мощности (P , Q), напряжения и угла (V , θ) на соответствующей шине нагрузки. Выходом нейронной сети является расчетный ИУН устойчивости напряжения на шине нагрузки. Функции активации во входном и выходном слоях являются линейными функциями активации, в то время как в скрытом слое используются сигмоидальные функции активации.

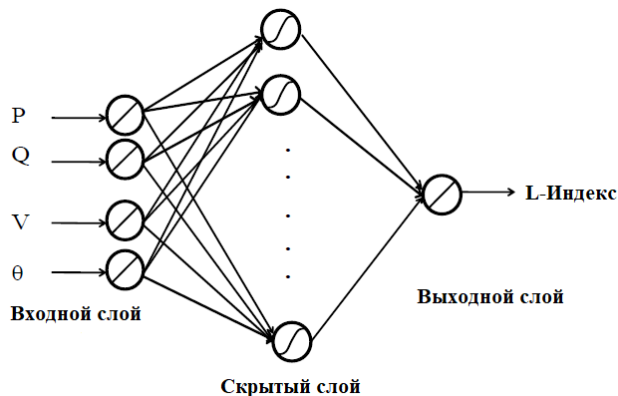


Рис.4. Структура многослойного персептрона для оценки ИУН. Fig.4. Structure of multilayered perceptron for the evaluation of IUN.

Процесс разработки МСП состоял из двух этапов, показанных на блок-схеме на рисунке 5.

На этапе разработки были получены обучающие данные без подключенных электромобилей. Значения активной мощности и реактивной мощности на негенераторных шинах, а также напряжения на шинах нагрузки снимались при одновременном изменении нагрузки на шине 7 и шине 10 от 0,8 до 1,2 коэффициента нагрузки малыми шагами для получения наборов данных. Напряжения на шинах 7 и 10 использовались для расчета ИУН для шин 7 и 10, соответственно, использовались в процессе обучения МСП в качестве целевых значений для соответствующих наборов активной и реактивной мощности.



Рис.5. Этапы разработки и эксплуатации ИУН.

Fig.5. Stages of development and operation of the PPE.

60 паттернов ввода-вывода были выбраны случайным образом и использованы в качестве обучающих данных. Метод Роя Частиц (МРЧ) использовался для обучения многослойного персептрона. Обучение проводилось на том количестве итераций, при котором получалась приемлемая среднеквадратическая ошибка. На втором этапе (этап эксплуатации) обученный МСП применяется для оценки ИУН в системе.

Во-первых, 40 входных паттернов используются для проверки точности нейронной сети при оценке ИУН. После успешного обучения и проверки нейронная сеть МСП была использована для оценки ИУН тестовой системы с включенными в систему «СмартПарк».

Оценка ИУН проводилась при наличии всех 5 линий электропередачи в системе, а затем также оценивалась аварийность отключения одной линии электропередачи.

Результаты

На рисунке 6 показана система тестирования устойчивости напряжения на 10 шин с ПЭМ. Энергосистема состоит из двух генераторов Г1 и Г2, питающих зону нагрузки по 5 ЛЭП параллельных (200 км) и одного локального генератора Г3, обеспечивающего поддержку напряжения в зоне нагрузки.

Шина 10 — это шина, управляемая напряжением, с использованием регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой. Системные параметры и условия загрузки системы, используемые на литературе [2]. Оригинальная система с 10 шинами была изменена путем добавления 2 шин системы «СмартПарк» 11 и 12.

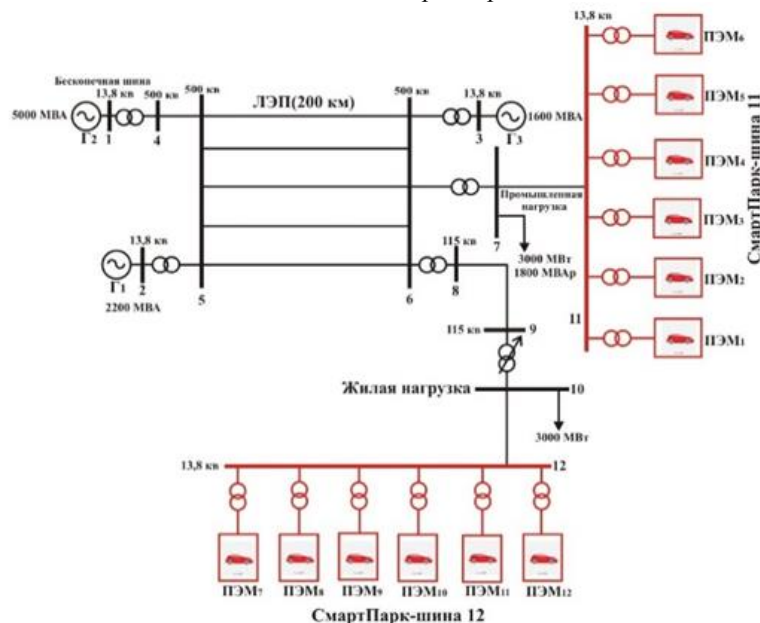


Рис.6. Энергосистема с СмартПарк

Fig.6. Power system with SmartPark

Номинальная (промышленная) нагрузка на шине 7 составляет 3000 МВт, 1800 МВАр, моделируемая как нагрузка постоянной мощности, а нагрузка (жилая) на шине 10 составляет 3000 МВт, моделируемая как нагрузка постоянной мощности. Подключаемые парковки для электромобилей представляют собой шесть «СмартПарк» у шин 11 и 12 мощностью +/- 180 МВт каждая. Процесс разработки и внедрения МСП для оценки ИУН включает два этапа; этап разработки и этап эксплуатации. На этапе разработки МСП обучается для точной оценки ИУН. Производительность МСП проверяется с использованием паттернов наборов входных и выходных данных для тестирования ее производительности. Первый набор результатов для этапа разработки, который показывает, что МСП был успешно обучен для оценки ИУН с высокой степенью точности. Затем применение онлайн приложения, адаптированного на МСП для оценки ИУН энергосистемы с помощью СмартПарк [17, 18]. Целевые значения ИУН и выходные значения МСП, использованные на этапе тестирования, показаны в таблицах 1 и 2. Таблица показывает, что выходные значения МСП очень близки к целевым значениям как на шине 7, так и на шине 10.

Таблица.1

Поток нагрузки шины 7, расчет и оценка ИУН

Напряжение шины 7		P(МВт)	Q(МВАр)	ИУН (расчет)	ИУН (оценка)
(о.е)	(град)				
1,0467	-27,47	2959	-197,2	0,6308	0,6249
1,0441	-27,68	2970	-180,5	0,6379	0,6317
1,0414	-27,91	2980	-164,0	0,6448	0,6386
1,0362	-28,32	3002	-131,4	0,6585	0,6529
1,0336	-28,55	3013	-115,2	0,6652	0,6602
1,0309	-28,76	3024	-99,64	0,6718	0,6676
1,0285	-28,97	3034	-83,90	0,6784	0,6748
1,0232	-29,39	3054	-52,89	0,6912	0,6894
1,0206	-29,59	3063	-37,60	0,6975	0,6965
1,0178	-29,80	3073	-22,49	0,7038	0,7037
1,0154	-30,01	3082	-7,53	0,7101	0,7106
1,0103	-30,40	3100	21,93	0,7221	0,7240
1,0077	-30,59	3109	36,45	0,7282	0,7306
1,0052	-30,80	3117	50,82	0,7340	0,7368
1,0027	-31	3125	65,06	0,7395	0,7429
1,0004	-31,10	3134	79,14	0,7452	0,7490
0,9975	-31,36	3142	93,09	0,7510	0,7547
0,9951	-31,55	3150	106,80	0,7565	0,7604
0,9926	-31,74	3157	120,40	0,7619	0,7656
0,9901	-31,93	3165	134,01	0,7674	0,7709
0,9876	-31,12	3172	147,39	0,7729	0,7760
0,9849	-32,29	3180	160,64	0,7779	0,7809
0,9827	-32,47	3187	173,72	0,7831	0,7855
0,9802	-32,65	3194	186,76	0,7882	0,7901
0,9776	-32,84	3201	199,52	0,7932	0,7944

Таблица.2

Поток нагрузки шины 10, расчет и оценка ИУН

Напряжение шины 10		P(МВт)	Q(МВАр)	ИУН (расчет)	ИУН (оценка)
(о.е)	(град)				
1,0528	-33,80	2979	-963,8	0,5715	0,5703
1,0501	-34,07	2990	-958,9	0,5818	0,5809
1,0449	-34,60	3012	-949,2	0,6020	0,6020
1,0421	-34,88	3023	-944,3	0,6121	0,6123
1,0394	-35,14	3034	-9395	0,6217	0,6220
1,0341	-35,66	3054	-930	0,6410	0,6416
1,0315	-35,92	3064	-925,2	0,6503	0,6510
1,0288	-36,18	3073	-920,4	0,6594	0,6602
1,0235	-36,68	3092	-911	0,6773	0,6783
1,0209	-36,94	3101	-906,3	0,6862	0,6872
1,0182	-37,19	3110	-901,7	0,6948	0,6958
1,0156	-37,44	3119	-897	0,7033	0,7044
1,0103	-37,92	3136	-887,8	0,7198	0,7211
1,0076	-38,17	3144	-883,2	0,7278	0,7291
1,0051	-38,42	3152	-878,6	0,7358	0,7373

Продолжение таблицы 2

1,0025	-38,66	3160	-874,1	0,7435	0,7451
0,9972	-39,14	3175	-865	0,7587	0,7603
0,9947	-39,36	3182	-860,6	0,7660	0,7674
0,9921	-39,61	3189	-856,1	0,7732	0,7748
0,9895	-39,84	3196	-851,7	0,7803	0,7816
0,9844	-40,30	3209	-842,7	0,7940	0,7950
0,9818	-40,53	3216	-838,5	0,8007	0,8015
0,9792	-40,76	3222	-834,1	0,8072	0,8079
0,9716	-41,43	3240	-821,2	0,8260	0,8254
0,9691	-41,65	3245	-817	0,8320	0,8311

Напряжение уменьшается с увеличением нагрузки. После 3200 МВт шина 10 является критической шиной. Результаты тестирования подтвердили, что МСП точно оценивает ИУН энергосистемы. Среднеквадратическая Ошибка (СКО), полученная с использованием МСП составила $-8,75 \times 10^{-5}$ о.е.

На рисунках 7 и 8 показаны зависимости напряжения шины и ИУН от активной мощности и реактивной мощности на шине 7. На рисунке 7 видно, что увеличение нагрузки на шинах нагрузки приводит к увеличению ИУН, таким образом, приближается к пределу устойчивости [19, 20].

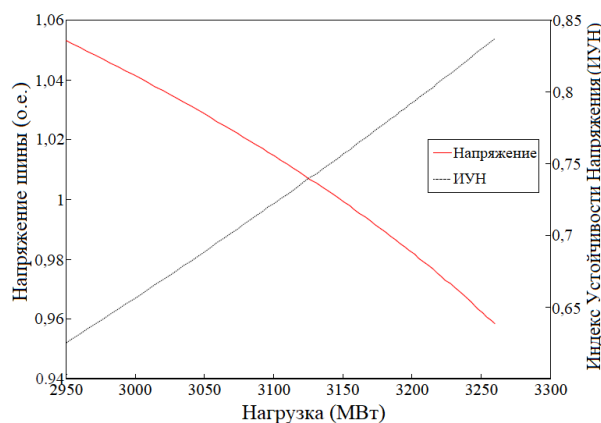


Рис.7. График напряжения на шине от активной и реактивной нагрузки для шины 7

Fig. 7. Tyre voltage graph from the active and reactive load of the tyre 7

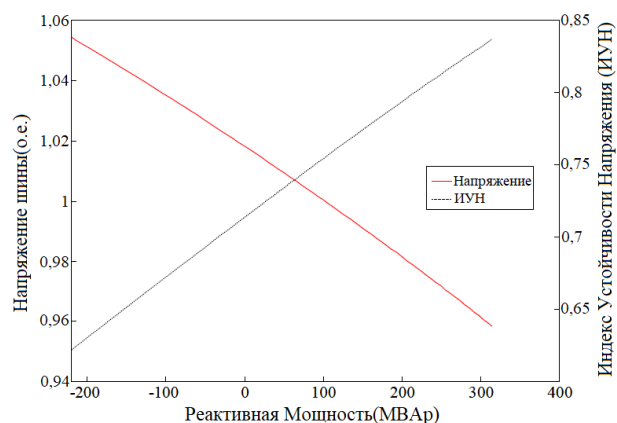


Рис.8. График напряжения на шине от активной и реактивной нагрузки для шины 7

Fig. 8. Tyre voltage graph from the active and reactive load of the tyre 7

На рисунках 9 и 10 показаны изменения мощности СмартПарк на шинах 11 и 12. Обученная нейронная сеть используется для оценки ИУН (10 шин) тестовой системы с «СмартПарк», включенными (шина 11 и шина 12).

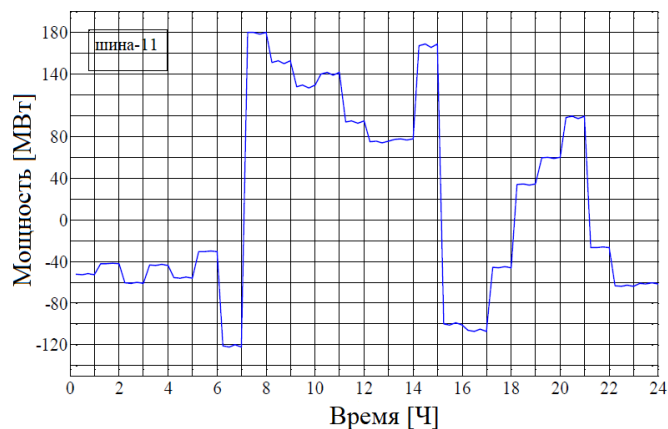


Рис.9. Изменение мощности СмартПарк на шине 11. Fig. 9. Change of SmartPark power on bus 11.

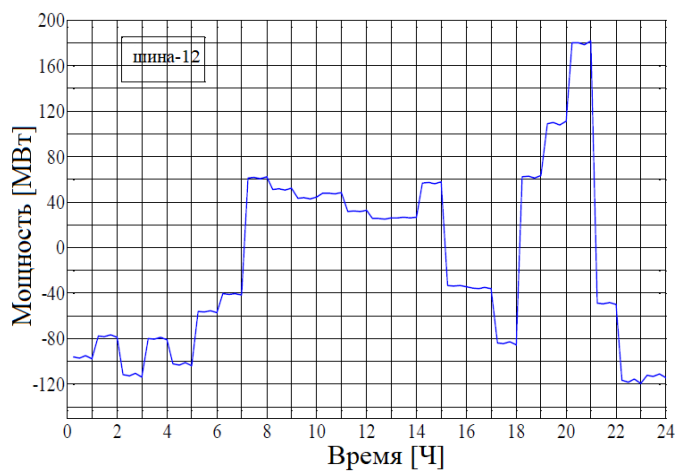


Рис.10. Изменение мощности СмартПарк на шине 12. Fig. 10. Change of SmartPark power on bus 12.

Графики выхода ИУН для МСП за 24-часовой период на шине 7 и шине 10 показаны на рисунках 11 и рисунках 12 соответственно.

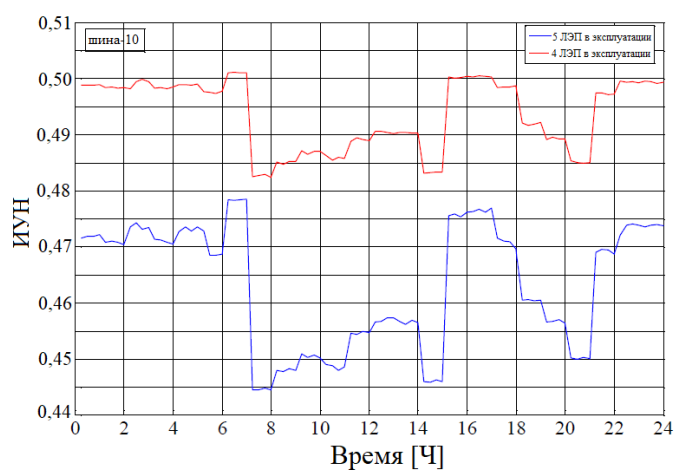


Рис.11. Оцененный ИУН на шине 10 с СмартПарк. Fig. 11. Rated IU on bus 10 with SmartPark.

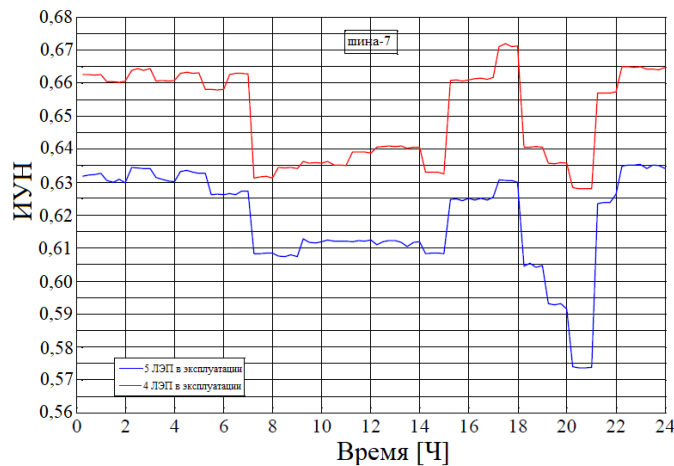


Рис.12. Оцененный ИУН на шине 7 с SmartPark

Fig. 12. Rated IU on bus 7 with SmartPark

На рисунках 10 и 11 видно, что отрицательные значения мощности представляют собой зарядку электромобилей, где активный поток мощности идет от сети к «СмартПарк» и положительные значения мощности представляют собой действие разряда, при котором поток мощности идет от «СмартПарк» к сети.

Были рассмотрены два различных режима работы энергосистемы (показаны на рис.9 и рис.10):

- Система полностью исправна без ошибок;
- С выходом из строя 1 из 5 параллельных ЛЭП.

Из таблиц 1 и 2 обнаружено, что на шинах 7 и 10, когда «СмартПарк» разряжается, увеличение нагрузки на шинах нагрузки приводит к увеличению ИУН, таким образом, приближается к пределу устойчивости. Когда «СмартПарк» подает мощность в сеть, это помогает увеличить запас устойчивости системы. Парковка подает дополнительную мощность в систему (генерирует). Когда «СмартПарк» заряжается, значения ИУН выше, что указывает на то, что система менее стабильна. Запас устойчивости системы варьируется в зависимости от операции «СмартПарк», зарядки и разрядки. Результаты показывают, что система имеет более низкие значения ИУН, следовательно, более стабильна при работе всех пяти линий электропередачи (в сервисе).

Из рисунков 11 и 12 видны обнаруженные при выходе из строя одной ЛЭП более высокие значения ИУН, которые указывают на то, что система менее стабильна, где значения ИУН, соответствующие системе со всеми пятью линиями передачи в сервисе, как более низкие чем значения ИУН, соответствуют системе с 1 из 5 ЛЭП.

Заключение

В ходе проведения исследований авторами статьи получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Представлен подход, основанный на многослойной персептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью, для оценки ИУН в энергосистеме «СмартПарк» с приведением необходимых закономерностей расчета и графических интерпретаций;
2. Наличие индексов активной и реактивной мощности и напряжения на шине нагрузки достаточны для выполнения оценки ИУН;
3. Подход МСП позволяет точно оценить ИУН даже при изменении топологии и условий эксплуатации.

Научное приращение результатов данного исследования заключается в попытке обоснования возможности проведения оценки ИУН на нагрузки посредством применения подхода, основанного на многослойной персептронной (МСП) нейронной сети с прямой связью для оценки ИУН в энергосистеме с «СмартПарк». Данная проблематика планируется к рассмотрению авторами в последующих исследованиях.

Литература

1. P. Kundur Power System Stability and Control // California:EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
2. Taylor C. W. Power System Voltage Stability // California: EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-063164-0. G. K.

3. F. Mumtaz, M. H. Syed, M. Hosani, A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. V. 7.
4. A. Mehrizi-Sani, R. Iravani, Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes // IEEE Transactions on power systems. 2010. V. 25. № 4.
5. R. Nuqui, A. Phadke, Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. V. 20, № 4. pp. 2381-2388.
6. R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronic. 2013. V. 60. № 7.
7. Шкитина Н.П., Анализ влияния стохастической нагрузки электромобилей на распределительную сеть // журнал электроэнергия, Т. 20. № 1. 2021. С. 40-45.
8. C.A. Canizares, Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse // IEEE Transactions on Power Systems. 1996. V. 11 № 3. pp. 1441-1450.
9. P. Kessel, H. Glavitsch, Estimating the Voltage Stability of a Power System // IEEE Transactions on Power Delivery. 1986. V.1. № 3. pp. 346-353.
10. Н.И. Воропай, Н.В. Тomin, Комплекс Интеллектуальных Средств Раннего Выявления И Предотвращения Возникновения Системных Аварий В Энергообъединениях // Автоматика и телемеханика журнал. 2018. № 10. С. 6-25.
11. G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian, Application of the error function in analyzing the learning dynamics near singularities of the multilayer perceptrons // Chinese Control Conference (CCC), 2012. pp. 3240-3243.
12. В. Сидорович, Влияние электромобилей на энергосистему// [электронные ресурсы] <https://cutt.us/renen-ru>. Дата обращения: 24.01.2018.
13. Альзаккар А. Применение искусственных нейронных сетей для оценки устойчивости напряжения электроэнергетических систем в Сирии // Международный технико-экономический журнал. 2020. С.87-95.
14. Mestnikov N., Alzakkar A., Valeev I., Maksimov V. Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W // International Russian Automation Conference, 2021. pp. 404-408.
15. A. Malkhandi, N. Senroy, S. Mishra, A Dynamic Model of Impedance for Online Thevenin's Equivalent Estimation // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022. V. 69. pp. 194-198.
16. C. B. Pronin, O. I. Maksimych, A. V. Ostroukh, A. V. Volosova, Creating Quantum Circuits for Training Perceptron Neural Networks on the Principles of Grover's Algorithm // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2022.
17. И. М. Валеев, А. Альзаккар, Гармоники и их Влияние при Определении Метода Компенсации Реактивной Мощности в Электрических Сетях // Вестник Казанского технологического университета. 2020. № 12. С. 24-39.
18. J. Yang; J. Portilla; T. Riesgo, Smart parking service based on Wireless Sensor Networks // Annual Conference of Industrial Electronics Society. 2012. pp. 6029- 6034.
19. А.И. Федотов, Р.Э. Абдуллазянов, Р.М. Мударисов, Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения // Проблемы энергетики - КГЭУ. Т. 21. № 3-4. 2019. С. 102-112.
20. T.K. Abdul Rahman and G.B. Jasmon, A New Technique for Voltage Stability Analysis in A Power System and Improved Load Flow Algorithm for Distribution Network // Energy Management and Power Delivery. V. 2 1995. P: 714–719.

Авторы публикации

Альзаккар Ахмад – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Местников Николай Петрович – аспирант Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, ведущий инженер отдела электроэнергетики ИФТПС СО РАН им. В.П. Ларионова.

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «ЭСиС», Казанский государственный энергетический университет.

Валеев Ильгиз Миргалимович –д-р техн. наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. P. Kundur. *Power System Stability and Control*. California:EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
2. Taylor CW. *Power System Voltage Stability*. California: EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1993. ISBN 0-07-063164-0. G. K.
3. F. Mumtaz M.H. Syed, M. Hosani, A *Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG*. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015.V.17.
4. A. Mehrizi-Sani, R. Iravani. *Potential-Function Based Control of a Microgrid in Islanded and Grid-Connected Modes*. IEEE Transactions on power systems. 2010;25(4).
5. R. Nuqui, A. Phadke. *Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005;20(4):2381-2388.
6. R. Cardenas, R. Pena, S. Alepuz, G. Asher, *Overview of Control Systems for the Operation of DFIGs in Wind Energy Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013;60(7).
7. Shkitina N.P. Analysis of the influence of the stochastic load of electric vehicles on the distribution network. *Electricity magazine journal*. 2022;20(1):40- 45.
8. C.A. Canizares, A. de Souza, V. Quintana. *Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse*. IEEE Transactions on Power Systems. 1996;11(3):1441-1450.
9. P. Kessel, H. Glavitsch. *Estimating the Voltage Stability of a Power System*, IEEE Transactions on Power Delivery. 1986;1(3):346-353.
10. Voropay N.I., Tomin N.V. Complex of Intelligent Means for Early Detection and Prevention of System Accidents in Power Pools. *Automation and Telemechanics Journal*. 2018;10:6-25.
11. G. Weili, W. Haikun, Z. Junsheng, L. Weiling, Z. Kanjian. *Application of the error function in analyzing the learning dynamics near singularities of the multilayer perceptrons*, Chinese Control Conference (CCC). 2012. pp. 3240-3243.
12. V. Sidorovich. The impact of electric vehicles on the energy system// [electronic resources] <https://cutt.us/renen-ru>. Date of access: 24.01.2018.
13. A. Alzakkar, Application of Artificial Neural Networks to Evaluate Stability of Voltage of Electric Power Systems in Syria, *The international technical-economic journal*. 2020;1:87-95. doi: 10.34286/1995-4646-2020-70-1-87-95.
14. Mestnikov N, Alzakkar A, Valeev I, Maksimov V. *Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W*. International Russian Automation Conference. 2021. P. 404-408.
15. A. Malkhandi, N. Senroy, S. Mishra, *A Dynamic Model of Impedance for Online Thevenin's Equivalent Estimation*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2022;69:194-198.
16. C.B. Pronin, O I. Maksimych, A.V. Ostroukh, A.V. Volosova. *Creating Quantum Circuits for Training Perceptron Neural Networks on the Principles of Grover's Algorithm*. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.2022.
17. Valeev IM, Alzakkar A. Harmonics and their Influence When Determining the Method of Compensation of Jet Power in Electrical Networks. *Vestnik of the KSPEU*. 2020;12:1 (45):24-39.
18. J. Yang, J. Portilla, T. Riesgo. *Smart parking service based on Wireless Sensor Networks*. Annual Conference of Industrial Electronics Society, (2012). P. 6029- 6034.
19. Fedotov A.I, Abdullazyanov RE, Mudarisov RM. Synchronous motors stability estimation methodologies under three-phase faults in power supply grids, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3-4):102-112.
20. T.K. Abdul Rahman and G.B. Jasmon, A New Technique for Voltage Stability Analysis in A Power System and Improved Load Flow Algorithm for Distribution Network. *Energy Management and Power Delivery*.1995;2:714–719.

Authors of the publication

Ahmad Alzakkar –Kazan State Power Engineering University.

Nikolai P. Mestnikov – North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov

Victor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University.

Ilgiz M. Valeev - Kazan State Power Engineering University.

Получено

25.03.2022г.

Отредактировано

01.04.2022г.

Принято

14.04.2022г.



**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ
АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА ГАЗОВОГО ПРОМЫСЛА №1
ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ» С ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМОЙ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB/SIMULINK**

Л.Р. Масков, В.Ю. Корнилов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

maskov.linar@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать модель в среде MATLAB/SIMULINK для системы мехатронных модулей движения (ММД) электротехнического комплекса (ЭТК), имеющего в своём составе аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа с централизованной системой электроснабжения газового промысла (ГП) №1 ООО «Газпром добыча Ямбург». Произвести анализ энергетической эффективности ММД ЭТК АВО. Выполнить экспериментальное исследование модели ММД ЭТК АВО в динамических режимах для определения закономерности влияния одиночных (групповых) запусков на перегрузку источника электроснабжения. Разработать алгоритм включения для ММД ЭТК АВО при прямых пусках асинхронных двигателей (АД), обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы электроснабжения. МЕТОДЫ. Представленные в работе результаты получены с использованием методов теории электрических и магнитных цепей, теории электропривода и электрических машин, методов оптимизации систем электроснабжения, аналитических и численных методов прикладной математики, методов математического и компьютерного моделирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности построения и моделирования ЭТК ГП в среде MATLAB/SIMULINK с централизованной системой электроснабжения. Выполнен сравнительный анализ существующих методик и расчёт параметров схем замещения ММД ЭТК ГП. Произведен ориентировочный расчёт механических и инерционных характеристик для создания модели нагрузки (момента сопротивления) для АД. Создана модель ММД ЭТК АВО, максимально приближенная к реально существующей системе на основе каталожных (паспортных) данных отдельных элементов ЭТК. Выполнен анализ и разработаны предложения для повышения энергетической эффективности ММД ЭТК АВО и предложены алгоритмы, обеспечивающие оптимальный прямой запуск группы вентиляторов АВО в течение заданного времени после исчезновения напряжения без перегрузки источника электроснабжения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе результатов компьютерного моделирования были выявлены особенности функционирования ММД ЭТК АВО, требующие дальнейшего изучения и разработки корректирующих мероприятий по повышению энергетической эффективности и надежности системы электроснабжения ГП. Комбинирование прямых запусков одиночных (групповых) вентиляторов АВО, полученное на данном этапе исследования модели ММД ЭТК АВО, позволит создать основу (алгоритм) для автоматизированной системы управления данным комплексом, что обеспечит восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения без перегрузки централизованного источника электроснабжения. Расчёт параметров отдельных элементов модели ММД ЭТК АВО позволит использовать данные для создания других моделей ЭТК ГП, что позволит проводить углубленное исследование и совершенствование энергетической эффективности всей системы электроснабжения ГП.

Ключевые слова: мехатронный модуль движения, модель ММД ЭТК АВО, расчёт параметров модели ММД ЭТК, модель момента сопротивления вентилятора, инерционная характеристика вентилятора, алгоритм групповых запусков АД.

Для цитирования: Масков Л.Р., Корнилов В.Ю. Разработка модели электротехнического комплекса для аппаратов воздушного охлаждения газа газового промысла №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с централизованной системой электроснабжения в программе matlab/simulink//. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 50-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71.

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM MODEL OF MECHATRONIC MODULES
FOR GAS AIR COOLING DEVICE MOVEMENT AT GAS FIELD NO.1
OOO GAZPROM DOBYCHA YAMBURG WITH CENTRALIZED POWER
SUPPLY SYSTEM IN MATLAB/SIMULINK PROGRAM**

LR. Maskov, VYu. Kornilov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
Maskov.linar@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop a model in MATLAB/SIMULINK environment for the system of mechatronic movement modules (MMD) of the electrical complex, which includes gas air coolers with centralized system of power supply of the gas field 1 of "Gazprom dobycha Yamburg" LLC. To analyze the energy efficiency of MMD ETC ACHE. To perform the experimental research of the EMD EMD ETC ACHE model in the dynamic modes in order to determine the regularity of the influence of single (group) starts on the power supply source overload. To develop a switching algorithm for MMD ETK AHE at direct starts of asynchronous motors (AD), providing restoration of the technological mode within the optimum time after the voltage disappearance for the centralized power supply system. *METHODS.* The results presented in work are received with use of methods of the theory of electric and magnetic circuits, the theory of electric drive and electric machines, methods of optimization of power supply systems, analytical and numerical methods of applied mathematics, methods of mathematical and computer modeling. *RESULTS.* In article urgency of a theme is described, features of construction and modelling of ETK GP in the environment MATLAB/SIMULINK with the centralized system of power supply are considered. The comparative analysis of existing methods and calculation of parameters of the substitution schemes of the MMD ETK GP was carried out. Approximate calculation of mechanical and inertial characteristics for creating a model of load (resistance moment) for the motor. The model of EMD of electric motor drive compressor unit was created, as close as possible to the real existing system on the basis of catalog (passport) data of individual elements of electric motor drive unit. There were analyzed and developed proposals to enhance power efficiency of EMD ETC AHE and algorithms, which provide optimal direct start-up of the AHE fan group within the set time after the power failure without overloading of the power supply source, were proposed. *CONCLUSIONS.* On the basis of results of computer modeling, the peculiarities of operation of EMD ETH ACHE, which require further study and development of corrective measures to improve energy efficiency and reliability of power supply system of GP. Combination of direct starts of single (group) fans of ACHE, obtained at this stage of research of EMD EMD ETC ACHE model, will create the basis (algorithm) for automated control system of this complex, which will ensure restoration of technological mode within optimum time after power outage without overloading of centralized power supply source. Calculation of parameters of individual elements of MMD model of ETC AVO will allow to use data to create other models of ETK GP, which will allow to conduct in-depth research and improve the energy efficiency of the entire system of power supply of GP.

Key words: *mechatronic motion module, EMD model of ETC ACHE, calculation of parameters of EMD model of ETK, model of fan resistance moment, inertial characteristic of the fan, algorithm of group starts of AD.*

For citation: Maskov LR, Kornilov VYu. Development of a model of an electrical complex for gas air cooling devices of gas field №1 gazprom dobycha Yamburg LLC with a centralized power supply system in the matlab/simulink program. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):50-71. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-50-71.

Введение

Объектом исследования является ЭТК АВО ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург». Моделирование и анализ энергетической эффективности производились для ЭТК АВО в программной среде MATLAB/SIMULINK, где точность модели задается с помощью параметров схемы замещения отдельных элементов ЭТК. Целью исследования является создание модели, максимально приближенной к параметрам существующего ЭТК АВО, с последующим анализом и разработкой корректирующих мероприятий по повышению энергетической эффективности.

Анализ литературных источников [1-4] показывает, что приоритетным направлением исследований для нефтегазовой промышленности является создание высокоэффективных ЭТК. Основной акцент ставится на повышение энергетической эффективности системы и ее отдельных элементов: коррекции коэффициента мощности, фильтрации гармоник, модернизации кабельной системы, снижении удельного расхода топлива для автономных систем электроснабжения [5-8]. В тоже время вопрос изучения и анализа ЭТК для газодобывающих предприятий нуждается в дополнительных исследованиях, так как имеет особенности функционирования, как для централизованной, так и для автономной системы электроснабжения. ЭТК ГП является сложной технической системой с изменяемой структурой в зависимости от вида системы электроснабжения, а именно: ЭТК с централизованной системой электроснабжения, либо ЭТК в виде совокупности нескольких подсистем с автономными системами электроснабжения, функционирующие по схеме: «один генератор – отдельная группа электрических приемников». ЭТК ГП имеет в своем составе несколько ЭТК, отличающихся друг от друга отдельными элементами, энергетическими характеристиками и назначением [9]. Актуальность и практическая значимость исследования ЭТК ГП связана с тем, что от эффективности функционирования всего ЭТК и (или) его отдельных элементов зависят удельные затраты электроэнергии на единицу добываемой продукции (газа и газового конденсата), снижение которых является важным научно-техническим направлением для газовой промышленности. Научная новизна работы состоит в исследовании ЭТК в условиях длительного функционирования с несинусоидальной системой электроснабжения, развитии методов коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник для централизованной и в последующем для автономной системы электроснабжения ЭТК с преобладанием активно-индуктивной нагрузки.

Анализ литературы [10-11] показал, что в аналогичных моделях ЭТК АВО учитываются не все элементы и инерционно-механические характеристики ЭТК (неидеализированный источник электроснабжения, силовой трансформатор, момент инерции вентилятора). Некорректно рассчитанные параметры схемы замещения для АД в этих моделях приводят к затяжному пуску, превышающему в 10–14 раз реальные пусковые характеристики, что ведет к неадекватной оценке оптимального времени восстановления технологического процесса в аварийных режимах. Все эти недочеты в совокупности сказываются при исследовании и анализе энергетической эффективности, надежности и безаварийной эксплуатации всего ЭТК и оборудования промысла. Для устранения этих недочетов в модели ЭТК АВО, авторы выполнили сравнительный анализ существующих методик, внесли необходимые поправки в расчеты параметров схемы замещения, произвели оценку энергетической эффективности и внесли предложения по алгоритму нахождения оптимального времени последовательного одиночного и группового включения АД в аварийных режимах эксплуатации без перегрузки источника электроснабжения. Результаты работы могут быть использованы для создания моделей ЭТК и совершенствования энергетической эффективности и надежности системы электроснабжения в различных отраслях промышленности.

Материалы и методы

Общая характеристика объекта исследования

ЭТК ГП №1 с централизованной системой электроснабжения является сложной технической системой, имеющий в своём составе несколько ЭТК, отличающихся друг от друга отдельными элементами, энергетическими характеристиками и назначением. Объектом исследования является многодвигательная система, применяемая для охлаждения газа на ГП (ЭТК АВО). В качестве нагрузки используются АВО газа типа 2АВГ-75С (рис.1), где в качестве электропривода применяются многополюсные тихоходные электродвигатели серии ВАСО4-37-24 номинальной мощностью 37 кВт с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2. Общее количество АД АВО газа на ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» составляет 140 ед., что соответствует максимальной потребляемой мощности 5Мвт·ч в наиболее загруженный летний период эксплуатации. Электропитание осуществляется от трансформаторов ТМЗ-1600/6/0,4 и ТМЗ-1000/6/0,4. В настоящее время применяется прямой пуск АВО газа, в качестве устройств компенсации реактивной мощности используются нерегулируемые

батареи статических конденсаторов (БСК) серии КЭ2-0,38-36-3У3. Регулирование производительности вентиляторов АВО газа осуществляется два раза в год с помощью изменения угла атаки лопастей.

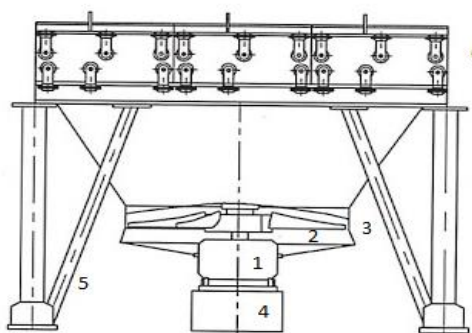


Рис.1. Схематическое изображение АВО газа:

1-асинхронный двигатель;
2-лопасти
3-диффузор;
4-станина;
5-металлоконструкция;
6-теплообменный блок

Fig.1. Schematic representation of ACD gas:

1-asynchronous motor; 2-fan blades; 3-diffuser;
4-bed; 5-metal structure; 6-heat exchange unit

Расчёт параметров модели ЭТК ГП

Структурно модель для ЭТК одиночного АВО газа разбивается на элементы и измерительные блоки (рис.2). Расчёт параметров элементов ЭТК производится с помощью схем замещения, применяемых в блоках настройки электротехнических систем и устройств *MATLAB/SIMULINK* по их паспортным (каталожным) данным и электромеханическим характеристикам.

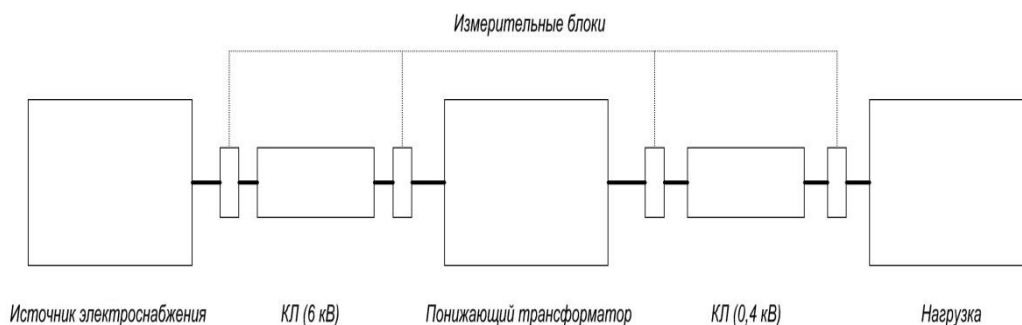


Рис.2. Обобщённая структурная схема модели ЭТК ГП

Fig.2. Generalized block diagram of the ETC GF model

Для модели ЭТК АВО (рис.3) расчёт параметров схемы замещения производится для источника электроснабжения, кабельных линий (КЛ), понижающего трансформатора, АД по каталожным данным, а инерционно-механические характеристики лопастей вентилятора рассчитываются приближенными методами.

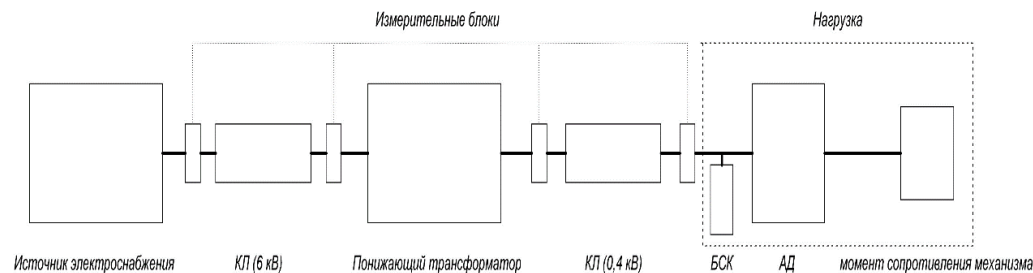


Рис.3. Структурная схема модели ЭТК АВО

Fig.3. Block diagram of the ACD ETC model

Расчёт параметров схемы замещения трансформатора

В качестве объекта моделирования были выбраны силовые трансформаторы типа

ТМЗ-1600(1000)/6/0.4, ТМЗ-1000(1000)/6/0.4 отечественного производства, применяемые в составе комплектно-трансформаторных подстанций (КТП) ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» с параметрами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1

Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТМЗ-1600(1000)/6/0.4

Параметр	Обозначение	Значение		Единицы измерения
Число фаз	m	3		-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{ном}$	1600	1000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1ном}$	6		кВ
Напряжение НН	$U_{2ном}$	0,4		кВ
Номинальная частота сети	f	50		Гц
Напряжение короткого замыкания	U_K	4,5	5,5	%
Потери короткого замыкания	P_K	18	10,8	кВт
Потери холостого хода	P_0	2,35	1,55	кВт
Ток холостого хода	I_0	1,3	1,2	%
Схема соединения обмоток	D/Yn-11			

Для определения параметров Т-образной схемы замещения силового трансформатора (рис.4) по каталожным данным в программе *MATLAB/SIMULINK*, были проанализированы работы [12-14].

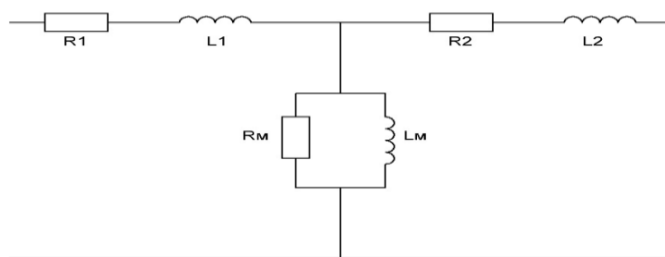


Рис.4. Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора в *MATLAB/SIMULINK*

Fig.4. T-shaped replacement circuit of a two-winding transformer in *MATLAB/SIMULINK*

Расчет параметров для модели трансформатора из библиотеки *MATLAB/SIMULINK* был выполнен в именованных (табл.2) и относительных единицах (табл.3). В результате анализа работы [14] были внесены авторские поправки в расчетные выражения. Вычисленные значения параметров схемы замещения не противоречат диапазону ориентировочных значений сопротивлений и индуктивностей обмоток трансформаторов, приведенных в [15]. Сравнение значений параметров схемы замещения, полученных в результате расчетов (табл.4), показало погрешность не более 3%, что свидетельствует о высокой сходимости. Расчет параметров производился с учётом насыщения стали магнитопровода (табл.5) [14].

Таблица 2

Расчетные значения параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора по каталожным данным

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Номинальная мощность каждой фазы трансформатора	$S_{фном}$	533,333	кВА
2	Фазное напряжение первичной обмотки при соединении в «треугольник»	$U_{1ф}$	6000	В
3	Номинальный фазный ток первичной обмотки по схеме «треугольник»	$I_{1фном}$	88,89	А
4	Фазное напряжение вторичной обмотки при соединении в «звезду»	$U_{2ф}$	230,94	В
5	Номинальный фазный ток вторичной обмотки по схеме «звезда»	$I_{2фном}$	2309,4	А
Базисные величины				

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
6	Базисное значение сопротивления первичной обмотки	$R_{баз1}$	67,5	Ом
7	Базисное значение сопротивления вторичной обмотки	$R_{баз2}$	0,1	Ом
Из опыта холостого хода				
8	Фазный ток холостого хода трансформатора	$I_{0ф}$	1,16	А
9	Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе	Z_0	5172,41	Ом
10	Мощность потерь холостого хода на фазу	$P_{0ф}$	783,33	Вт
11	Коэффициент мощности холостого хода	$\cos(\varphi_0)$	0,113	-
12	Активное сопротивление ветви намагничивания	R_m	45773,54	Ом
13	Индуктивное сопротивление ветви цепи намагничивания	X_m	5205,75	Ом
14	Индуктивность цепи намагничивания	L_m	16,58	Гн
Из опыта короткого замыкания				
15	Фазное напряжение короткого замыкания	$U_{кзф}$	270	В
16	Полное сопротивление короткого замыкания	Z_k	3,04	Ом
17	Мощность потерь короткого замыкания на фазу	$P_{кзф}$	6000	Вт
18	Коэффициент мощности короткого замыкания	$\cos(\varphi_k)$	0,25	-
19	Активное сопротивление короткого замыкания	R_k	0,76	Ом
20	Индуктивное сопротивление короткого замыкания	X_k	2,94	Ом
21	Коэффициент трансформации	k	15	-
22	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора	R_1	0,38	Ом
23	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора	R_2	0,000563	Ом
24	Индуктивность первичной обмотки трансформатора	L_1	0,0047	Гн
25	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора	L_2	0,00000696	Гн

Таблица 3

Именованные значения параметров схемы замещения в относительных единицах (о.е.)

№	Наименование величины	Параметр	Значение
1	Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_m (o.e.)$	678,127
2	Индуктивность ветви намагничивания	$L_m (o.e.)$	77,128
3	Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора	$R_1 (o.e.)$	0,00563
4	Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора	$R_2 (o.e.)$	0,00563
5	Индуктивность первичной обмотки трансформатора	$L_1 (o.e.)$	0,0219
6	Индуктивность вторичной обмотки трансформатора	$L_2 (o.e.)$	0,0219

Таблица 4

Сравнение эмпирических и расчетных значений параметров схемы замещения трансформатора

Параметр	Эмпирические значения ($Y_{эмп}$), (о.е.)	Расчетные значения ($Y_{расч}$), (о.е.)	Отклонение ($Y_{эмп}-Y_{расч}$)/ $Y_{эмп}$, %
$R_1=R_2$	0,005625	0,00563	0,089
$L_1=L_2$	0,0225	0,0219	-2,74
R_m	680,851	678,127	-0,4
L_m	76,923	77,128	0,27

Таблица 5

Расчетные значения характерных точек кривой намагничивания		
№ точки	Ψ , о.е.	I_m , о.е.
1	$\psi_1 = 0$	$i_1 = 0$
2	$\psi_2 = 1,15$	$i_2 = 0,01495$
3	$\psi_3 = 1,2175$	$i_3 = 1$

Полученные расчетные значения проверяются на имитационной модели в программе компьютерного моделирования *MATLAB* и его приложении *SIMULINK*. Имитационная модель состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения, измерительный блок напряжения и тока, трёхфазный двухобмоточный трансформатор, блок измерения активной и реактивной мощности, блок расчета модуля комплексного числа по его действительной и мнимой части, блок для получения модульного значения, дисплей. Для сравнения паспортных данных (табл.1) и расчётных значений, были проведены опыты холостого хода и короткого замыкания со следующими начальными условиями: 1) в качестве источника питания используется идеальный трёхфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю); 2) при проведении опыта короткого замыкания напряжение источника умножается на U_k (из табл.1). При проведении моделирования на дисплее отображаются результаты измерений активной, реактивной и полной мощности трансформатора, которые показывают, что потери холостого хода (рис.5) и короткого замыкания (рис.6) совпадают с паспортными данными (табл.6).

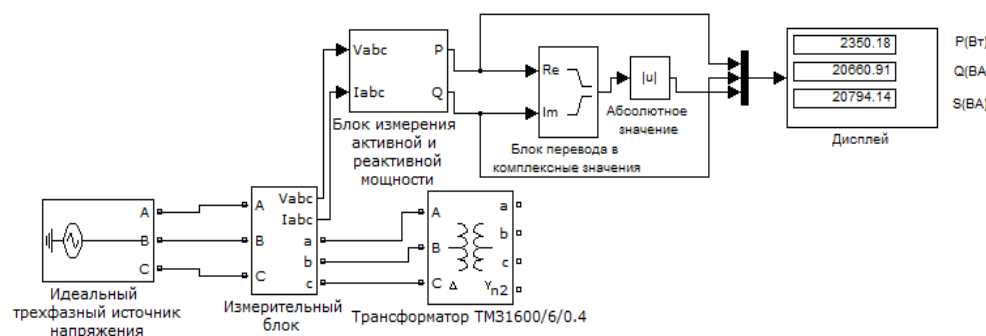


Рис.5. Опыт холостого хода трансформатора типа TMZ1600/6/0,4

Fig.5. The experience of idling transformer type TMZ1600/6/0,4

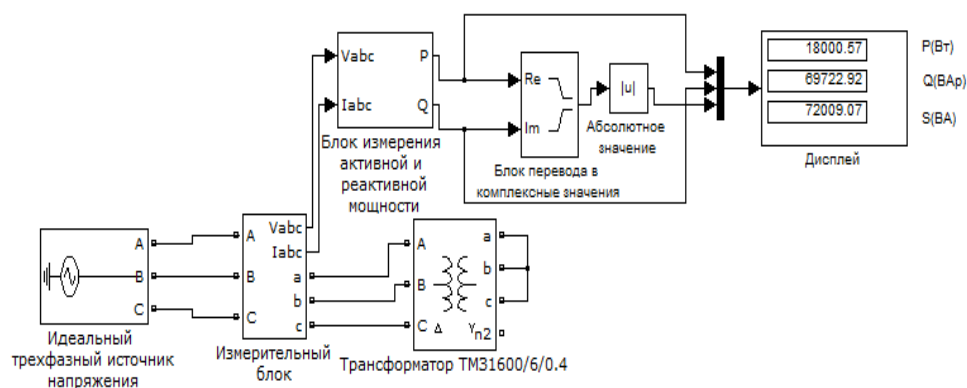


Рис.6. Опыт короткого замыкания трансформатора типа TMZ1600/6/0,4

Fig.6. The experience of short-circuit transformer type TMZ1600/6/0,4

Таблица 6

Сравнение паспортных и смоделированных значений параметров трансформатора				
Параметр	Наименование величины	Паспортное значение ($Y_{пасп}$), Вт	Результаты моделирования ($Y_{расч}$)	Отклонение ($Y_{пасп} - Y_{расч}$)

Параметр	Наименование величины	Паспортное значение ($Y_{\text{пасп}}$), Вт	Результаты моделирования ($Y_{\text{расч}}$)	Отклонение ($Y_{\text{пасп}} - Y_{\text{расч}}$)
P_0	Потери холостого хода	2350	2350,18	-0,18
P_k	Потери короткого замыкания	18000	18000,57	-0,57

Аналогичным образом рассчитываются параметры схемы замещения для двухобмоточного трансформатора типа ТМЗ/1000/6/0.4. Результаты расчетов параметров схемы замещения для трансформаторов ТМЗ1600(1000)/6/0,4, необходимые для дальнейшего моделирования ЭТК АВО с централизованной системой электроснабжения, вносятся в таблицу 7.

Таблица 7

Параметры схемы замещения трансформаторов ГП №1

Параметр	ТМЗ1600/6/0,4 (о.е.)	ТМЗ1000/6/0,4 (о.е.)
$R_1=R_2$	0,005625	0,0054
$L_1=L_2$	0,0225	0,0275
R_m	678,127	645,1613
L_m	77,128	88,333

Расчёт параметров схемы замещения асинхронного двигателя

В качестве объекта моделирования был выбран АД серии ВАСО4-37-24 (табл. 8) с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2.

Таблица 8

Каталожные данные АД серии ВАСО 4-37-24

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, P_n	37 кВт
Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$	380 В
Число фаз, m	3
Номинальная частота вращения, n_n	246 об/мин
Синхронная частота вращения, n_1	250 об/мин
Номинальное скольжение, S_n	1,6 %
Коэффициент мощности, $\cos\phi$	0,63
КПД, η	89 %
Отношение пускового тока к номинальному току, λ	3,9
Отношение пускового момента к номинальному моменту, k_p	0,8
Отношение максимального момента к номинальному моменту, k_m	2,4
Момент инерции ротора, J	26 кг·м ²
Число пар полюсов, $2p$	12
Соединение обмоток статора	Y/Δ

Для определения параметров Т-образной схемы замещения АД (рис.7) по каталожным данным в программе MATLAB/SIMULINK, были проанализированы работы [16-21].

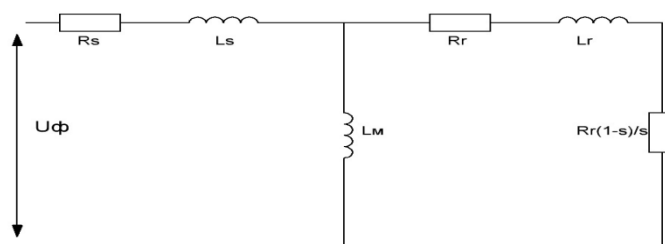


Рис.7. Т-образная схема замещения АД в MATLAB/SIMULINK

Fig.7. T-shaped AM substitution scheme in MATLAB/SIMULINK

Анализ литературы показал, что, несмотря на большое количество работ, посвященных определению параметров схемы замещения АД по каталожным данным, в них отсутствуют простые и удобные для применения методики расчета. Основными

факторами, влияющими на точность расчета параметров схемы замещения, являются: большое количество принимаемых допущений, сложность реализации алгоритма расчетов, итерационные циклы. В данной работе проведен сравнительный анализ результатов расчета параметров схемы замещения АД по трем методикам: методика 1[22], методика 2[23], методика 3[24] (табл. 9).

Таблица 9

Результаты расчета параметров схемы замещения по каталожным данным

Наименование расчетной величины	Параметр	Методика №1	Методика №2	Методика №3
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	R_s	0,103514	0,083017	0,0219
Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	R_r	0,020455	0,035206	0,051
Индуктивность обмотки статора, Гн	L_s	0,000426	0,000949	0,000888
Индуктивность обмотки ротора, Гн	L_r	0,000533	0,001178	0,001226
Индуктивность ветви намагничивания, Гн	L_m	0,008593	0,009789	0,007978

Для оценки рассчитанных параметров, была разработана имитационная модель подсистемы АД ВАСО4-37-24 в программе компьютерного моделирования *MATLAB* и его приложении *SIMULINK* (рис.8) и модель для снятия совместных электромеханических характеристик АД по методикам (1-3) (рис.9). Имитационная модель подсистемы состоит из следующих блоков: идеальный трехфазный источник напряжения (сопротивление источника равно нулю), асинхронный двигатель, блок задания нагрузки, измерительный блок (ток в статорной обмотке, электромагнитный момент, скорость вращения ротора), блок перевода скорости из рад/с в об/мин.

Результаты моделирования переходного процесса при прямом пуске на холостом ходу (значение блока задания нагрузки равно нулю) АД представлены на графиках (рис. 10-14).

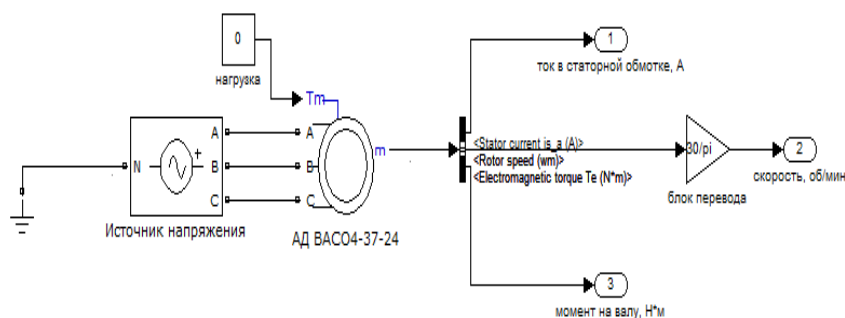


Рис.8. Модель подсистемы АД ВАСО4-37-24

Fig.8. The model of the VASO4-37-24 AM subsystem

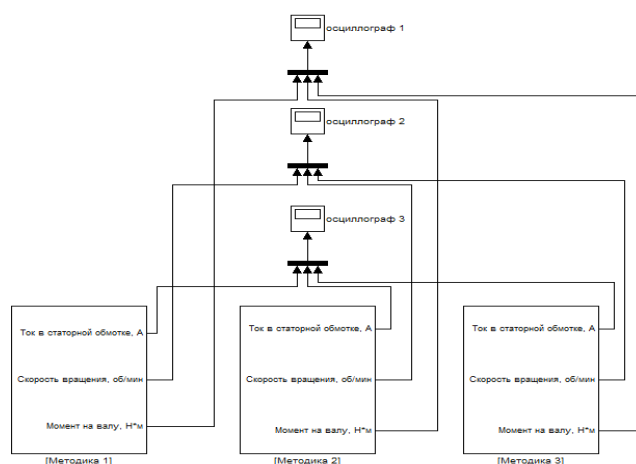


Рис.9. Модель системы для снятия совместных электромагнитных характеристик АД

Fig.9. Model of the system for removing the joint electromagnetic characteristics of AM

На графике (рис.10) показаны параметры скорости вращения двигателя в зависимости от времени моделирования. Время разгона двигателя для методик 2 и 3 практически совпали, выход на номинальную скорость составляет 1,3 секунды. Для методики 1 выход на номинальную скорость составил 1 секунду, однако данный метод имеет более длительный период перерегулирования в отличие от методик 2 и 3. В начале пуска у методики 3 наблюдается большее колебание скорости, чем у методики 1 и 2, что говорит о наличии вибрации в области низких скоростей.

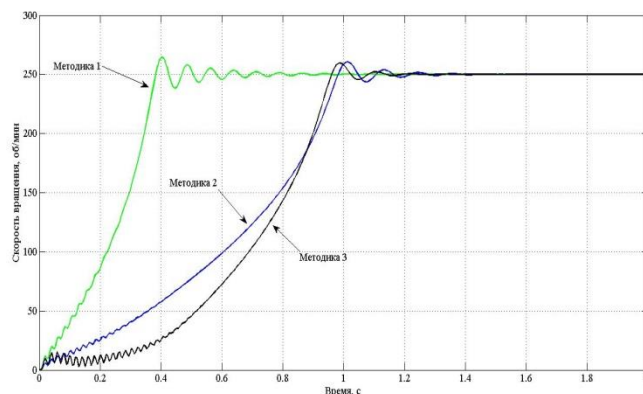


Рис.10. График зависимости скорости вращения от времени

Fig.10. Graph of the dependence of the rotation speed on time

На графиках (рис.11-13) показаны параметры тока в статорной обмотке АД в зависимости от времени моделирования, которые указывают на превышение паспортных значений пускового тока в 2,56 (методика 1), в 1,28 (методика 2) и в 1,53 (методика 3) соответственно. После переходного процесса номинальные токи для всех методик совпадают с паспортными значениями.

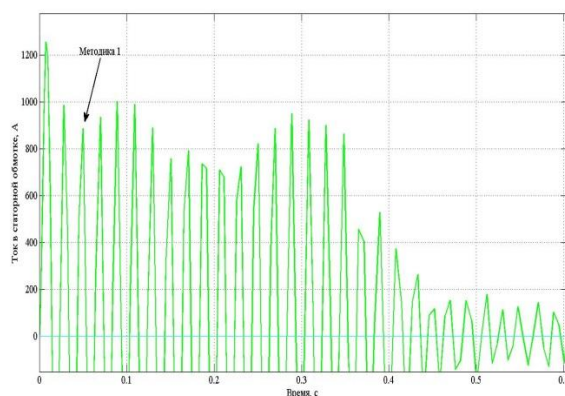


Рис.11. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 1)

Fig.11. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 1)

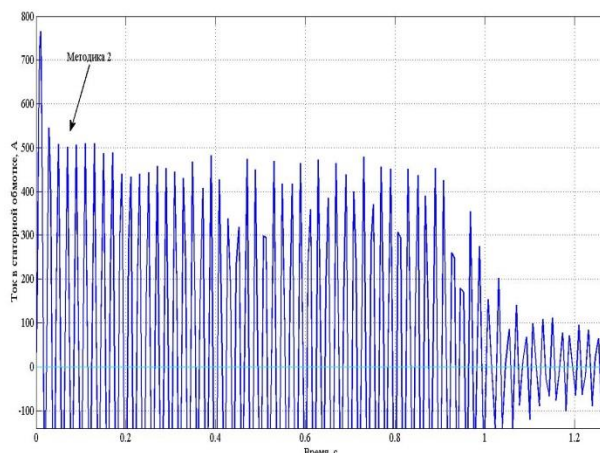


Рис.12. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 2)

Fig.12. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 2)

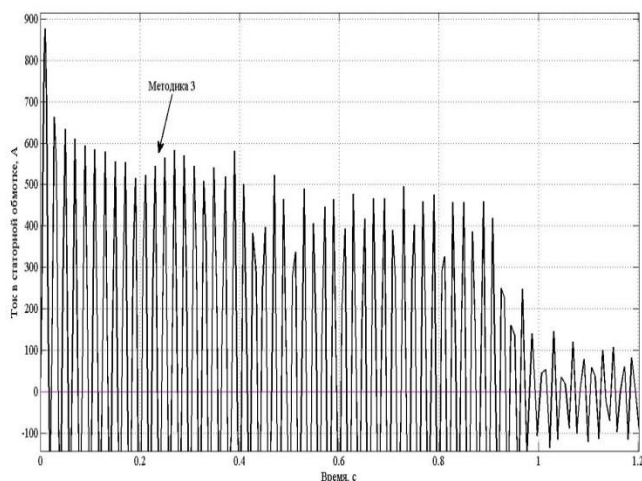


Рис.13. График зависимости тока в статорной обмотке от времени (методика 3)

Fig.13. Graph of the dependence of the current in the stator winding on time (method 3)

График (рис.14) показывает параметры электромагнитного момента на валу в зависимости от времени моделирования. Наиболее близким к паспортному значению критического момента является методика 1, однако данная методика имеет самый большой пусковой момент и время затухания переходного процесса, по сравнению с методикой 2. Методика 3 по характеристикам имеет близкие значения с методикой 2, однако имеются колебания (около 200 Н·м) ротора (биение) в области номинального режима работы АД. Сравнительный анализ показал, что не одна из методик полностью не совпала с паспортными данными. Наиболее близкими к паспортным данным являются методики 2 и 3, однако для методики 3 требуется информация о коэффициентах полезного действия и мощности при различной нагрузке электродвигателя, которая не всегда доступна (не каталожный параметр), но может быть рассчитана, например, по формулам из [25]. Методика 2 по сравнению с другими методиками наиболее близко подошла к паспортным значениям АД (пусковой ток и момент), алгоритм расчета был наиболее прост и понятен при вычислениях, отсутствие итерационных циклов при достаточной точности вычислений делают эту методику наиболее удобной (из представленных методик) для использования в расчетах модели.

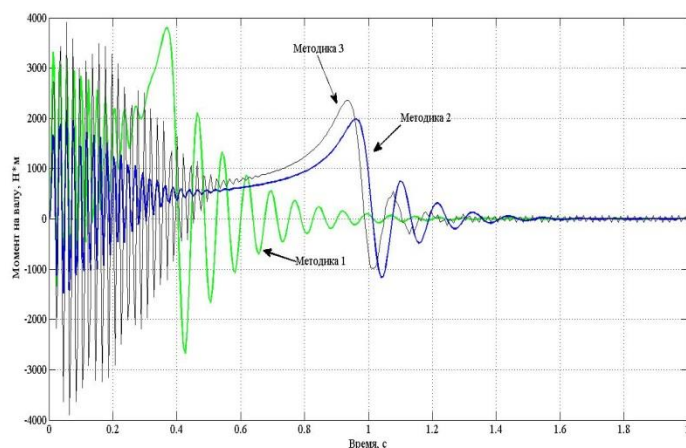


Рис.14. График зависимости момента на валу от времени

Fig.14. Graph of the dependence of the moment on the shaft on time

Расчет нагрузки

В качестве нагрузки для многополюсных тихоходных электродвигателей серии ВАСО4-37-24 применяются композитные стеклопластиковые рабочие колеса типа ГАЦ-50-4М2 (рис.15).

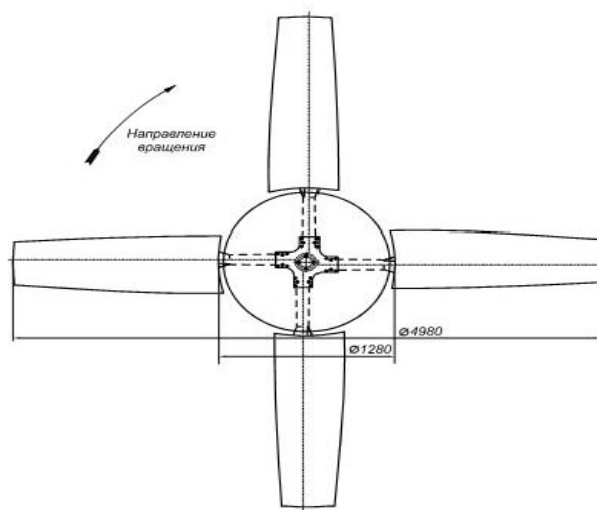


Рис.15. Стеклопластиковое рабочее колесо типа ГАЦ-50-4М2 Fig.15. Fiberglass impeller type GATS-50-4M2

Для работы механизма с большим моментом инерции требуется выполнения динамического разгона/торможения, при этом следует учитывать изменение момента, связанного с инерционностью механизма.

Момент инерции привода АВО газа можно определить:

$$J = J_{\text{дв}} + J_{\text{вен}}, \quad (1)$$

где $J_{\text{дв}}$ – момент инерции двигателя (табл.8); $J_{\text{вен}}$ – момент инерции вентилятора.

Приближенно осевой момент инерции вентилятора можно определить [26]:

$$J_{\text{вен}} = \frac{0,2 \cdot M_{\text{вен}} \cdot (0,4 \cdot R)^2}{2}, \quad (2)$$

где $M_{\text{вен}}$ – суммарная масса рабочего колеса; R – радиус рабочего колеса (табл.10).

Подставляя значения в формулу 2, получим:

$$J_{\text{вен}} \approx 0,5 \cdot J_{\text{дв}}.$$

Рассчитываем коэффициент вязкого трения:

$$F = \frac{\Delta P_{\text{мех}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери в двигателе.

Механические потери в двигателе определяются [16]:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,02...0,05) \cdot P_n, \quad (4)$$

где P_n – номинальная мощность двигателя (табл. 8).

Таблица 10

Технические характеристики рабочего колеса ГАЦ-50-4М2

Наименование параметра	Значение
Диаметр рабочего колеса	4,98 м
Диаметр ступицы	1,28 м
Число лопастей	4
Масса рабочего колеса	140 кг
Масса лопасти	30 кг
Номинальный расход воздуха	510000 м ³ /ч

Наименование параметра	Значение
Номинальный статический напор	200 Па

Момент сопротивления двигателя задается [26]:

$$M_c = M_o + (M_{ном} - M_o) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (5)$$

где M_o – момент сопротивления при пуске; $M_{ном}$ – момент сопротивления при номинальной нагрузке; ω – частота вращения ротора.

Момент сопротивления при номинальной нагрузке определяется [23]:

$$M_{ном} = \frac{P_n}{\eta \cdot \omega_{ном}}, \quad (6)$$

где η – КПД двигателя (табл.10)

Момент сопротивления при пуске определяется [27]:

$$M_o = (0.05...0.1) \cdot M_{ном}. \quad (7)$$

Полученные значения из (1,3) вносятся в *MATLAB* в окно настройки АД, по уравнению (5) моделируется блок сопротивления (нагрузки) для АД. Значения, полученные из (1,3,4,6,7) вносятся в табл.11.

Таблица 11

Результаты расчетных инерционно-механических характеристик АД АВО газа

Наименование величины	Параметры	Расчетные значения
Номинальный момент, Н·м	$M_{ном}$	1614,61
Момент сопротивления при пуске, Н·м	M_o	161,461
Механические потери в двигателе, Вт	$\Delta P_{мех}$	1850
Коэффициент вязкого трения, Н·м·с	F	2,79
Момент инерции привода АВО, кг·м ²	J	39

Расчет параметров схемы замещения кабельной линии

Для определения параметров схемы замещения КЛ, заданной в программе, (рис.16) необходимо найти активное сопротивление, индуктивность и емкость линии:

$$R_l = r_0 \cdot l, \quad (8)$$

$$L_l = \frac{x_0 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (9)$$

$$C_l = c_0 \cdot l, \quad (10)$$

где r_0 – удельное активное сопротивление линии; x_0 – удельное индуктивное сопротивление линии; f – частота сети; c_0 – удельная ёмкость линии (не учитываем для КЛ 0,4 кВ) (табл.12).

Результаты вычисленных значений из (8-10) параметров схемы замещения КЛ в зависимости от номера КТП вносятся для каждой модели в окно настроек КЛ программы *MATLAB*.

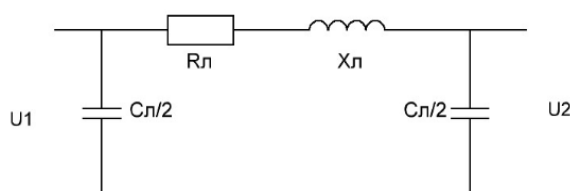


Рис.16. Схема замещения КЛ в *MATLAB/SIMULINK* Fig.16. CL substitution scheme in *MATLAB/SIMULINK*

Таблица 12

Технические характеристики кабельных линий ЭТК АВО ГП №1

Наименование объекта	Марка кабеля	Длина, м	Удельное индуктивное сопротивление, ом/км	Удельное активное сопротивление, ом/км	Удельная емкость, мкФ/км
		l	X_0	r_0	C_0
КТП-2	ААШВ-3×150 (6кВ)	200	0,074	0,206	0,51
	АВВГ-4×50(1кВ)	150	0,0625	0,64	-
КТП-5	ААШВ-3×95(6кВ)	350	0,078	0,326	0,42
	АВВГ-3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-6	ААШВ-3×95(6кВ)	400	0,078	0,326	0,42
	АВВГ-3×70+1×35 (1кВ)	120	0,0612	0,46	-
КТП-7	ААШВ-3×70 (6кВ)	750	0,084	0,443	0,4
	АВВГ-3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-
КТП-8	ААШВ-3×70 (6кВ)	800	0,084	0,443	0,4
	АВВГ-3×70+1×25 (1кВ)	85	0,0612	0,46	-

Расчёт параметров схемы замещения источника электроснабжения

Источником электроснабжения (рис.2) является трансформатор серии ТДН-25000/110/6 (табл.13). Параметры схемы замещения модели могут быть определены выражениями [15,28]. Параметры проверяются на модели (рис.6) (где сравнивается расчетное и смоделированное значение мощности трехфазного короткого замыкания за трансформатором). В зависимости от выбранного варианта настройки блока, результаты из выражений 4 или 6-7 (табл.14) вносим в окно настройки источника электроснабжения в программной среде *MATLAB*.

Таблица 13

Каталожные (паспортные) данные трансформатора типа ТДН-25000/110/6

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Число фаз	m	3	-
Номинальная мощность трансформатора	$S_{ном}$	25000	кВА
Напряжение ВН	$U_{1ном}$	110	кВ
Напряжение НН	$U_{2ном}$	6	кВ
Номинальная частота сети	f	50	Гц
Напряжение короткого замыкания	U_k	10,5	%
Потери короткого замыкания	P_k	120	кВт
Потери холостого хода	P_0	17	кВт
Ток холостого хода	I_0	0,2	%
Схема соединения обмоток	Y/D-11		

Таблица 14

Расчетные значения параметров источника электроснабжения

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
1	Базисное напряжение	$U_{баз}$	6300	В
2	Базисная мощность (произвольный параметр)	$S_{баз}$	100	МВ·А
3	Индуктивное сопротивление схемы замещения трансформатора 110/6 кВ	$X_{тр-ра}$	0,42	о.е.
4	Мощность трехфазного короткого замыкания за трансформатором 110/6 кВ	$S_{k(3)}$	238,1	МВ·А
5	Индуктивное сопротивление источника электроснабжения	$X_{ист}$	0,16669	Ом

№	Наименование величины	Параметр	Значение	Единицы измерения
6	Индуктивность источника электроснабжения	$L_{ист}$	0.000531	Гн
7	Активное сопротивление источника электроснабжения	$R_{ист}$	0.016669	Ом

Результаты

В ходе исследования в программной среде *MATLAB/SIMULINK* была создана модель ЭТК АВО (рис.17,18). С помощью данной модели были получены электромеханические (рис.19) и энергетические характеристики (табл.15,16).

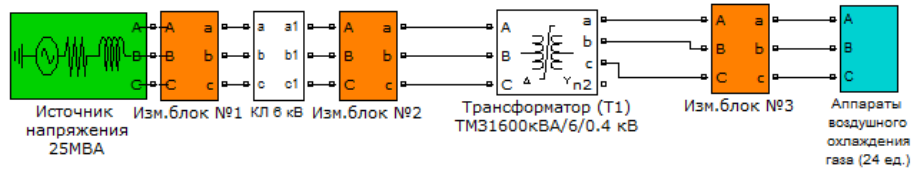


Рис.17. Модель ЭТК АВО для централизованной системы электроснабжения

Fig.17. The ACD ETC model for a centralized power supply system

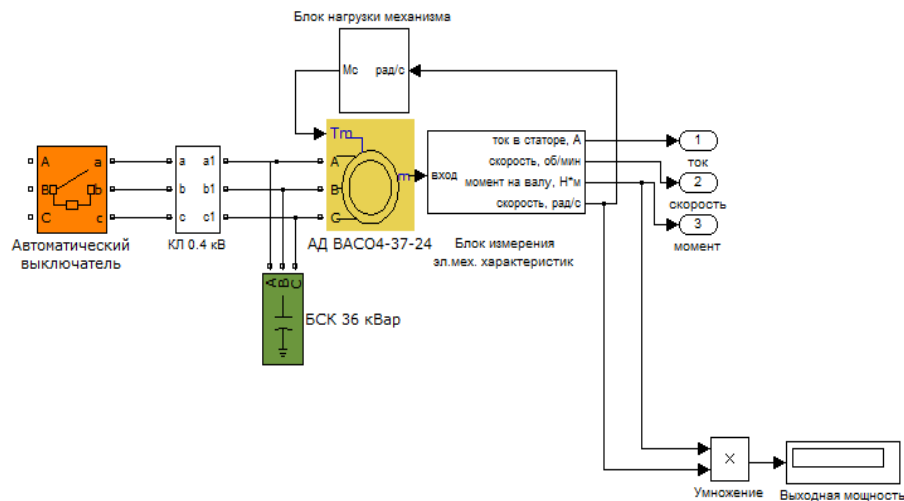


Рис.18. Модель АВО газа (1 ед.)

Fig.18. ACD gas model (1 unit)

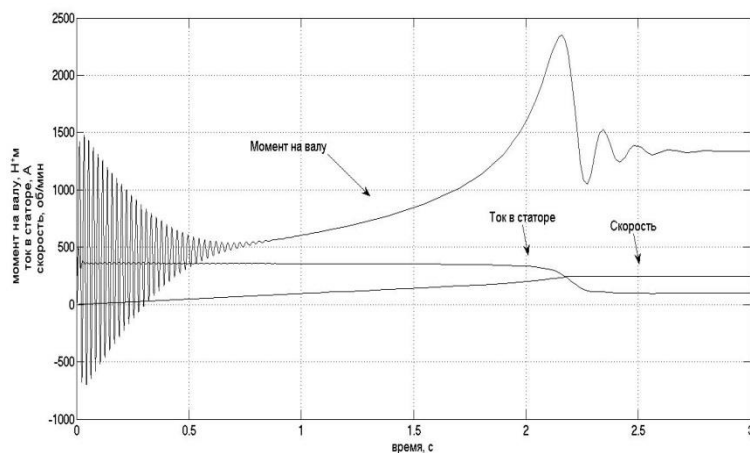


Рис.19. Электромеханические характеристики АД АВО газа, полученные при решении модели (Рис.18) для одного АД

Fig.19. Electromechanical characteristics of the ACD gas pressure obtained by solving the model (Fig.18) for one AM

Таблица 15

Энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа (1 ед.)

Параметры	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	40260,19	40257,81	38012,20	37055,22
Реактивная мощность, ВАр	32317,34	33199,55	12157,10	12063,88
Полная мощность, ВА	51626,48	52181,42	39908,93	38969,56
Коэффициент мощности ($\cos\varphi$)	0,78	0,77	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности ($\tan\varphi$)	0,8	0,82	0,32	0,33
Потери активной мощности в АД, Вт/КПД, %	2495,22/93,26			
Потери полной мощности в КЛ 0.4кВ, Вт/КПД, %	939,37/97,64			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	12272,49/76,48			
Коэффициент загрузки трансформатора, %	2,49			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/КПД, %	554,94/98,93			

Таблица 16

Энергетические характеристики модели ЭТК АВО газа для одной секции шин (24 ед.)

Параметры для группы АД (24 ед.)	Изм. блок №1	Изм. блок №2	Изм. блок №3	Изм. блок №4
Активная мощность, Вт	919451,91	918625,6	911163,94	38063,08
Реактивная мощность, ВАр	336342,31	336924,38	290614,94	12129,73
Полная мощность, ВА	979039,3	978463,61	956387,36	39949,07
Коэффициент мощности ($\cos\varphi$)	0,94	0,94	0,95	0,95
Коэффициент реакт. мощности ($\tan\varphi$)	0,37	0,37	0,32	0,32
Потери активной мощности в АД, Вт/ КПД, %	3543,08/90,69			
Потери полной мощности в тр-ре, Вт/ КПД, %	22076,25/97,74			
Коэффициент загрузки трансформатора, %	59,77			
Потери полной мощности в КЛ 6кВ, Вт/КПД, %	575,69/99,94			

Полученные электромеханические характеристики модели АД серии ВАСО4-37-24 наиболее близки к его паспортным (каталожным) параметрам. Время пуска модели АД ЭТК АВО газа соответствует его реальным (натурным) показателям в отличие от работ, представленных в источниках [10-11], где время пуска модели АД превышает в 10–14 раз реальные пусковые показатели установок АВО газа. Энергетические характеристики модели ЭТК АВО, полученные для одной секции шин (24 ед.) позволяют исследовать и проводить анализ энергетической эффективности в условиях длительного функционирования с несинусоидальной системой электроснабжения. Рекомендации по совершенствованию энергетической эффективности, которые могут быть разработаны на основе этой модели, позволят осуществить развитие методов коррекции коэффициента мощности и фильтрации гармоник для централизованной и в последующем для автономной системы электроснабжения ЭТК газовых промыслов с преобладанием активно-индуктивной нагрузки.

Обсуждение

С помощью модели ЭТК АВО для централизованной системы электроснабжения было произведено экспериментальное исследование закономерности влияния одиночных (групповых) запусков на перегрузочную способность источника электроснабжения. Пуски осуществлялись поочередно (по одному, по два и т.д.) с различным временным шагом включения АД в работу. Перегрузочная способность источника электроснабжения оценивалась с помощью пересечения аппроксимирующей кривой для пусковых токов АД АВО с номинальным током вторичной обмотки трансформатора (рис.20). Алгоритм включения для ЭТК АВО при прямых пусах АД, обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы электроснабжения, может быть определён по уравнениям аппроксимирующей зависимости значений пусковых токов АД относительно линии тренда суммарного потребляемого тока группы АВО от времени последовательного прямого пуска (табл.17). Результаты эксперимента показали, что оптимальное время включения в

зависимости от максимального действующего значения тока для одиночных (A_{onm1}) и парных запусков (A_{onm2}) АД находятся в следующих пределах:

$$A_{onm1} \leq 82,9924 \cdot x + 783,4979, \quad (11)$$

$$A_{onm2} \leq 56,4942 \cdot x + 840,3766, \quad (12)$$

где x – время запуска n -ного АД в группе.

Групповые пуски (по три, по четыре АД и т.д.) показали, что общее время запуска превышает групповые пуски (по одному, по два АД) и приводят к перегрузке источника электроснабжения.

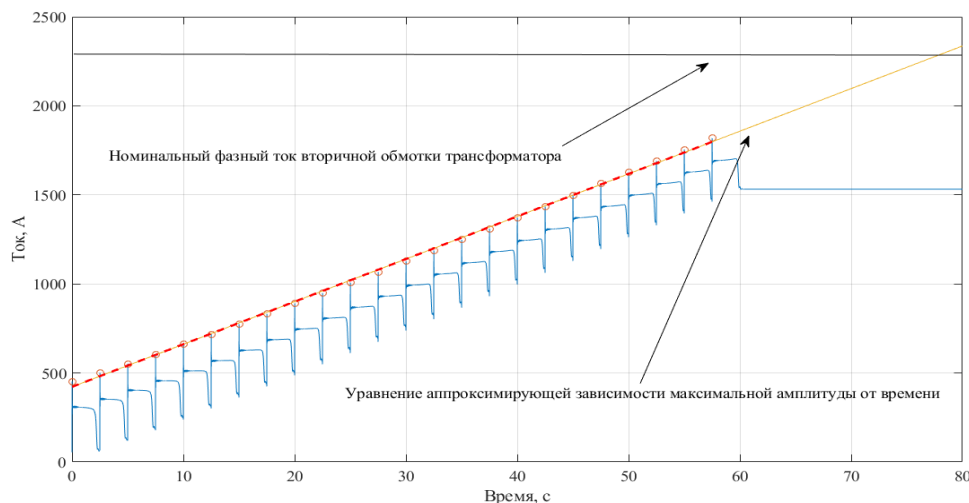


Рис.20. Экспериментальные характеристики для пусковых токов АД АВО газа (24 ед).

Fig.20. Experimental characteristics for starting currents of AM ACD gas (24 units).

Таблица 17
Экспериментальные данные одиночных (групповых) пусков вентиляторов для ЭТК АВО газа при исчезновении напряжения

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости
	Δt	$T_{общ}$	A_{max}	n	да/нет	t	
1	2,5	60,4	1818	1	нет	-	$y = 23.9235 \cdot x + 422.0782$
2	1	25,85	2176				$y = 61.1324 \cdot x + 794.6353$
3	0,95	24,5	2178				$y = 64.1797 \cdot x + 798.0857$
4	0,8	21,25	2310				$y = 82.9924 \cdot x + 783.4979$
5	0,79	21	2339		да	4	$y = 86.5507 \cdot x + 785.5680$
6	0,78	20,6	2355				$y = 88.9025 \cdot x + 802.6141$
7	0,75	20	2375				$y = 90.0683 \cdot x + 887.0502$
8	0,7	19	2380			6	$y = 93.7730 \cdot x + 935.4388$
9	0,65	17,8	2390				$y = 101.4611 \cdot x + 939.8017$
10	4	47	2090	2	нет	-	$y = 27.3108 \cdot x + 868.4938$
11	3,8	44,8	2095				$y = 28.7428 \cdot x + 868.5823$
12	3,5	41,5	2097				$y = 31.2148 \cdot x + 868.3088$
13	3,1	37	2098				$y = 35.2447 \cdot x + 868.2993$
14	2,5	30,4	2120				$y = 44.9996 \cdot x + 862.3832$
15	2,4	29,4	2220				$y = 48.9299 \cdot x + 865.4385$

№	Шаг включения, с	Общее время запуска, с	Максимальная амплитуда, А	Количество одновременных запусков АД	Наличие перегрузки	Время перегрузки, мкс	Уравнение аппроксимирующей зависимости
	Δt	$T_{общ}$	A_{max}	n	да/нет	t	
16	2,32	28,7	2310	3	да	10	$y = 56.4942 \cdot x + 840.3766$
17	2,3	28,2	2432				$y = 61.2742 \cdot x + 886.7366$
18	2,1	26	2480				$y = 57.7697 \cdot x + 1183.0242$
19	9	68	2380		да	3	$y = 16.6926 \cdot x + 1312.7539$
20	6	45	2385				$y = 25.0414 \cdot x + 1312.5166$
21	5	38	2384				$y = 30.0637 \cdot x + 1312.5962$

Наиболее оптимальное общее время запуска для групповых пусков АД серии ВАСО4-37-24 без перегрузки источника питания составило соответственно: 21,5 сек (для одиночных пусков); 28,7 сек (для пусков по два двигателя) и более 70 сек (по три двигателя). Учитывая, что в настоящее время групповое включение АД осуществляет технологический персонал в ручном режиме, одной из рекомендаций является создание автоматической системы группового пуска АД ЭТК АВО. Разработанный алгоритм включения для автоматической системы группового пуска позволит обеспечить восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения по сравнению с ручным режимом пуска.

Заключение

1. Проведен анализ структуры и отдельных элементов ЭТК АВО ГП №1 ООО «Газпром добыча Ямбург» как объекта исследования.

2. Разработана структурная модель для ЭТК АВО газа, которая разбивается на элементы и измерительные блоки.

3. Внесены необходимые поправки в расчеты параметров схемы замещения в именованных единицах [14], которые показали высокую сходимость (отклонение не более 3 %). Разработана имитационная модель для проверки рассчитанных параметров трансформатора по каталожным данным.

4. Проведен сравнительный анализ методик расчета асинхронного двигателя по каталожным данным, который выявил наиболее удобный и простой (из представленных методик) алгоритм расчета параметров схемы замещения.

5. Выполнен расчет параметров схем замещения источника электроснабжения, кабельных линий высокого и низкого напряжения в программной среде MATLAB.

6. Произведен ориентировочный расчет механических и инерционных характеристик для многополюсного АД серии ВАСО4-37-24 с композитным стеклопластиковым рабочим колесом типа ГАЦ-50-4М2. Расчет показал, что момент инерции механизма (J) в 22 раза меньше чем в работе [11]. Создана модель нагрузки (момента сопротивления) для АД.

7. Разработана модель в среде MATLAB/SIMULINK для ЭТК АВО. Выполнено экспериментальное исследование модели АВО на холостом ходу и на номинальную нагрузку, которое показало совпадение электромеханических характеристик с паспортными значениями АД серии ВАСО4-37-24.

8. Выполнено экспериментальное исследование модели ЭТК АВО в динамическом режиме, которое показало совпадение времени пуска с реальными показателями на производстве в отличие от работ, представленных в источниках, где время пуска модели АД превышает в 2,72 [10] и 11 [11] раз реальные пусковые показатели установок АВО газа.

9. Получены энергетические характеристики для ЭТК АВО газа (1 и 24 ед.).

10. Даны рекомендации по совершенствованию восстановления технологического режима при исчезновении напряжения с помощью автоматической системы группового пуска АД ЭТК АВО газа вместо ручного режима пуска.

11. Разработан алгоритм включения для ЭТК АВО при прямых пусках АД, обеспечивающий восстановление технологического режима в течение оптимального времени после исчезновения напряжения для централизованной системы

электрообеспечения. Серия экспериментов показала, что наиболее предпочтительным методом является поочередный запуск АД, т.к. при этом методе обеспечивается наиболее быстрое восстановление технологического режима без перегрузки источника электрообеспечения.

Литература

1. Меньшов Б.Г. Суд И.И. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности. М.: Недра. 1984. 416 с.
2. Ziyodullo E. Holboiv F. Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 октября 2018 г, Kemerovo: EDP Sciences, 2018.
3. Козярук А.Е. Энергоэффективные электротехнические комплексы горнодобывающих и транспортных машин // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 261-269.
4. Abdulhy Al-Ali M.A., Kornilov V.Y., Gorodnov A.G. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 127-132.
5. Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. с. 339-347.
6. Городнов А.Г. Оценка энергоэффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия с автономной системой электрообеспечения // Инновационная наука в глобализующемся мире. 2020. № 1 (7). С. 30-31.
7. Савенко А.Е., Савенко П.С. Оптимизация использования автономного электротехнического комплекса на объектах нефтегазовой промышленности // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: материалы IV Международной научно-практической конференции; 16–18 октября 2019 г., Альметьевск: АГНИ, 2019. С. 429-432.
8. Xiaodong L., Omid G., Wilsun X. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. N3. pp. 3164-3174.
9. Масков Л.Р., Корнилов В.Ю. Анализ структуры и энергетических параметров электротехнического комплекса газового промысла No1 ООО «Газпром добыча Ямбург» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 66-86. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.
10. Шабанов В.А., Пашкин В.В., Ивашкин О. Н. Моделирование процесса пуска электропривода АВО газа в режиме противовключения // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов конференции. Уфа: УГНТУ, 2013. С. 127-133.
11. Аршакян И.И., Артюхов И.И., Степанов С.Ф. Компенсация реактивной мощности в системах электрообеспечения аппаратов воздушного охлаждения газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1(2). С. 92-100.
12. Qiong W., Saeed J., Francisco L. Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V. 53. N7. pp. 1-8.
13. Wenxia S., Daixiao P., Ming Y., et al. Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. V. 110. N2. pp. 107-117.
14. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12-24.
15. SimPower Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc.; 2003. 620 p.
16. Wu B and Narimani M. High-Power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2nd ed. 2017.
17. Кузнецов Е.М., Зубов Д.Д., Кошман Р.В. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя в программной среде Multysim // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием; 17 мая 2018 г., Омск: ОГТУ, 2018. С. 248-251.
18. Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Шаряпов А.М., и др. Анализ спектральных характеристик тока асинхронного электропривода // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 7. С. 80-86.

19. Zhen G., Qing-wei Z. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1060.
20. Пиляев С.Н., Афоничев Д.Н. Обоснование параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13. № 4 (67). С. 129-138.
21. Гридин В.М. Расчет характеристик асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2018. № 9. С. 44-48.
22. Мясовский В. А. Исследование методов расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по данным каталога производителя // Молодой ученый. 2020. № 20. (310). С. 127-133.
23. Фаттахов К. М., Фаттахов Р. К. Метод определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов конференции; 08–09 апреля 2011 г., Уфа: УГНТУ, 2011. С. 123-131.
24. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 1998. №4. С. 38-42.
25. Влияние загрузки электродвигателей на коэффициенты полезного действия и мощности [Электронный ресурс] // Образовательный сайт Школа для электрика. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1113-vlijanie-zagruzki-jelektrodvigatelej.html>. (дата обращения 21.01.2022).
26. Электропривод вентиляционной установки [Электронный ресурс] // Образовательный сайт. URL: <https://works.doklad.ru/view/1aTyWgvjBKc/2.html> (дата обращения 01.04.2022).
27. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздухоудных установках. М.: Энергоатомиздат. 2006. 360 с.
28. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания в электросетях 0,4-35 кВ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 88 с.

Авторы публикации

Масков Линар Рамильевич – аспирант кафедры приборостроения и мехатроники, Казанский государственный энергетический университет.

Корнилов Владимир Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения и мехатроники, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Men'shov BG, Sud II. Elektrifikatsiya predpriyatii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti. Moscow: Nedra; 1984.
2. Ziyodullo E., Holboiv F. *Modernization of Control Systems of Electric Drives of Mine Lifting Machines. E3S Web of Conferences: 3rd International Innovative Mining Symposium, IIMS 2018: Electronic edition, Kemerovo, 3–5 Oct 2018.* Kemerovo: EDP Sciences, 2018. doi 10.1051/e3sconf/20184103006.
3. Kozyaruk AE. Energoeffektivnye elektrotekhnicheskie komplekсы gornodobyvayushchikh i transportnykh mashin. *Zapiski Gornogo instituta.* 2016; 218: 261-269.
4. Abdulhy Al-Ali MA, Kornilov VY, Gorodnov AG. Optimal operation of electrical power generators for wells operated by artificial lifting at Rumaila field. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS.* 2018; 20(11-12):127-132. doi 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-127-132.
5. Shklyarskii YaE, Zamyatina EN, Zamyatin EO. Otsenka energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* 2020; 3: 339-347.
6. Gorodnov AG. Otsenka energoeffektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvayushchego predpriyatiya s avtonomnoi sistemoi elektrosnabzheniya. *Innovatsionnaya nauka v globalizuyushchemsya mire.* 2020. 7 (1): 30-31.
7. Savenko AE, Savenko PS. Optimizatsiya ispol'zovaniya avtonomnogo elektrotekhnicheskogo kompleksa na ob'ektakh neftegazovoi promyshlennosti. *Dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya neftegazovoi otrasli: materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; 16–18 Oct 2019.* Al'met'evsk. Russia: Al'met'evskii gosudarstvennyi neftyanoi institut, 2019. pp. 429-432.

8. Xiaodong L., Omid G., Wilsun X. *Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017; 53 (3): 3164-3174. doi: 10.1109/TIA.2016.2613984.
9. Maskov LR, Kornilov VYu. Analiz struktury i energeticheskikh parametrov elektrotekhnicheskogo kompleksa gazovogo promysla №1 ООО «Gazprom dobycha Yamburg» *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021. 23(6):66-86. doi 10.30724/1998-9903-2021-23-6-66-86.
10. Shabanov VA, Pashkin VV, Ivashkin ON. Modelirovanie protsessa puska elektroprivoda AVO gaza v rezhime protivovklyucheniya. *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii: sbornik nauchnykh trudov konferentsii*. Ufa: Russia: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2013. pp. 127-133.
11. Arshakyan II, Artyukhov II, Stepanov SF. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya apparatov vozdušnogo okhlazhdeniya gaza. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. 2(1): 92-100.
12. Qiong W., Saeed J., Francisco L. *Parameter Estimation of Three-phase Transformer Models for Low-frequency Transient Studies from Terminal Measurements. IEEE Trans. Magnetics*. 2017. 53(7): 1-8. doi:10.1109/TMAG.2016.2563389.
13. Wenxia S., Daixiao P., Ming Y., et al. *Low-frequency model for single-phase transformers based on the three-component Preisach model considering deep saturation International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. 110(2):107-117. doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.050.
14. Novash IV, Rummyantsev YuV. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MATLAB-SIMULINK s uchetom nasyshcheniya magnitoprovoida. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*. 2015. 1:12-24.
15. SimPower Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc.; 2003.
16. Wu B., Narimani M. *High-Power converters and AC drives*. Wiley-IEEE Press, 2nd ed. 2017.
17. Kuznetsov EM, Zubov DD, Koshman RV. Identifikatsiya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya v programmnoi srede Multisim. *Aktual'nye voprosy energetiki: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem; 17 Mart 2018*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. pp. 248-251.
18. Makarov VG, Tsvenger IG, Sharyapov AM, i dr. Analiz spektral'nykh kharakteristik toka asinkhronnogo elektroprivoda. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2018. 21(7):80-86.
19. Zhen G., Qing-wei Z. The Study on Mathematical Model and Simulation of Asynchronous Motor Considering Iron Loss. *Journal of Physics:Conference Series*. 2018. 1060. DOI:10.1088/1742-6596/1060/1/012085.
20. Pilyaev SN, Afonichev DN. Obosnovanie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo elektrodvigatelya. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020. 13(4): 129-138. (In Russ). doi 10.17238/issn2071-2243.2020.4.129.
21. Gridin VM. Raschet kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei po kataloghnym dannym. *Elektrichestvo*. 2018. 9: 44-48. doi 10.24160/0013-5380-2018-9-44-48.
22. Myasovskii VA. Issledovanie metodov rascheta parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya po dannym kataloga proizvoditelya. *Molodoi uchenyi*. 2020. 310 (20):127-133.
23. Fattakhov KM, Fattakhov RK. Metod opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym. *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatii: sbornik nauchnykh trudov konferentsii; 08–09 April 2011*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2011. pp. 123-131.
24. Moshchinskii YuA, Bespalov VYa, Kiryakin AA. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnykh dvigatelei po kataloghnym dannym. *Elektrichestvo*. 1998. 4:38-42.
25. Vliyanie zagruzki elektrodvigatelya na koeffitsienty poleznogo deistviya i moshchnosti [Elektronnyi resurs]. In: *Obrazovatel'nyi sait Shkola dlya elektrika*. Available at: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1113-vliyanie-zagruzki-jelektrodvigatelyej.html>. Accessed: 21 Jan 2022.
26. Elektroprivod ventilyacionnoj ustanovki [Elektronnyj resurs]. In: *Obrazovatel'nyj sayt*. URL:<https://works.doklad.ru/view/1aTyWgvjBKc/2.html>. Accessed: 01 Apr. 2022.
27. Leznov BS. Energoberezhenie i reguliruemyi elektroprivod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh. Moscow.: Energoatomizdat, 2006.
28. Golubev ML. *Raschet tokov korotkogo замыкания в электроустановках 0,4-35 кВ*. 2nd ed. Moscow: Energiya, 1980.

Authors of the publication

Linar R. Maskov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vladimir Y. Kornilov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено ***30.03.2022г.***

Отредактировано ***06.04.2022г.***

Получено ***20.04.2022г.***

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.И. Бирюлин¹, Д.В. Куделина²

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

ORCID¹: 0000-0002-1681-184X, bir1956@mail.ru

ORCID²: 0000-0003-2304-9547, mary_joy@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть вопросы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения. Показать, что качество электрической энергии при работе систем электроснабжения в определенных случаях может нарушаться, в том числе и из-за неравномерной нагрузки фаз электрической сети, что приводит к значительной несимметрии напряжений в этой сети. Возникновение большой разницы между напряжениями по фазам электрической сети неизбежно приводит к отрицательным воздействиям на различное электрооборудование как энергоснабжающих организаций, так и на электроприемники потребителей, создавая тем самым условия для возникновения технологического и электромагнитного ущерба, являющихся причинами появления финансовых потерь и других негативных последствий при нарушениях качества электроэнергии. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод математического моделирования системы электроснабжения, реализованный средствами MatLab®. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приведены результаты измерений несимметрии напряжения, полученные авторами статьи при мониторинге качества электроэнергии. Данные результаты показывают, что в процессе работы систем электроснабжения возникают режимы, при которых несимметрия напряжений по нулевой последовательности значительно превосходит допустимые значения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Показано на компьютерной модели простейшей системы электроснабжения, что снижение сопротивления нулевого проводника может служить довольно эффективным мероприятием по снижению несимметрии напряжений, особенно при преобладании индуктивной нагрузки в составе потребителей.

Ключевые слова: качество, электроэнергия, несимметрия, обратная последовательность, нулевая последовательность, компьютерное моделирование

Благодарности: Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук МК-5109.2022.4 "Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии".

Для цитирования: Бирюлин В.И., Куделина Д.В. Разработка модели для анализа способов снижения несимметрии напряжений в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 72-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86.

MODEL DEVELOPMENT FOR THE ANALYSIS OF REDUCING VOLTAGE ASYMMETRY METHODS IN POWER SUPPLY SYSTEMS

VI. Biryulin¹, DV. Kudelina²

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Southwest State University, Kursk, Russia

ORCID¹: 0000-0002-1681-184X, bir1956@mail.ru

ORCID²: 0000-0003-2304-9547, mary_joy@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. To consider the issues of ensuring the quality of electricity in power supply systems. Show that the quality of electrical energy during the operation of power supply systems in certain cases may be violated, including due to uneven loading of the electrical network phases, which leads to significant voltage asymmetry in this network. The occurrence of a large difference between the voltages in the phases of the electrical network inevitably leads to negative impacts on various electrical equipment of both power supply organizations and consumer electrical receivers, thereby creating conditions for the occurrence of technological and electromagnetic damage, which are the causes of financial losses and other negative

consequences in case of quality violations electricity. **METHODS.** When solving the problem, we used the method of the power supply system mathematical modeling, implemented by means of MatLab®. **RESULTS.** The article presents the results of voltage asymmetry measurements obtained by the authors while monitoring the quality of electricity. These results show that during the operation of power supply systems, modes arise in which the voltage asymmetry in the zero sequence significantly exceeds the permissible values. **CONCLUSION.** The article shows on a computer model of the simplest power supply system that reducing the resistance of the neutral conductor can serve as a fairly effective measure to reduce voltage unbalance, especially when inductive loads predominate among consumers.

Keywords: quality, electricity, asymmetry, negative sequence, zero sequence, computer simulation

Acknowledgments: The publication was carried out with the Russian Federation President Grant financial support for young scientists state support - Candidates of Science, project No. MK-5109.2022.4 "An automated system development for identifying objects which have a negative impact on power quality".

For citation: Biryulin VI, Kudelina DV. Model development for the analysis of reducing voltage asymmetry methods in power supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):72-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-73-86.

Введение

В современном обществе к товарной продукции относятся не только товары, выпускаемые на соответствующем производстве в виде материальных объектов, но и электроэнергия. Одним из важнейших свойств любого вида товарной продукции, в том числе и электрической энергии, является качество, от которого во многом зависит привлекательность того или иного товара для потребителей. Качество каждого товара определяется некоторой совокупностью количественных показателей, определяющих определенные характеристики данного товара.

Для электрической энергии качество устанавливается в виде степени соответствия характеристик электроэнергии установленным или же нормативным значениям, представляющим собой показатели качества электрической энергии [1, 2].

Сети низкого, среднего и высокого напряжения входят в состав систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц, предназначенных для обеспечения потребителей электроэнергией. Точки передачи электроэнергии чаще всего разделяют электрические сети энергоснабжающих организаций и электрические сети потребителей электроэнергии. Положение этих точек устанавливается в ходе заключения договоров на электроснабжение или же при выполнении процесса технологического присоединения электросетей потребителей к электросетям поставщиков электрической энергии.

Но при анализе различных вопросов, связанных с качеством электрической энергии следует принимать во внимание, что электроэнергия по своим свойствам во многом отличается от материальных товаров. Во многом это связано с тем, что процессы производства, передачи и потребления электроэнергии неразрывны во времени. Также следует учитывать, что качество электрической энергии создается не только производителями и поставщиками электроэнергии, но также и ее потребителями [3–8].

Научная значимость статьи заключается в выявлении зависимостей между сопротивлением нулевого проводника в трехфазной четырехпроводной электрической сети и значениями фазных напряжений при неравномерной нагрузке в фазах и различном характере этой нагрузки. Результаты исследований показывают, что снижение сопротивления нулевого проводника позволяет снизить несимметрию напряжений, и это мероприятие будет наиболее эффективным при преимущественно индуктивном характере нагрузки.

Практическая значимость исследования состоит в том, что результаты исследования могут использоваться при разработке мероприятий по повышению качества электроэнергии. На базе полученных результатов легко оценивать эффективность снижения сопротивления нулевого проводника в ходе планирования мер для повышения качества электрической энергии, в частности, снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети с нулевым проводником.

Литературный обзор

К точке передачи электроэнергии в общем случае присоединяются несколько электрических сетей. При работе этих сетей происходит воздействие на качество электрической энергии, приводящее к ее снижению в той или иной мере. Но при этом влияние каждого из присоединений, как потребителей, так и поставщиков на процессы

снижения качества электроэнергии в подавляющем большинстве рассматриваемых случаев будет различным [3]. Если же несмотря на эти процессы, качество электроэнергии будет соответствовать установленным требованиям, то очевидно, что в этом случае нет необходимости в проведении дополнительных исследований или же мониторинга качества для определения степени влияния того или иного присоединения на качество электроэнергии [8].

Выход показателей качества электроэнергии за установленные границы неизбежно приводит к появлению негативных последствий. Эти последствия воздействуют как на различное электрооборудование энергоснабжающих организаций, так и на электроустановки и электроприемники потребителей электроэнергии. Это приводит к возникновению ущерба, разделяющегося на технологический и электромагнитный, который неизбежно приводит к появлению более или менее значительных финансовых потерь [7–16].

В настоящее время установлены показатели качества электроэнергии, определяющие характеристики сетевого напряжения, относящиеся к частоте, значениям и форме напряжения электрической сети, для трехфазной сети дополнительно рассматривается симметрия напряжений. Все указанные характеристики напряжения в течение времени непрерывно изменяются в той или иной степени.

Несмотря на постоянное развитие электроэнергетики, проблема поддержания надлежащего качества электрической энергии сохраняет свою актуальность в настоящее время, не только в нашей стране, но и в остальном мире. Известные из литературы исследования вопросов и проблем в области качества электроэнергии посвящены различным сторонам этой проблемы и изучают сложившееся положение в данной области без рассмотрения путей и способов повышения качества электроэнергии. В работе Коверниковой Л.И., Тульского В.Н., Шамонова Р.Н. [1] исследовались проблемы качества электроэнергии на уровне единой энергетической системы России. В работе Деда А. В., Сикорского С. П., Смирнова П. С. [2] показаны итоги измерений показателей качества электроэнергии в различных системах электроснабжения. В работе Харитонов Я.С., Бебихова Ю.В., Егорова А.Н. [4] анализируются результаты контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий. Работы Черепанова А.В., Тихомирова В.А., Куцего А.П. [9], Kleshchov A., Hugi C., Terentiev O. [11], Суворова И.Ф., Романова В.В., Хромова С.В. [18], Rozhkov V.V., Krutikov K.K., Trofimenko S.R. [23], Khatsevskiy K.V., Antonov A.I., Gonenko T.V. [25] посвящены исследованиям влияния несимметрии напряжений на работу электрических сетей и электроприемников. В работе Nenad A.M., Slobodan N.B., Jeroslav M.Ž. [26] исследовались вопросы поддержания качества электроэнергии в допустимых пределах с помощью пассивных LC фильтров.

Таким образом, в известной научной литературе вопросы повышения качества электроэнергии при несимметрии в электрической сети путем изменения параметров проводников сети изучены недостаточно глубоко. Научное значение результатов данного исследования заключается в обнаружении зависимостей между несимметрией напряжений в трехфазной электрической сети и сопротивлением нулевого проводника при различном характере нагрузки.

Также актуальность вопросов качества электроэнергии подтверждается большим количеством исследований, опубликованных в других источниках - [3, 5–8, 10, 12 – 17, 19 – 22, 24], как по общей проблеме качества электрической энергии, так и по отдельным сторонам этой проблемы, связанным с нарушением качества по некоторым отдельным показателям.

Материалы и методы

Рассмотрим более подробно негативные последствия нарушения симметрии напряжений в трехфазной электрической сети. Появление значительной несимметрии напряжений неблагоприятно сказывается на работу электрооборудования и электроприемников.

Авторами статьи выполнен большой объем работ по мониторингу качества электрической энергии, и на основе его результатов можно сделать обоснованный вывод, что нарушение установленных значений коэффициентов несимметрии напряжений происходит практически только для нулевой последовательности. Для подтверждения этого вывода приведем примеры результатов измерения показателей несимметрии напряжений, полученных авторами статьи при проведении мониторинга качества электроэнергии на двух энергетических объектах - суточные графики измерений фазных напряжений, коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, показанные на рис.1–3, 5–7. Эти измерения выполнялись в трехфазной электрической сети с нулевым проводом.

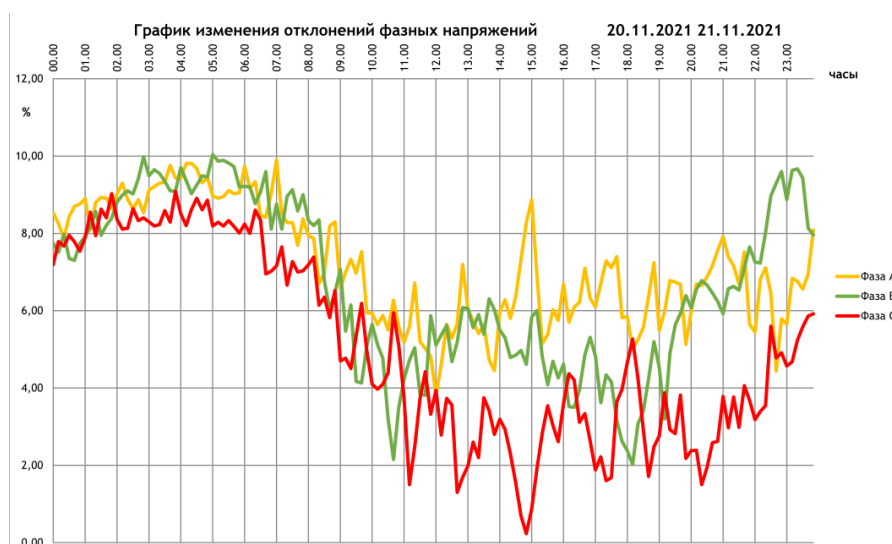


Рис. 1. Суточный график изменения фазных напряжений на первом энергетическом объекте

Fig. 1. Daily graph of phase voltage changes at the first power facility

Даже при кратком анализе данного графика видно, что имеются интервалы времени, в которых возникают значительные различия между напряжениями фаз. Эти различия служат причиной появления недопустимых значений напряжения нулевой последовательности, что проявляется в превышении установленных значений для коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности – рис.3, которое не должно быть больше 4% за весь период проведения измерений, а также не более 2% за 95% периода измерений.



Рис. 2. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на первом энергетическом объекте

Fig. 2. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in reverse order at the first power facility



Рис. 3. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на первом энергетическом объекте

Fig. 3. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in the zero sequence at the first power facility

Приведем в табл.1 значения коэффициента несимметрии, измеренные при проведении энергетических обследований.

Таблица 1

Значения коэффициента несимметрии напряжений на первом энергетическом объекте

Период	Результат измерений	Нормативное значение	T ₁ , %	T ₂ , %
95%	3,19	2,00	34,27	-
100%	4,75	4,00	-	1,40

Как видно из этой таблицы нормативные значения как за весь период измерений, так и за 95% длительности этого периода оказались превышенными. Причина появления такого нарушения качества электрической энергии – неравномерная нагрузка фаз и как следствие этого резкое отличие напряжений по фазам электрической сети. Для иллюстрации тесной связи значительной разности напряжений по фазам и недопустимо больших величин коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности приведем суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений на первом энергетическом объекте – рис.4.

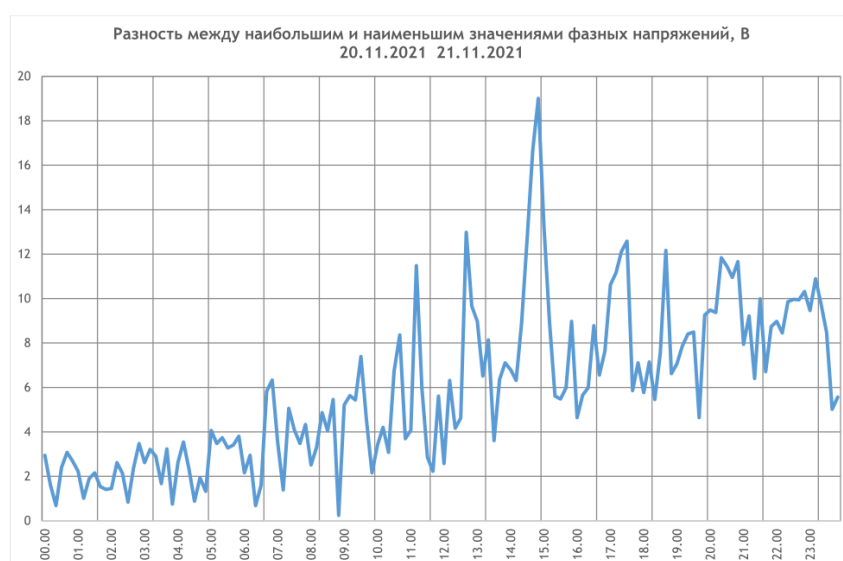


Рис. 4. Суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений

Fig. 4. Daily graph of the change in the difference between the maximum and minimum values of phase voltages

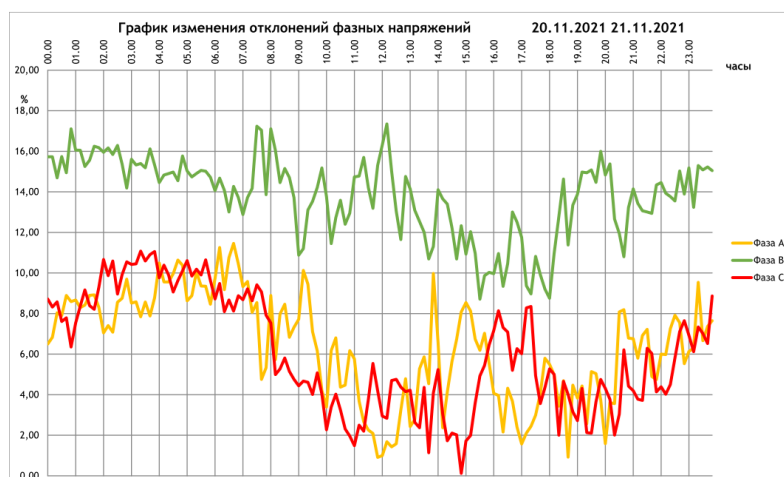


Рис. 5. Суточный график изменения фазных напряжений на втором энергетическом объекте

Fig. 5. Daily graph of phase voltage changes at the second power facility



Рис. 6. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на втором энергетическом объекте

Fig. 6. Daily graph of the change in the voltage asymmetry coefficient in reverse order at the second power facility



Рис. 7. Суточный график изменения коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности на втором энергетическом объекте

Fig. 7. Daily graph of the change in the coefficient of asymmetry of voltages in the zero sequence at the second power facility

На втором энергетическом объекте различия фазных напряжений оказались еще больше, и максимальное значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой

последовательности превышает предельно допустимое значение более чем в два раза. Это подтверждается данными, приведенными в табл.2.

Таблица 2

Значения коэффициента несимметрии напряжений на втором энергетическом объекте				
Период	Результат измерений	Нормативное значение	T ₁ , %	T ₂ , %
95%	7,59	2,00	100,0	-
100%	9,44	4,00	-	67,83

Далее приведем суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений на втором энергетическом объекте – рис.8.

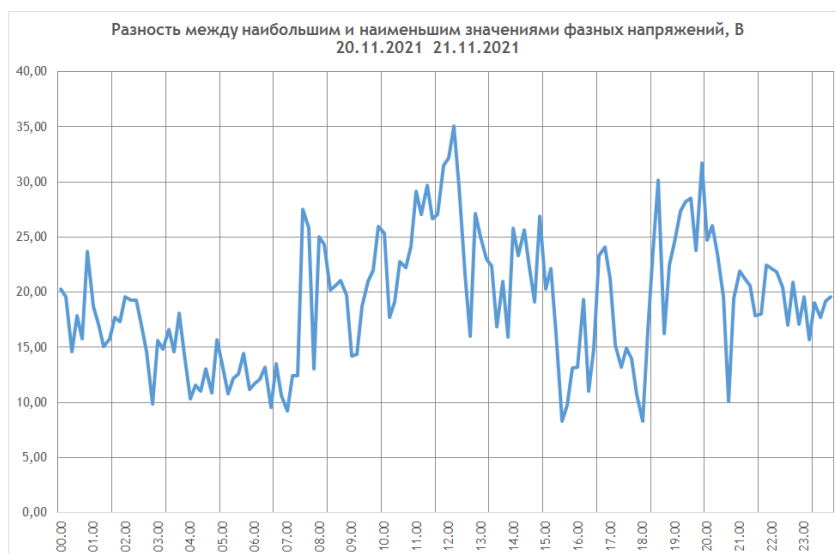


Рис. 8. Суточный график изменения разности между максимальным и минимальным значениями фазных напряжений

Fig. 8. Daily graph of the change in the difference between the maximum and minimum values of phase voltages

Как видно из приведенных выше графиков, напряжения обратной последовательности в обоих случаях не достигают больших значений, и величина коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности намного меньше коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности и не превышает предельно допустимого значения. Также следует обратить внимание на тот факт, что графики изменения разностей между максимальным и минимальным значениями напряжений по своей форме практически полностью повторяют графики изменения коэффициентов несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

Появление в трехфазной сети значительной разницы напряжений неблагоприятно сказывается на режимах работы электроприемников. Кроме того, в системе электроснабжения появляются дополнительные потери электроэнергии.

Поэтому для снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети на сегодняшний день предлагается несколько технических решений, наиболее эффективными из них считаются [29-31]:

- применение силовых трансформаторов с встроенными в них устройствами для симметрирования фазных напряжений;
- установка в электрических сетях специальных устройств для симметрирования напряжения.

Применение этих мероприятий требует вложения достаточно больших денежных сумм, поэтому необходимо рассматривать при выборе мер по снижению несимметрии в электрических сетях и более простые методы, не требующих привлечения значительных финансовых ресурсов.

Рассмотрим в качестве такого мероприятия изменение сопротивления нулевого проводника в четырехпроводной трехфазной электрической сети, схема которой приведена на рис.9.

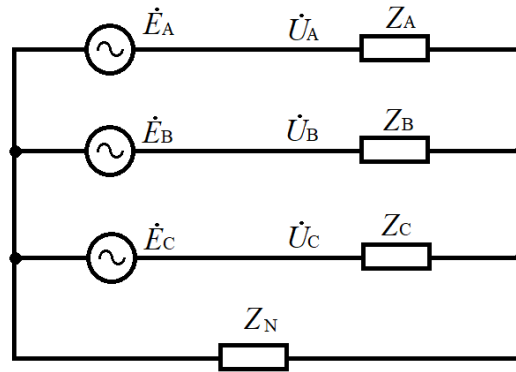


Рис. 9. Схема исследуемой электрической сети

Fig.9. Scheme of the investigated electrical network

В этой схеме источник питания представлен тремя фазными ЭДС - $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$. Нагрузка – тремя сопротивлениями Z_A , Z_B и Z_C соответственно. Напряжения на нагрузке - $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$. Сопротивление нулевого проводника - Z_N .

По известным методам теоретической электротехники напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_N$ определяется в общем случае как:

$$\dot{U}_N = \frac{Y_A \cdot \dot{E}_A + Y_B \cdot \dot{E}_B + Y_C \cdot \dot{E}_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (1)$$

где Y_A , Y_B , Y_C , Y_N – проводимости фазных нагрузок и нулевого провода, определяемые соответственно как:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A}, Y_B = \frac{1}{Z_B}, Y_C = \frac{1}{Z_C}, Y_N = \frac{1}{Z_N}. \quad (2)$$

Напряжение на каждой фазе, например, фазе А, можно определить при конечном сопротивлении и проводимости нулевого проводника как:

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A - \dot{U}_N. \quad (3)$$

Если предположить, что сопротивление нулевого проводника равняется нулю, то в этом случае:

$$\dot{U}_N = \dot{I}_N \cdot Z_N = 0. \quad (4)$$

Согласно формул (3) и (4) при уменьшении сопротивления нулевого проводника можно снизить величину несимметрии напряжения. Это достигается увеличением сечения данного проводника. Такое мероприятие достаточно просто реализовать по сравнению с заменой силовых трансформаторов на трансформаторных подстанциях или же установкой симметрирующих устройств, нуждающихся в устройствах регулирования, так как при изменении нагрузок необходимо управление параметрами данного устройства.

Проведем исследование эффективности предлагаемого способа на компьютерной модели. Считаем, что некоторая трехфазная нагрузка подключена к источнику питания, имеющему намного большую мощность, четырехжильным кабелем с медными жилами сечением 35 мм² и длиной 100 метров. При моделировании учитываем только активные сопротивления жил, так как индуктивные сопротивления кабелей в несколько раз меньше активных.

Проведем исследование приведенной выше схемы на компьютерной модели, созданной в пакете расширения Simulink компьютерной системы научно-технических расчетов MatLab. Сама модель представлена на рис.10.

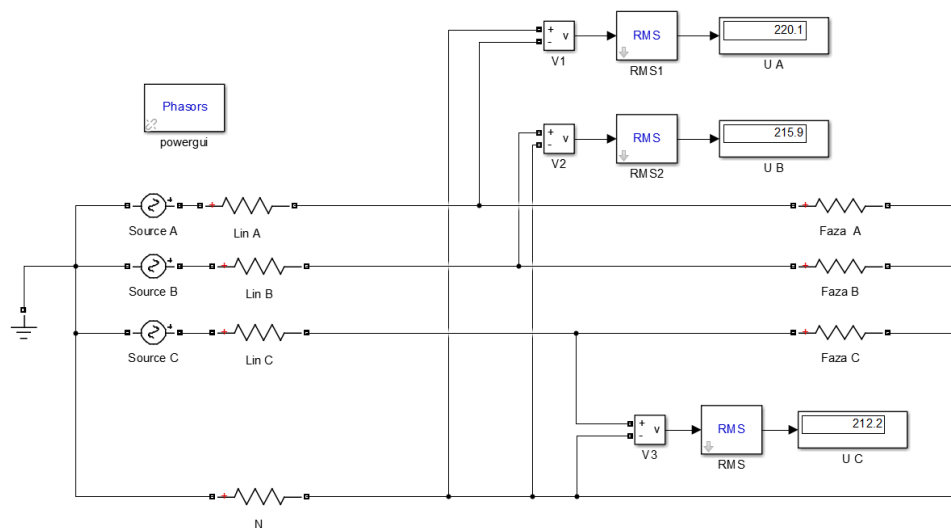


Рис. 10. Компьютерная модель исследуемой схемы

Fig.10. Computer model of the circuit under study

Элементы модели Source A, Source B, Source C представляют трехфазный источник питания с номинальным фазным напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Четырехжильный кабель сечением 35 мм² введен в модель активными сопротивлениями – элементами Lin A, Lin B, Lin C (фазные токопроводящие жилы) и N (нулевой провод). Значения сопротивлений элементов Lin A, Lin B, Lin C не изменяются при проведении процессов моделирования и равны 0,05 Ом (сопротивление жилы кабеля сечением 35 мм² и длиной 100 метров), сопротивление элемента N при работе модели будет изменяться от начального значения 0,05 Ом в меньшую сторону.

Элементы Faza A, Faza B, Faza C представляют трехфазную нагрузку. Эта нагрузка сначала принимается чисто активной и неравномерной по фазам, затем активно-индуктивной с равенством активной и индуктивной составляющей, после активно-индуктивной с преобладанием активной и индуктивной составляющей. Напряжение на нагрузке контролируется вольтметрами V1, V2, V3 с преобразованием мгновенных значений блоками RMS в действующие и выводом результатов измерений на дисплеи U A, U B, U C.

Для первого опыта были установлены следующие параметры нагрузки:

- фаза A: 10 кВт;
- фаза B: 18 кВт;
- фаза C: 25 кВт.

В первом опыте сопротивление нулевого проводника изменялось от начального значения 0,05 Ом (отношение сопротивления фазного проводника линии R_{lin} к сопротивлению нулевого проводника R_n равняется единице) до значения 0,005 Ом (отношение сопротивления фазного проводника линии R_{lin} к сопротивлению нулевого проводника R_n равняется десяти). Затем для каждого полученного значения рассчитывались разности напряжений между максимальным U_{max} и минимальным U_{min} значениями фазных напряжений в вольтах ΔU и процентах $\Delta U\%$:

$$U_{max} - U_{min} \quad (5)$$

$$\Delta U\% = \Delta U \cdot 100 / 220, \quad (6)$$

где 220 – значение номинального фазного напряжения.

Результаты

Результаты, полученные при работе компьютерной модели с активной нагрузкой фаз и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты моделирования при активной нагрузке

R _{lin} /R _n	U A, В	U B, В	U C, В	ΔU , В	$\Delta U\%$
1	220,1	215,9	212,2	7,9	3,6
2	219,0	215,9	213,3	5,7	2,6
3	218,6	215,9	213,7	4,9	2,2
4	218,4	216,0	213,9	4,5	2,0
5	218,2	216,0	214,0	4,2	1,9

6	218,2	216,0	214,1	4,1	1,9
10	218	216	214,2	3,8	1,7

Для второго опыта к активной нагрузке добавлялась индуктивная по величине равная активной. Результаты, полученные при работе компьютерной модели со смешанной нагрузкой фаз (равенство активной и реактивной нагрузки) и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.4.

Таблица 4

Результаты модерирования при равной активно-индуктивной нагрузке

Rlin/Rn	U A, В	U B, В	U C, В	ΔU , В	$\Delta U\%$
1	221,4	213,4	213,3	8,1	3,7
2	219,6	214,6	213,9	5,7	2,6
3	219	215	214	5,0	2,3
4	218,7	215,3	214,1	4,6	2,1

В третьем опыте мощность активной нагрузки была снижена до значения 0,3 от величины индуктивной нагрузки. Результаты, полученные при работе компьютерной модели со смешанной нагрузкой фаз (равенство активной и реактивной нагрузки) и проведении расчетов по формулам (5) и (6), приведены в табл.5.

Таблица 5

Результаты модерирования при активно-индуктивной нагрузке с преобладанием индуктивной

Rlin/Rn	U A, В	U B, В	U C, В	ΔU , В	$\Delta U\%$
1	221,7	215,7	218,9	6,0	2,7
2	220,5	217,1	218,6	3,4	1,5
3	220,1	217,6	218,5	2,5	1,1
4	219,9	217,9	218,4	2,0	0,9

Обсуждение

Проведем анализ полученных данных. При чисто активной нагрузке и при равной активно-индуктивной нагрузке снижение сопротивления нулевого провода в созданной компьютерной модели приводило к уменьшению неравномерности напряжений по фазам относительно медленно – от 3,6% до 2,0%, уменьшение сопротивления нулевого провода при этом происходило в четыре раза. При равной активно-индуктивной нагрузке снижение несимметрии напряжений происходило примерно в таких же пределах.

В случае преобладания индуктивной нагрузки снижение сопротивления нулевого проводника обеспечивало более быстрое уменьшение несимметрии напряжений. При изменении сопротивления нулевого проводника в четыре раза происходило снижение разности фазных напряжений от 2,7% до 0,9%. Поэтому такое мероприятие для снижения несимметрии напряжений в трехфазной электрической сети как уменьшение сопротивления нулевого проводника или увеличение его сечения целесообразно использовать в случаях, если нагрузка имеет преимущественно индуктивный характер.

Заключение

Цель, поставленная в данной статье, достигнута. Выполнено исследование на компьютерной модели, разработанной авторами, мероприятия по повышению качества электрической энергии при появлении несимметрии в электрической сети, состоящее в снижении сопротивления нулевого проводника при различном характере нагрузке сети – как чисто активном, так и смешанном (активно-индуктивном).

Приведенные результаты компьютерного моделирования режимов работы простейшей системы электроснабжения показывают возможность использования изменения сопротивления нулевого провода в трехфазной четырехпроводной электрической сети для снижения неравномерности напряжений по фазам этой сети, что приводит к уменьшению напряжения нулевой последовательности и в конечном итоге такого показателя качества электрической энергии как коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности. Также в ходе моделирования получены результаты, свидетельствующие о том, что данное мероприятие имеет более высокую эффективность при преобладании индуктивной нагрузки в составе потребителей электрической энергии.

Литература

1. Коверникова Л.И., Суднова В.В., Шамонов Р.Г. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.

2. Дед А.В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.
3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Грачева Е.И. и др. Моделирование спектров высших гармоник в системах электроснабжения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10. №3/4. С. 136-150.
4. Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 4. С. 54-59. doi: 10.17513/mjpf.12697
5. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Ларин О.М. Выявление источника фликера в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. №5. С. 3-12.
6. Антонов А.И., Денчик Ю.М., Зубанов Д.А., и др. Моделирование несимметричных режимов работы электрической сети и обработка результатов с помощью программы для ЭВМ // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 48–54. doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54.
7. Руди Д.Ю. Проблема качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 40–43. doi: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.
8. Дворкин Д.В., Силаев М.А., Тульский В.Н. и др. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии // Электричество. 2017. № 7. С. 12–19. doi: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.
9. Черепанов А.В., Тихомиров В.А., Куций А.П. Влияние несимметрии напряжений на энергоэффективность // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. №4 (56). С.207-217. doi: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217.
10. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Применение системы нечеткого вывода для оценки состояния изоляции кабельных линий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. №1 (49). С. 191-203.
11. Kleshchov A., Hugi C., Terentiev O. et al. Voltage asymmetry influence on resource consumption at power generating plants // Journal of Urban and Environmental Engineering. 2019. Vol. 13. pp. 219-227. doi: 10.4090/juee.2019.v13n2.219227.
12. Artemenko M.Yu., Batrak L.M., Polishchuk S.Y. Current filtering in a three-phase three-wire power system at asymmetric sinusoidal voltages // Electrical engineering & electromechanics. 2018, N2. pp. 63-68. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.11.
13. Vamvakari A., Kandianis A., Kladas A., et al. Analysis of supply voltage distortion effects on induction motor operation // IEEE Transactions on Energy Conversion: 2001. Vol. 16, N3. pp. 209-213. doi: 10.1109/60.937198.
14. Yalisho G. L. Investigation & Minimization of Loss in Distribution System // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2016. Vol. 5, N5. pp. 45-50. doi: 10.11648/j.epe.20160505.11
15. Allaev K. R., Musinova G. F. Analysis of power losses in phases in distribution networks at load imbalance // Universum. 2020. N6(75). pp. 65-70. doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75
16. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics. ICIEAM 2019: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 25-29 March 2019; Sochi, Russia: IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743089
17. Bellan D. Approximate circuit representation of voltage unbalance emission due to load asymmetry in three-phase power systems conference. GEMCCON 2018: Proceedings of the 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference; 7-9 Nov 2018; Stellenbosch, South Africa: IEEE; 2018. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628545
18. Суворов И.Ф., Романова В.В., Хромов С.В. Исследование влияния несимметрии фазных напряжений на режимы работы асинхронных двигателей в среде имитационного моделирования MATLAB/Simulink // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2016. №3. С. 72-83. doi: 10.14529/power160309
19. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. №2 (46). С. 61-67.
20. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения

// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 93–104. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-1-93-104.

21. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Larin O.M. Simulation of negative sequence voltage source determination in power supply systems. FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271409.

22. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Larin O.M. Asymmetry occurrence modeling in electrical supply systems. FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271179

23. Rozhkov V.V., Krutikov K.K., Trofimenko S.R. Analysis of Operation Features for the Auxiliary Transformers at Power Plants in Non-Symmetric Modes. ICIEAM 2021: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing; 7-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE; pp. 169-174. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446295.

24. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т.23. №3. С. 209-222. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222

25. Khatsevskiy K.V., Antonov A.I., Gonenko T.V. et al. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load. Dynamics 2017: Proceedings of the Dynamics of systems, mechanisms and machines, 14-16 Nov. 2017; Omsk, Russia: IEEE; pp. 1-4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239461.

26. Nenad A.M., Slobodan N.B., Jeroslav M.Ž. Application of Passive CL Filters for Neutralizing of Zero Sequence Currents and Correction of Asymmetries of Phase Voltages in Electrical Networks // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2017. Vol.9, N5. pp. 10-18. doi: 10.5815/ijisa.2017.05.02

27. Ciontea C.I., Iov F. A power study of load imbalance influence on quality assessment for distribution networks // Electricity. 2021, N2. pp. 77–90. doi: 10.3390/electricity2010005

28. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Simulation of the Higher Harmonics Source Determination in Power Supply Systems. ICIEAM 2021: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 17-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446458

29. Naumov I., Podyachikh S., Ivanov D. Efficiency of the balancing devices to power quality improve. SAHD 2021: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference “Modern Science: Problems and Development Prospects (Social and Humanitarian Directions)”; 26 April 2021. doi: 10.1051/shsconf/202110102012

30. Руди Д.Ю., Антонов А.И., Гоненко Т.В. и др. Методы снижения несимметрии напряжения в электрических сетях 0,4-10 кВ // ОНВ. 2018. №2 (158). doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-75-78

31. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85-92. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92

Авторы публикации

Бирюлин Владимир Иванович - канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Юго-Западного государственного университета.

Куделина Дарья Васильевна - канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения Юго-Западного государственного университета

References

1. Kovernikova LI, Sudnova VV, Shamonov RG. *Kachestvo elektricheskoy energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ih resheniyu*. Novosibirsk. Nauka; 2017. (in Russ.)

2. Ded AV, Sikorskiy SP, Smirnov PS. Results of measurements of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 2 (158):60–64. (in Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-60-64.

3. Biryulin VI, Kudelina DV, Gracheva EI et al. Modeling the spectra of higher harmonics in power supply systems. *Bulletin of the Southwest State University. Series: Management, computer technology, informatics. Medical instrumentation*. 2020; 10 (3/4): 136-150. (in Russ.)

4. Kharitonov YaS, Bebikhov YuV, Egorov AN. Comparison and analysis of the results of power quality control in power supply systems of mining enterprises. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019; 4: 54-59. doi:10.17513/mjpf.12697 (in Russ.)

5. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Identification of the source of flicker in power supply systems. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(5): 3-12. (in Russ.)
6. Antonov AI, Denchik YuM, Zubanov DA et al. Simulation of asymmetric modes of operation of an electrical network and processing of results using a computer program. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 2 (158): 48–54. (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-48-54.
7. Rudy DYU. The problem of power quality of ship power systems. *Omsk Scientific Bulletin*. 2018; 3 (159): 40–43. (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.
8. Dvorkin DV, Silaev MA, Tulsy VN et al. Problems of assessing the consumer's contribution to the distortion of the quality of electricity. *Electricity*. 2017; 7: 12–19. (in Russ.) doi: 10.24160/0013-5380-2017-7-12-19.
9. Cherepanov AV, Tikhomirov VA, Kutsiy AP. Influence of voltage asymmetry on energy efficiency. *Sovremennye tekhnologii. System analysis. Modeling*. 2017; 4 (56): 207-217. (in Russ.) doi: 10.26731/1813-9108.2017.4(56).207-217.
10. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Application of a fuzzy inference system to assess the state of insulation of cable lines. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021. V. 13. - No. 1 (49). - S. 191-203.
11. Kleshchov A, Hugi C, Terentiev O et al. Voltage asymmetry influence on resource consumption at power generating plants. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2019; 13: 219-227. doi: 10.4090/juee.2019.v13n2.219227.
12. Artemenko MYu, Batrak LM, Polishchuk SY. Current filtering in a three-phase three-wire power system at asymmetric sinusoidal voltages. *Electrical engineering & electromechanics*. 2018; 2: 63-68. doi: 10.20998/2074-272X.2018.2.11.
13. Vamvakari A, Kandianis A, Kladas A et al. Analysis of supply voltage distortion effects on induction motor operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2001; 16(3): 209-213. doi: 10.1109/60.937198.
14. Yalisho GL. Investigation & Minimization of Loss in Distribution System. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2016; 5(5): 45-50. doi:10.11648/j.epes.20160505.11
15. Allaev KR, Musinova GF. Analysis of power losses in phases in distribution networks at load imbalance. *Universum*. 2020; 6(75): 65-70. doi:10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75
16. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Modeling cable lines heating by currents of higher harmonics and interharmonics. *ICIEAM 2019: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; 25-29 March 2019; Sochi, Russia: IEEE*. doi:10.1109/ICIEAM.2019.8743089
17. Bellan D. Approximate circuit representation of voltage unbalance emission due to load asymmetry in three-phase power systems conference. *GEMCCON 2018: Proceedings of the 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference; 7-9 Nov 2018; Stellenbosch, South Africa: IEEE; 2018*. doi: 10.1109/GEMCCON.2018.8628545
18. Suvorov IF, Romanova VV, Khromov SV. Investigation of the effect of phase voltage asymmetry on the operating modes of asynchronous motors in the MATLAB/Simulink simulation environment. *Vestnik YuUrGU. Series: Energy*. 2016; 3: 72-83. (in Russ.) doi:10.14529/power160309
19. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Analysis of the heating of cable lines by currents of higher harmonics and interharmonics. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2020; 12, 2 (46): 61-67. (in Russ.)
20. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, Shakurova ZM. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of intraplant power supply. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(1): 93-104. (in Russ.) doi: 10.30724 / 1998-9903-2021-23-1-93-104.
21. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Simulation of negative sequence voltage source determination in power supply systems. *FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE*. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271409.
22. Biryulin VI, Kudelina DV, Larin OM. Asymmetry occurrence modeling in electrical supply systems. *FarEastCon 2020: Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies; 6-9 Oct. 2020; Vladivostok, Russia: IEEE*. doi:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271179
23. Rozhkov VV, Krutikov KK, Trofimenko SR. Analysis of Operation Features for the Auxiliary Transformers at Power Plants in Non-Symmetric Modes. *ICIEAM 2021: Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing; 7-21 May 2021; Sochi, Russia: IEEE; pp. 169-174*. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446295.
24. Rakhimov OS, Mirzoev DN, Gracheva EI. Experimental study of indicators of quality and losses of electricity in low-voltage rural electrical networks. *Proceedings of the higher*

educational institutions. *ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(3): 209-222. (In Russ) doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222

25. Khatsevskiy KV, Antonov AI, Gonenko TV et al. The voltage asymmetry in electrical networks with single-phase load. *Dynamics 2017: Proceedings of the Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 14-16 Nov. 2017; Omsk, Russia: IEEE; pp. 1-4. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239461.

26. Nenad AM, Slobodan NB, Jeroslav MZ. Application of Passive CL Filters for Neutralizing of Zero Sequence Currents and Correction of Asymmetries of Phase Voltages in Electrical Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2017; 9(5): 10-18. doi:10.5815/ijisa.2017.05.02

27. Ciontea CI, Iov F. A power study of load imbalance influence on quality assessment for distribution networks. *Electricity*. 2021; 2: 77–90. doi:10.3390/electricity2010005

28. Biryulin VI, Kudelina DV, Gorlov AN. Simulation of the Higher Harmonics Source Determination in Power Supply Systems. *ICIEAM 2021: Proceedings of the International conference on industrial engineering, applications and manufacturing; May 17-21, 2021; Sochi, Russia: IEEE*. doi:10.1109/ICIEAM51226.2021.9446458

29. Naumov I, Podyakhikh S, Ivanov D. Efficiency of the balancing devices to power quality improve. *SAHD 2021: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference "Modern Science: Problems and Development Prospects (Social and Humanitarian Directions)"*; April 26, 2021. doi: 10.1051/shsconf/202110102012

30. Rudi DYU, Antonov AI, Gonenko TV et al. Metody snizheniya nesimmetrii napryazheniya v elektricheskikh setyakh 0,4-10 kV. *ONV*. 2018. №2 (158). (in Russ.) doi: 10.25206/1813-8225-2018-158-75-78

31. Naumov AA. Ensuring the required quality of electrical energy. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(1): 85-92. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92

Authors of the publication

Vladimir I. Biryulin - cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Power supply», Southwest t State University.

Daria V. Kudelina - cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Power supply», Southwest State University

Получено

30.03.2022г.

Отредактировано

06.04.2022г.

Получено

20.04.2022г.



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СИММЕТРИРОВАНИЯ НАГРУЗОК В СЕТЯХ 0,4 КВ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКЕ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Лыу Куок Кыонг^{1,2}, А. М. Маклецов¹, А. Альзаккар^{1,3}, В. В. Максимов¹,
И.Ф. Галиев¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Факультет электротехники и электронной инженерии, Образовательный
технологический университет Нам Динь, Вьетнам

³Университет Аль-Баас, г. Хомс, Сирийская Арабская Республика

Lqcuong.nute@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблему несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ, вызывающие дополнительные потери электроэнергии. Особое внимание уделить сетям с преимущественно однофазными нагрузками, распределёнными вдоль линий 0,4 кВ. (сельские электрические сети). Произвести анализ методов симметрирования напряжений и нагрузок, как на этапе проектирования электрических сетей, так и в процессе их эксплуатации. Учесть, что даже при правильно спроектированной электрической сети с равномерным распределением однофазных нагрузок по фазам в процессе эксплуатации из-за случайного характера подключения новых нагрузок, включая кратковременные подключения, (например, новых бытовых электроприемников) токовые нагрузки становятся несимметричными. Особое внимание уделяется вопросу симметрирования токов нагрузок путем их переключения с наиболее нагруженных фаз на наименее нагруженные. Такие переключения производятся на опорах ЛЭП с использованием опыта оперативного персонала. Разработать алгоритм симметрирования токовых нагрузок с максимальным исключением человеческого фактора при симметрировании, использующий в качестве исходных данных показания интеллектуальных счетчиков электроэнергии. Основной идеей алгоритма является расчет режимов при возможных переключениях. МЕТОДЫ. Алгоритм, использующий предварительные расчеты возможных фазных переключений. При расчете режимов применялся метод Ньютона-Рафсона, реализованный средствами Матлаб. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрено влияние несимметрии на работу элементов электрической сети. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Приведены расчеты, обосновывающие основные положения алгоритма оптимизации фазных переключений для симметрирования токовых нагрузок.

Ключевые слова: симметрирование; нагрузка; целесообразность; несимметрия; алгоритм.

Благодарности: выражаем слова благодарности в адрес кандидата технических наук, доцента А. М. Маклецова за экспертные советы и поддержку на протяжении всей научно-исследовательской работы, а также кандидата технических наук, доцента В.В. Максимова за поддержку по лабораторной части настоящей статьи.

Для цитирования: Лыу Куок Кыонг, Маклецов А.М., Альзаккар А., Максимов В.В., Галиев И.Ф. Разработка алгоритма симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кв при распределенной нагрузке вдоль линии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 86-97. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR SYMMETRIZING LOADS IN NETWORKS OF 0.4 KV AT A DISTRIBUTED LOAD ALONG A LINE

Luu Quoc Cuong^{1,2}, AM. Makletsov¹, A. Alzakkar^{1,3}, VV. Maksimov¹, IF. Galiev¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Faculty of Electric and Electronic Engineering, Nam Dinh University Of Technology Education, Vietnam

³Al-Baath University, Homs, Syrian Arab Republic

Lqcuong.nute@gmail.com

Abstract: *PURPOSE.* Consider the problem of unbalance of loads in electrical 0.4 kV networks, causing additional losses of electricity. Particular attention should be paid to networks with predominantly single-phase loads distributed along 0.4 kV lines. (rural electrical networks). To analyze the methods of balancing voltages and loads, both at the stage of designing electrical networks, and during their operation. Keep in mind that even with a properly designed electrical network with a uniform distribution of single-phase loads by phases during operation, due to the random nature of connecting new loads, including short-term connections, (for example, new household electrical receivers), current loads become asymmetric. Particular attention is paid to the issue of balancing load currents by switching them from the most loaded phases to the least loaded ones. Such switching is carried out on power transmission towers using the experience of operating personnel. To develop an algorithm for balancing current loads with the maximum exclusion of the human factor during balancing, using the readings of smart electricity meters as input data. The main idea of the algorithm is the calculation of modes for possible switching. *METHODS.* An algorithm that uses preliminary calculations of possible phase switching. When calculating the modes, the Newton-Raphson method was used, implemented by Matlab program. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, considers the effect of asymmetry on the operation of electrical network elements. *CONCLUSION.* Calculations substantiating the main provisions of the phase switching optimization algorithm for balancing current loads are presented.

Key words: balancing; load; optimization; expediency; asymmetry; algorithm.

Acknowledgments: We express our gratitude to the Candidate of Technical Sciences, A.M.Makletsov for expert advice and support throughout the research work, as well as the Candidate of Technical Sciences, Professor V.V. Maximov for support in the laboratory part of this article.

For citation: Luu Quoc Cuong, Makletsov AM., Alzakkar A, Maksimov VV, Galiev IF. Development of an algorithm for symmetrizing loads in networks of 0.4 kV at a distributed load along a line. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):86-97. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-87-97.

Введение

В электрических 3-х фазных сетях при наличии однофазных нагрузок всегда присутствует их несимметрия, т.е. токи (мощности, напряжения) оказываются неодинаковыми в разных фазах.

Это объясняется непредсказуемым временем включения (отключения) отдельных потребителей (например, бытовых электроприемников).

Автор А.В. Дед [1] в своем исследовании рассмотрел, что коэффициенты несимметрии токов по обратной и нулевой последовательности могут достигать 30%.

Авторы К.Н. Fadhela и R.T. Abdulmuttalib [2] рассматривают влияние симметрирования нагрузки в системе распределения с использованием алгоритма эвристического поиска.

Авторы J.X. Zhu, M.Y. Chow и F. Zhang [3] представили исследования симметрирования фаз с использованием смешанно-целочисленного программирования. Авторы Ma Kang, Li Ran и Furong Li [4] исследовали оценку в масштабе предприятия дополнительных затрат на симметрирование из-за трехфазного дисбаланса с учетом тепловых ограничений.

Авторы А. Сердимов и И. Протосветский [5] представили средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. Представленным средством является симметрирующая обмотка для трехстержневого трансформатора. Указанная обмотка наматывается поверх всех трех стержней и в значительной мере компенсирует несимметрию напряжений. Минский трансформаторный завод осуществляет серийное производство таких трансформаторов мощностью до 160 КВА (серия ТМГсу). Трансформаторы такой мощности наиболее востребованы для сельских сетей с распределенной нагрузкой вдоль ЛЭП. Следует отметить, что рассматриваемые трансформаторы симметрируют фазные напряжения, но не токи, поэтому их применение лишь частично снимает вопрос увеличения потерь электроэнергии.

Авторы А.И. Орлов, С.В. Волков и А.А. Савельев [6] представили анализ влияния различных схем соединения фазных обмоток на показатели симметрии электрической сети. Авторы I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova [7] представили анализ мер по обеспечению качества электроэнергии симметрирующих трансформаторов 10/0,4 кВ.

Авторами А.И. Орлов, С.В. Волков [8] представлены исследования алгоритмов управления устройствами балансировки нагрузки в их групповой работе. Авторы А.М. Маклецов, И.Ф. Галиев, Р.И. Галиев и Лыу Куок Кыонг [9] представлены исследования по мониторингу несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. К. Mansouri, M. Ben Hamed, L. Sbity и M. Dhaoui [10] представлены исследования по трёхфазному симметрированию в интеллектуальных сетях распределения низкого напряжения с использованием изменения потока электрической нагрузки: «L.F.B.M.».

Симметрирование нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ производят как на стадии проектирования сетей, так и при их эксплуатации. На стадии проектирования стараются равномерно распределить прогнозируемые нагрузки по фазам. После включения ЛЭП в эксплуатацию производят замеры токовых нагрузок и вводят корректирующие симметрирующие переключения.

По мере изменения нагрузок такие переключения повторяются. В последнее время появилась возможность мониторинга нагрузок каждого потребителя (интеллектуальные счетчики электроэнергии с регистрацией профилей токов). В статье показано, что в качестве исходных данных для расчетов потерь электроэнергии необходимо использовать среднеквадратичные токи всех потребителей, распределенных вдоль ЛЭП за неделю, включая выходные дни.

Научная значимость результатов представленной работы определяется обоснованием порядка симметрирования (начиная с конца ЛЭП). На каждом этапе симметрирования расчет режимов определяется разработанной авторами программой для расчета потерь в четырехпроводной сети, использующей известный метод узловых напряжений и математическое моделирование в среде Матлаб (номер принятой заявки на регистрацию программы 2022618431 от 06.05.2022 г.). Расчеты проводились для ВЛ 0,4 кВ стандартной длины (600 метров, 15 опор).

Практическая значимость результатов работы определяется снижением времени симметрирования, осуществляемым оперативным персоналом за счет получения расчетных потерь электроэнергии при допустимых переключениях до производства реальных симметрирующих переключений.

В известной литературе исследованной авторами предлагаемый подход к решению задачи симметрирования нагрузок не рассмотрен.

Материалы и методы

Несимметрия нагрузок отрицательно сказывается на работе потребителей и электрической сети, в основном, по следующим причинам:

1. Наличие дополнительных потерь электроэнергии в нулевом проводе. При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе отсутствует;
2. Наличие дополнительных потерь в электродвигателях из-за появления вращающегося электрического поля обратного направления;
3. Наличие дополнительных потерь в трансформаторах из-за замыкания потоков нулевой последовательности через бак и крышку трансформатора;
4. Неодинаковая загрузка фаз ЛЭП. На рис. 1 представлены постоянные и неодинаковые суточные нагрузки трех фаз ($I_A=10A$; $I_B=9A$; $I_C=8A$) – режим 1 и средняя I_{cp} , если все три фазы нагружены одинаково – режим 2.

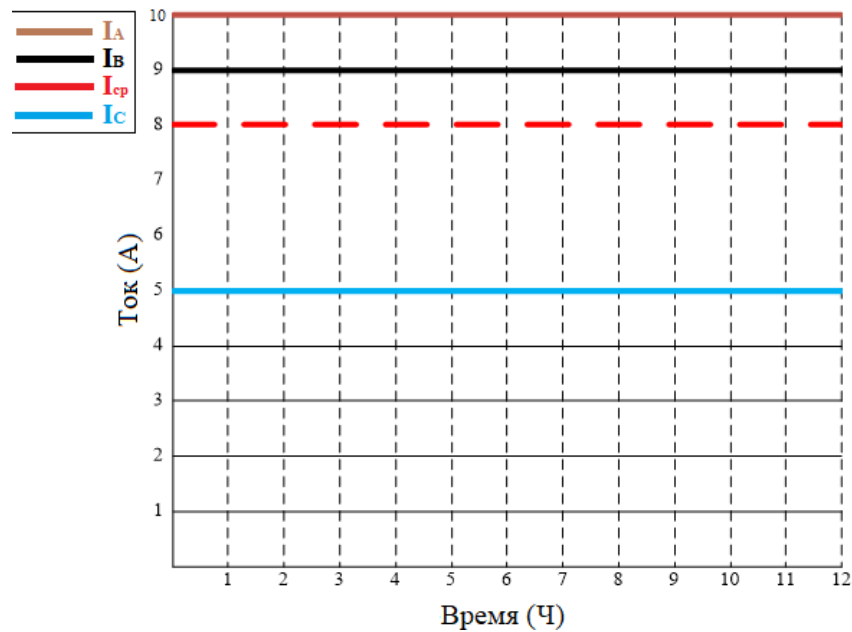


Рис.1. Фазные и средний токи линии.

Fig.1. Phase and middle current lines.

Следует отметить, что без учета потерь электроэнергии, передаваемая по ЛЭП в обоих режимах одинакова, если принять равенство:

$$I_{cp} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (1)$$

$$I_{cp} = 8 \text{ A}$$

Предположим, что активное сопротивление линии $R=1 \text{ } \Omega$ (для упрощения расчетов). Тогда потери мощности в ЛЭП при неодинаковых токах в фазных проводах:

$$\Delta P_n = I_A^2 \cdot R + I_B^2 \cdot R + I_C^2 \cdot R \quad (2)$$

$$\Delta P_n = 206 \text{ Вт}$$

В режиме 2 потери мощности:

$$\Delta P_{cp} = 3I_{cp}^2 \cdot R \quad (3)$$

$$\Delta P_{cp} = 192 \text{ Вт}$$

Неравенство $\Delta P_{cp} < \Delta P_n$ выполняется всегда, как и в случае выравнивания графиков нагрузки передающих элементов электрических сетей. Кроме увеличения потерь

электроэнергии несимметрия нагрузок ограничивает пропускную способность ЛЭП. Несимметрия напряжений усложняет также подключение к электрической сети распределенной генерации.

Дополнительные потери электроэнергии от несимметрии нагрузок могут составлять до 30% от общих потерь. Кроме того, несимметрия нагрузок может привести к недопустимому снижению напряжения сильно нагруженных фаз, регламентированном ГОСТ 32144-2013, что вызывает жалобы потребителей на качество электроэнергии. Финансовые риски в работу сетевых предприятий вносят обрывы нулевого провода при наличии несимметрии нагрузок.

Таким образом, симметрирование нагрузок сетей 0,4 кВ является актуальной задачей, что отражено и в руководящих документах электросетевых предприятий, например, РД «Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений» -мероприятие 1.10 «Выравнивание нагрузок фаз в электрических сетях 0,38 кВ». Однако задача симметрирования нагрузок оказывается достаточно сложной, решение которой требует новых методологических подходов и применения новых технических устройств [11, 12].

Определить наиболее нагруженную фазу во время контрольных замеров (6 раз в сутки, 2 раза в год) однозначно можно только при значительной разнице фазных токов [13, 14].

На рис.2 представлен пофазный суточный график нагрузки многоквартирного типового жилого дома в г. Казани. электроэнергии (RESURS UF) Анализ графика позволяет сделать следующие выводы: График был получен при суточном мониторинге нагрузок прибором для измерения показателей качества

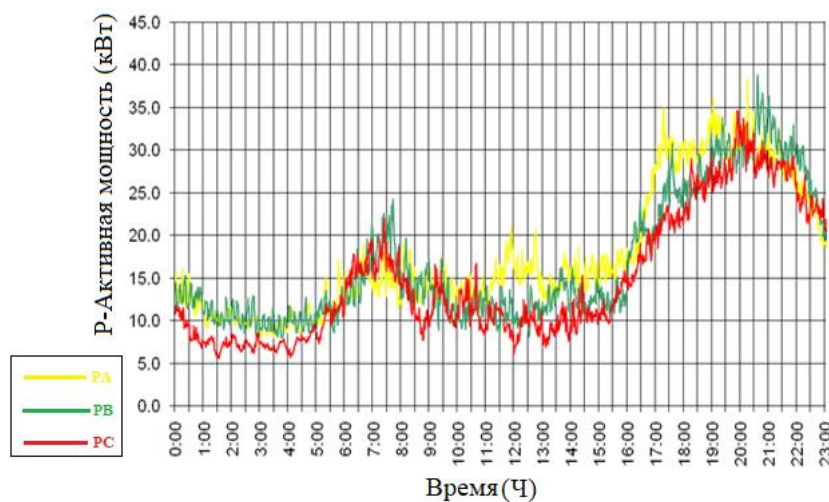


Рис.2. Пофазный суточный график нагрузки многоквартирного жилого дома Fig.2. Phase daily load schedule of apartment building

Анализ графика позволяет сделать следующие выводы: График был получен при суточном мониторинге нагрузок прибором для измерения показателей качества

1. Определить наиболее нагруженную фазу при использовании только результатов контрольных замеров
2. Оказывается, нецелесообразным определять относительные нагрузки фаз и с помощью интегрирующих приборов -интеллектуальных счетчиков электроэнергии, устанавливаемых у каждого потребителя.
3. В электрических сетях РТ установлено уже несколько тысяч таких счетчиков. При этом программное обеспечение высшего уровня позволит определить нагрузки фаз, пропорциональные потребленной за неделю электроэнергии с учетом выходных дней. Однако рассматриваемый подход оказывается неприемлемым из-за квадратичной

зависимости потерь мощности от тока. На рис.3 показан простейший пример нагрузок двух фаз А и В.

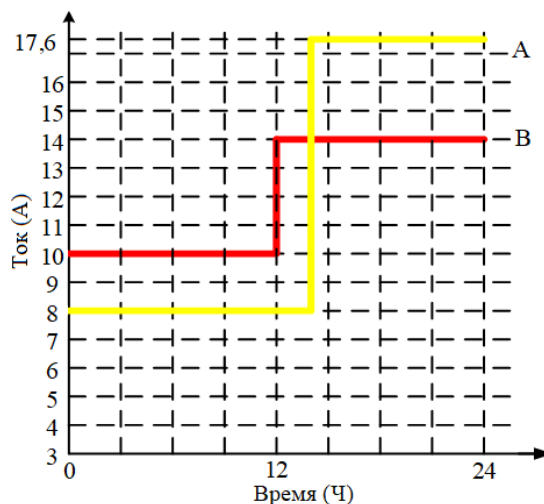


Рис.3. Нагрузки фазы А и В при разной степени загрузки в разное время. Fig.3. Load phases A and B at different loads at different times.

По этим фазам в течении суток передается одинаковое количество электроэнергии (площади графиков, очерченных ломаными кривыми, равны).

Из рисунке 3, Фаз (А):

$$\begin{aligned}\Delta P_A &= I_{A1}^2 \cdot t_{A1} + I_{A2}^2 \cdot t_{A2} \\ \Delta P_A &= 8^2 \times 12 + 17,6^2 \times 12 \\ \Delta P_A &= 3993,6 \text{ Вт}\end{aligned}\quad (4)$$

Из рисунке 3, Фаз (В):

$$\begin{aligned}\Delta P_B &= I_{B1}^2 \cdot t_{B1} + I_{B2}^2 \cdot t_{B2} \\ \Delta P_B &= 10^2 \times 12 + 14^2 \times 12 \\ \Delta P_B &= 3552 \text{ Вт}\end{aligned}\quad (5)$$

Однако, потери электроэнергии при условном сопротивлении проводов 1Ω в фазе А составляют 3993 Вт, а в фазе В-3552 Вт. Таким образом, нагружая менее нагруженную фазу, руководствуясь показаниями счетчиков электроэнергии за определенный период, имеется вероятность увеличения потерь электроэнергии. С учетом вышесказанного, для определения относительной загруженности фаз целесообразно использовать информацию о токах нагрузок, получаемую также от интеллектуальных счетчиков. При этом программное обеспечение будет определять относительные нагрузки фаз по среднеквадратичным токам.

Увеличение электромагнитной энергии, потребляемой бытовыми электроприемниками (двигатели, микроволновые печи) приводит к быстрому росту потребляемой реактивной мощности. На рисунке 4 представлено суточное потребление активной и реактивной мощности типового многоквартирного дома.

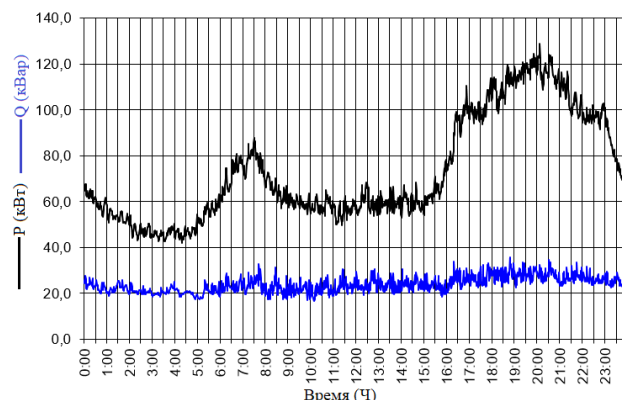


Рис. 4. Суточное потребление активной и реактивной мощности типового многоквартирного дома

Fig. 4. Daily consumption of active and reactive capacity of a typical apartment building

Следует отметить, что рост потребления реактивной мощности растет быстрее, чем активной. Причем потребление реактивной мощности также несимметрично. В то же время симметрирование реактивной нагрузки может быть осуществлено конденсаторами, уменьшающими потребление реактивной мощности, а значит, и потери электроэнергии от ее перетоков, что, очевидно, и будет исполняться по мере интеллектуализации электроэнергетических систем.

Для снижения влияния несимметрии нагрузок на потери электроэнергии и ее качество в электрических сетях наиболее часто применяется следующее:

1. Симметрирование режимов путем переключения оперативным персоналом нагрузок с наиболее загруженных фаз на менее загруженные;
2. Применение трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда зигзаг» (Y/Zn). Кроме симметрирования напряжений указанные трансформаторы увеличивают токи однофазных коротких замыканий, что повышает надежность работы сети.
3. Применение симметрирующих устройств, например, трансформаторов с симметрирующими обмотками (ТМГсу) [15].
4. Автоматические переключающие устройства мощности [16]. Указанные устройства при необходимости автоматически переключают часть нагрузки с одной фазы на другую. Однако указанные устройства либо имеют ограниченную мощность, недостаточную для выравнивания токов всей ЛЭП, либо требуют установки на каждой опоре, что требует значительных затрат.

Для оценки целесообразности симметрирования при отсутствии мониторинга измерений у потребителей ранее предлагалось использовать коэффициент добавочных потерь [17]. Однако указанная методика не учитывает характер распределения нагрузки вдоль ЛЭП и вносит в расчеты потерь существенную погрешность.

В настоящее время алгоритм симметрирования (выбора мест переключения нагрузок на другие фазы) основан исключительно на опыте оперативного персонала. Математически сформулировать задачу оптимизации симметрирования очень сложно из-за ступенчатости изменения токов по фазам при переключениях, например, нагрузка 5А переключается с фазы А на фазу С. При этом целевая функция – потери электроэнергии прерывиста и недифференцируема [18].

В данной работе предлагается алгоритм симметрирования с использованием мониторинга показаний счетчиков электроэнергии у каждого потребителя с частотой опроса 10 мин (ГОСТ 321144-2013).

Мониторинг счетчиков у потребителей и счетчиков в начала ЛЭП позволяет контролировать потребление электроэнергии, как с частотой 10 мин., так и интегрированные потери для определения среднеквадратичных токовых нагрузок фаз.

Для расчета потерь в четырехпроводной сети была разработана специальная программа, использующая известный метод узловых напряжений и математическое

моделирование в среде Матлаб (номер принятой заявки на регистрацию программы 2022618431 от 06.05.2022 г.). Расчеты проводились для ВЛ 0,4 кВ стандартной длины (600 метров, 15 опор) [19, 20].

На рисунке 5 приведены результаты расчетов с поочередным переносом несимметричной нагрузки ($I_a=2,99\text{ A}$, $I_b=1,27\text{ A}$, $I_c=0,84\text{ A}$) с опоры №15 до опоры №9.

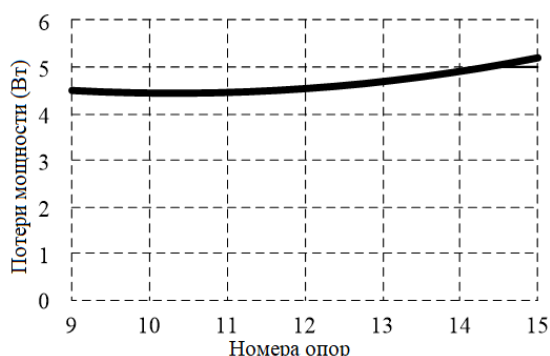


Рис.5. Потери мощности при наличии несимметричной нагрузки на разных опорах ЛЭП

Fig. 5. Power losses due to asymmetric load on different power transmission poles

Результаты

Расчеты показали, что чем ближе несимметричная нагрузка к концу ЛЭП, тем больший эффект дает симметрирование. Поэтому оперативному персоналу при выполнении операции симметрирования необходимо начинать ее с конца ЛЭП. Наличие постоянного мониторинга режима и возможность программного прогнозирования режимов при различных вариантах симметрирования также позволяют оперативному персоналу выбирать оптимальный вариант переключения фазных нагрузок.

На рис. 6 в качестве примера представлен участок схемы 4-х проводной электрической сети с тремя опорами. Именно переключениями на опорах (в точках отпуска электроэнергии) осуществляется симметрирование нагрузок оперативным персоналом.

На схеме цифрами обозначены значения токов нагрузок и суммарные токи фаз А, В, С ЛЭП. Наиболее нагруженной является фаза В. Для симметрирования необходимо часть нагрузки фазы В переключить на менее нагруженную фазу, например А. Так как симметрирование целесообразно начинать с конца ЛЭП, то в рассматриваемом примере предлагается сравнить два варианта переключения, показанные на схеме пунктирными стрелками 1 и 2. В первом случае на фазу А переключается токовая нагрузка 27,5 А, а во втором - 31,4 А. Разработанное программное обеспечение позволяет произвести эти переключения виртуально, а в полученных новых режимах определить величину потерь мощности.

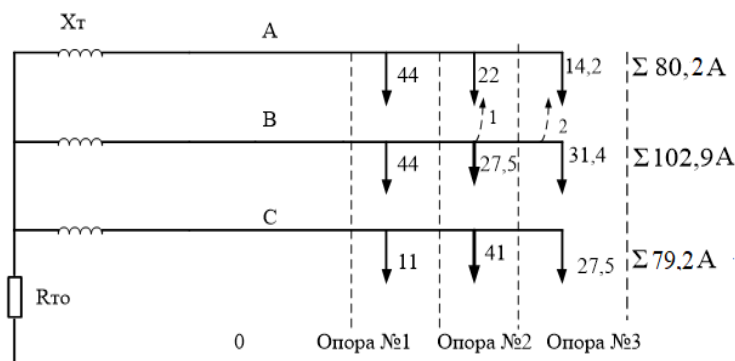


Рис.6. Симметрирование нагрузки.

Fig.6. Symmetrization of the load

В результате расчетов получено:

1. Потери мощности без симметрирования равны 6,84 Вт;

2. При симметрировании на опоре №2 – 4,78 Вт;

3. При симметрировании на опоре №3 – 2,72 Вт.

В рассматриваемом случае по критерию минимума потерь мощности симметрирование целесообразно проводить на опоре №2. Результаты расчетов расчетов зависят от места переключений и от переключаемых мощностей. Однако, в любом случае, расчетная оценка значимости возможных переключений существенно снизит трудоемкость симметрирования и повысит его эффективность.

Заключение

Полученные результаты работы позволяют предложить следующий алгоритм симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ:

1. По показателям токов счетчиков электроэнергии (за неделю) определить среднеквадратичные токовые нагрузки фаз. Информация о токах автоматически получается из комплекса «Пирамида»;

2. Начиная с конца ЛЭП, перебираются возможные варианты симметрирующих переключений;

3. При выборе вариантов используется опыт оперативного персонала. Возможен полный перебор вариантов для переключений на каждой опоре, или двух соседних опорах (такие переключения во многих случаях возможны)

4. Для выбранных вариантов с помощью разработанного программного обеспечения рассчитываются потери мощности;

5. Для каждой опоры определяется оптимальный с точки зрения потерь мощности вариант симметрирующих переключений.

Литература

1. Дед. А. В. К проблеме современного состояния уровней показателей несимметрии напряжений и токов в сетях 0,4 кВ // Омский научный вестник, Т. 20. № 2. 2014. 135 с.

2. K.H. Fadhela and R. T. Abdulmuttalib. Load Balancing in Distribution System Using Heuristic Search Algorithm // International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA), Wasit University, Kut, Iraq, 2018. P. 48-53.

3. J.X. Zhu, M.Y. Chow and F. Zhang. Phase Balancing using Mixed-Integer Programming // IEEE Transactions on Power Systems Vol 13. № 4, 1998. P. 1487-1492.

4. Ma Kang, Li Ran and Furong Li, Utility-scale estimation of additional reinforcement cost from three-phase imbalance considering thermal constraints // IEEE Transactions on Power Systems. 2017. V. 32. № 5. pp. 912–3923.

5. Сердимов А., Протосветский И. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство для стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ // Новости электротехники, № 1(31), 2005. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/14.php>.

6. Орлов А.И., Волков С.В. и Савельев А.А. Силовые трансформаторы 10(6)/0,4 кВ. Области применения разных схем соединения обмоток // Новости электротехники. 2006. № 5(41), [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/41/09.php>.

7. I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova, Power Quality Assurance with Balancing Transformers 10/0.4 kW // International Conference on Electro Technical Complexes and Systems (ICOECS), 2022, DOI: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657254.

8. Орлов А.И., Волков С.В. Сравнение алгоритмов управления устройствами выравнивания нагрузки при их групповой работе // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 93–101.

9. Маклецов А.М., Галиев И.Ф., Галиев Р.И., Лыу Куок Кыонг. Мониторинг несимметрии нагрузок в сетях 0,4 кВ. // Энергетик журнал. 2019. №5. С. 6-25.

10. M. Ben Hamed, L. Sbita и M. Dhaoui, Three-phase balancing in a LV distribution smart-grids using electrical load flow variation: “L.F.B.M.” // International Conference on

Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA) 2017 P. 427-431.

11. Валеев И.М., Альзаккар А. Гармоники и их влияние при определении метода компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Вестник Казанского технологического университета. 2020. № 12. С. 24-39.

12. Карчин В.В., Сидорова В.Т., Леухин А.Н. Улучшение показателей качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с помощью компенсации реактивной мощности // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2015. № 1-2. С. 61-67.

13. Альзаккар А., Местников Н.П., Валеев И.М. Анализ динамического воздействия электрического соединения на устойчивость угла ротора для синхронных генераторов в электроэнергетической системе Сирии // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 120-133.

14. Лыкин А.В., Уткин Е.А. Распределительные электрические сети 10/0,4 кВ с максимальным приближением трансформаторных подстанций к потребителям // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2019. Т. 2. № 3. С. 46-54.

15. Смолич Е., Журавлев В. Эксплуатация городских сетей // Новости электротехники. 2021. № 2(128). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2021/128-129/>.

16. Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети. // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 100-108.

17. Воротницкий В.Э., Железко Ю.С., Максимов В.М. РД 34.09.254 Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений // Разработано Всесоюзным научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ). 1986. 43 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cutt.us/gostovnet>.

18. Карчин В. В., Сидорова В.Т., Федотов А.И. Компенсация реактивной мощности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ для улучшения качества электроэнергии // Журнал Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2015. № 5-6. С. 101-106.

19. N. Mestnikov, A. Alzakkar, I. Valeev, V. Maksimov, Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W // International Russian Automation Conference, 2021. P. 404-408.

20. V. Ziryukin, R. Solopov, A. Usanov. The 0.4 kV Automatic Balancing Device Model // International Russian Automation Conference, 2021. P. 719-727.

Авторы публикации

Лыу Куок Кыонг – магистр техники и технологий, аспирант, преподаватель Института электроэнергетики «Казанский государственный энергетический университет», факультета электротехники и электронной инженерии, Образовательный технологический университет Нам Динь, Вьетнам. E-mail: Lqucong.nute@gmail.com

Маклецов Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: Mac.am@mail.ru.

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: Viktor.maksimov.1968@mail.ru.

Альзаккар Ахмад – магистр техники и технологий, аспирант, Казанский государственный энергетический университет. Преподаватель Университета Аль-Баас. E-mail: Ahmadalzakkar86@gmail.com.

Галиев Ильгиз Фанзиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: Esis.kgeu@bk.ru.

References

1. A.V. Ded, On the problem of the current state of the levels of indicators of asymmetry of voltages and currents in 0.4 kV networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014;20(2):135.
2. K.H. Fadhela and R. T. Abdulmuttalib, *Load Balancing in Distribution System Using Heuristic Search Algorithm, International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA)*. Wasit University, Kut, Iraq, (2018). pp. 48-53.
3. J.X. Zhu, M.Y. Chow and F. Zhang. *Phase Balancing using Mixed-Integer Programming*. IEEE Transactions on Power Systems. 1998;13(4):1487-1492.
4. Ma Kang, Li Ran and Furong Li, *Utility-scale estimation of additional reinforcement cost from three-phase imbalance considering thermal constraints*. IEEE Transactions on Power Systems. 2017;32(5):912–3923.
5. A. Serdimov, I. Protosvetsky, Balancing device for transformers. Means for voltage stabilization and loss reduction in 0.4 kV networks. *News of Electrical Engineering*. 2005. №. 1(31).[Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/14.php>.
6. A.I. Orlov, S.V. Volkov and A.A. Saveliev, silt transformers 10 (6) / 0.4 kV. Application areas of different winding connection schemes. *Electrical Engineering News*. 2006. No. 5(41). [Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/41/09.php>.
7. I. Maslov, G. Maslova, A. Ishalin и M. Novoselova, Power Quality Assurance with Balancing Transformers 10/0.4 Kw. *International Conference on Electro Technical Complexes and Systems*. (2022). doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657254.
8. A.I. Orlov, S.V. Volkov. Comparison of control algorithms for load balancing devices during their group work. *Bulletin of the Chuvash University*. 2018;3:93–101.
9. A. M. Makletsov, I. F. Galiev, R. I. Galiev, Luu Quoc Cuong, Monitoring of load unbalance in 0.4 kV networks. *Energetik Journal*. 2019;5:6-25.
10. M. Ben Hamed, L. Sbata и M. Dhaoui. *Three-phase balancing in a LV distribution smart-grids using electrical load flow variation: «L.F.B.M.»* International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering. (2017). P. 427-431.
11. I. M. Valeev, A. Alzakkar, Harmonicas and their Influence When Determining the Method of Compensation of Jet Power in Electrical Networks. *Vestnik of Kazan State Power Engineering University*. 202;12(1 (45):24-39.
12. V.V. Karchin, V.T. Sidorova, A.N. Leukhin. Improving the quality of electricity in rural distribution networks 0.4 kV using reactive power compensation. *Journal of Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;1-2:61-67.
13. A. Alzakkar, N. P. Mestnikov, F. Alhajj Hassan, I. M. Valeev. Analysis of the dynamic effect of the electrical interconnection on the stability of the rotor angle for synchronous generators in the electric power system of Syria. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(4):120-133.
14. A.V. Lykin, E.A. Utkin, Ower distribution networks with the maximal nearby location of transformer substations to consumers, *Journal of Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(3):46-54.
15. E. Smolich, V. Zhuravlev. Operation of urban networks. *News of electrical engineerin*, 2021;2(128). [Online]. Available: <http://www.news.elteh.ru/arh/2021/128-129/>.

16. A. Orlov, S. Volkov, A. Savelyev, Analysis of influence of load balancing unit on indicators of power supply unbalance, *Vestnik of the Chuvash University*. № 3. (2016). P. 100-108.
17. V.E. Vorotnitsky, Yu.S. Zhelezko, V.M. Maksimov. RD 34.09.254 *Instructions for reducing the technological consumption of electrical energy for transmission through electrical networks of power systems and power associations*. Developed by the All-Union Scientific Research Institute of Electric Power Industry. (1986). 43 p. [Online]. Available: <https://cutt.us/gostovnet>.
18. V.V. Karchin, V.T. Sidorova, A.I. Fedotov, Reactive power compensation in the village distribution networks 0,4 kv to improve power quality, *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;5-6:101-106.
19. N. Mestnikov, A. Alzakkar, I. Valeev, V. Maksimov, Assessment of the Performance of the Solar Power Plant with a Capacity 150W, International Russian Automation Conference, (2021). P. 404-408.
20. V. Ziryukin, R. Solopov, A. Usanov. The 0.4 kV Automatic Balancing Device Model, International Russian Automation Conference (2021). P. 719-727.

Authors of the publication

Luu Quoc Cuong – Kazan State Power Engineering University.

Aleksandr M. Makletsov – Kazan State Power Engineering University.

Akhmad Alzakkar – Kazan State Power Engineering University.

Victor V. Maksimov – Kazan State Power Engineering University.

Ilgiz. F. Galiev – Kazan State Power Engineering University.

Получено

25.03.2022г.

Отредактировано

14.04.2022г.

Принято

21.04.2022г.



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СУТОЧНОГО ГРАФИКА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ РАБОЧИХ ДНЕЙ С УЧЕТОМ МЕТЕОФАКТОРОВ ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ МОНГОЛИИ

А.Г. Русина., О. Тувшин., П.В. Матренин., Попов Н.С.

Новосибирский Государственный Технический Университет,
г. Новосибирск, Россия

Резюме: Особенностью энергосистемы является то, что все процессы производства, передачи и распределения происходят одновременно. Этот сложный и непрерывный процесс обеспечивается управлением режимами энергосистемы. Для оптимального управления режимами необходимо анализировать характеристику потребления электроэнергии и прогнозировать график нагрузки. Прогнозирование потребления позволяет оптимизировать распределение выработки и обеспечивать надежность энергосистемы. Хотя существует множество методологий прогнозирования, не существует методологии, подходящей для всех энергосистем. **ЦЕЛЬ.** Прогнозирование суточного графика нагрузки для рабочих дней с учетом влияния метеорологических факторов центральной энергосистемы Монголии. **МЕТОДЫ.** В работе использован метод, основанный на статистическом анализе. В качестве исходных данных использованы суточные графики нагрузки и данные о температуре и влажности наружного воздуха центральной энергосистемы, занимающей большую часть энергопотребления и выработки в Монголии, за 2021 год. Работа проведена с помощью MS Excel. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** По методу статистического анализа были построены суточные графики нагрузки с погрешностью 2,68%. После учета метеофакторов погрешность уменьшилась до 2,26%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использованный метод позволяет выполнять прогнозирование суточных графиков для рабочих дней. Многодневные периоды нерабочих дней, крупные аварии и плановые ремонты, ограничивающие потребление электроэнергии отрицательно влияют на точность прогнозирования.

Ключевые слова: прогнозирование; суточный график нагрузки; метеофакторы; энергосистема Монголии.

Для цитирования: Русина А.Г., Тувшин О., Матренин П.В. Попов Н.С. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 98-107. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-97-106.

FORECASTING THE DAILY ENERGY LOAD SCHEDULE OF WORKING DAYS USING METEOFACORS FOR THE CENTRAL POWER SYSTEM OF MONGOLIA

AG. Rusina, O. Tuvshin., PV. Matrenin PV, Popov NS.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. A feature of the power system is that all the processes of production, transmission and distribution occur simultaneously. This difficult and continuous process requires the management by the regime of the power system. For precise regime managements, it is necessary to study the characteristic of electricity consumption. Forecasting demand allows to optimize the distribution of generation and ensure the safety of the power system. Therefore, forecasting is given a lot of attention in the energy section. Although there are many forecasting methodologies, but there is no exact methodology that is suitable for all power systems. **PURPOSE.** To forecast the daily load schedule for working days, considering the influence of meteorological factors on the central energy system of Mongolia. **METHODS.** This study is carried out by the method of statistical analysis on MS Excel. As initial inputs historical data on load, temperature and outdoor air humidity of the central energy system were used, which has the most of the energy demand and

sources of Mongolia by 2021. RESULTS. According to the method of statistical analysis, daily load curves were constructed with an absolute percentage error of 2.68%. After adding into account of meteorological factors, the absolute percentage error decreased to 2.26%. CONCLUSIONS. This method corresponds to forecasting daily schedules for working days. By restricting the electricity consumption during long continues non-work days, days with a major accident and planned maintenance will affect negatively to the planned tendency.

Keywords: forecasting; daily load schedule; meteofactor; energysystem of Mongolia.

For citation: Rusina AG, Tuvshin O, Matrenin PV, Popov NS. Forecasting the daily energy load schedule of working days using meteofactors for the central power system of Mongolia. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):98-107. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-97-106.

Введение

Прогнозирование потребления электроэнергии является важнейшей задачей для обеспечения непрерывного процесса функционирования энергосистемы. Надежность энергоснабжения и экономическая эффективность наиболее зависят от точности прогнозирования. Чем выше точность прогнозирования, тем надежнее и эффективнее функционирует энергосистема. Из этого следует актуальность задачи прогнозирования электропотребления.

Потребление электроэнергии представляет собой случайный нестационарный процесс, которое состоит из множества отдельных компонентов [1]. Известно, что существует большое число переменных, влияющих на режим электропотребления и соответственно на качество его прогноза. Эти переменные имеют разный характер, например, явные и неявные (латентные), экзогенные (внесистемные) и эндогенные (внутрисистемные) [2]. Электропотребление, частота, потери мощности и перетоки относятся к явным эндогенным переменным. Метеорологические переменные и тип дня являются явными экзогенными переменными. В большинстве исследований доказано, что потребление зависит от многих факторов. Особенно из этих факторов выделяются метеорологические факторы, они оказывают значительное влияние на потребление.

Каждая энергосистема имеет свои особенности и не существует метода прогнозирования, дающего наилучший результат для всех энергосистем [3]. В настоящее время методология прогнозирования изучена многими учеными, и представлена в их работах [1, 4, 5, 6]. Эти методы можно разделить на две основные группы: классические методы и машинное обучение. Классические методы являются наиболее распространенными [5], к которым относятся аналитические, статистические и экспертные методы [7]. В настоящее время машинное обучение и искусственный интеллект сильно развиваются, основными видами машинного обучения в задачах прогнозирования электропотребления являются метод опорных векторов [8], нечеткая логика [9], нейронные сети [10, 11] и ансамблевые модели [11, 12].

Ванг и др [13] предложили модель использования метода опорных векторов для прогнозирования потребления электроэнергии в северном Китае. По их мнению, анализ и обработка исходных данных являются важнейшим этапом, который приводит к получению правильного результата. Нелинейные исходные данные преобразовали в линейные с использованием авторегрессии – скользящего среднего (ARIMA). На основе этого, итоговый результат сформировался с учетом сезонных факторов по методу опорных векторов. Н.И. Калантаевская и др [14] использовали нейронные сети для прогнозирования потребления электроэнергии в городе Петропавловске на сутки вперед. В качестве исходных данных были выбраны фактические данные о ретроспективной нагрузке за последние сутки и за этот же день прошлого года, а также температура воздуха и тип дня недели. Моделирование проводилось в программной среде *MATLAB* с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта. Средняя ошибка результатов полученных прогнозирования составила 2%. С помощью нечеткой логики [3] были построены графики нагрузки, отражающие влияние температуры, типа дня и времени года в Турции. В работе нечеткая логика сыграла роль вспомогательного инструмента для нейронных сетей.

Преимущества классических методов являются статистическая значимость, быстрое внедрение, распространенность и изученность. Они имеют некоторые недостатки, в том числе низкую эффективность при прогнозировании сложных временных рядов, зависимость от ненадежных предположений, ограниченную возможность использования

дополнительных переменных и чувствительность к искажениям [12]. Отличие машинного обучения состоит в том, что оно является более гибким чем классические методы и имеет возможность использования множества различных факторов. Однако, процесс их использования достаточно сложен.

В связи с расположением территорий Монголии потребление электроэнергии напрямую зависит от метеорологических факторов, в том числе от температуры и влажности наружного воздуха. Причем большая части потребления электроэнергии характеризуется хозяйственным потреблением, сильно реагирующим на изменение этих параметров. Отсюда следует, что при прогнозировании необходимо учитывать метеорологические факторы. Для энергосистемы Монголии в настоящее время прогнозирование электроэнергии выполняется эвристическом методом, основанным на анализе многолетней базы данных. Точность прогнозирования зависит от практических знаний и интуиции, что приводит к большим осложнениям в случаях малых изменений исходной информации. Более того, факторы, влияющие на потребление, отражаются в прогнозировании с помощью интуиции специалиста, в том числе метеорологические факторы. Таким образом, наблюдается недостатки существующей методики, в том числе чувствительность к небольшим изменениям, большой объем ручной работы, ограниченность дополнительной информации и зависимость от ненадежных предположений (ошибок прогнозом погоды). Внедрение математических автоматизированных методов и компьютерного моделирования станет значительным вкладом в развитие энергосистемы Монголии.

Методы исследования

Для получения данных исследования необходимо определить временный ряд проведения анализа, соответствующий дню прогнозирования. Каждый суточный график выбранного временного ряда должен сохранять свою аппроксимальную форму при изменении под действием внешних и/или внутренних факторов. Суточный график имеет два вида компонентов, включая регулярный и нерегулярный [15]. Регулярный компонент определяется путём усреднения значения суточного графика.

$$P_{\text{ср}}^{\Phi} = \frac{1}{24} \sum_{t=0}^{23} P_t$$

где P_t – потребляемая мощность каждого часа, $P_{\text{ср}}^{\Phi}$ – фактическая среднесуточная мощность.

Моделирование временных рядов позволяет определить тренд регулярных компонентов суточных графиков. Тренд рассчитывается как линейная регрессия наблюдаемых данных за последние 30 дней до прогнозного дня [16]. В качестве эмпирической функции использовалось линейное уравнение, которое выражает линейную взаимосвязь средней мощности за сутки от времени. По этому уравнению тренда получается средняя мощность прогнозного дня. Стоит отметить, что достоверность модели оценивается по статистическим критериям R^2 . Если $R^2 > 0,6$ то можно считать модель достоверной.

$$P_{\text{ст}} = ax + b$$

где $P_{\text{ст}}$ – среднесуточная мощность, x – номер дня, $a+b$ – коэффициенты.

Конфигурация суточного графика строится по средним арифметическим значениям мощности для каждого часа за ретроспективный период, исключая выходные и праздничные дни.

$$P_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ij}$$

где P_j – мощность в j -й час, N – число выборки ретроспективы.

Затем необходимо вычислить среднесуточную мощность получившегося графика по следующему уравнению.

$$P_{\text{ср}}' = \frac{1}{24} \sum_{j=0}^{23} P_j$$

где $P_{\text{ср}}'$ – среднесуточная мощность получившегося графика, P_j – мощность в j -й час.

Разделив значение каждого часа конфигурации на полученную среднесуточную мощность, график будет преобразованы в относительные единицы

$$P_j^{norm} = \frac{P_j}{P_{cp}}$$

где P_j^{norm} – мощность в j -й час в относительных единицах.

Для получения прогнозного графика нагрузки значения в относительных единицах необходимо умножить на среднюю мощность, которая получена из линейного уравнения.

$$P_{kj} = P_j^{norm} \cdot P_t$$

где P_{kj} – мощность в j -й час прогнозного графика, P_t – среднесуточная мощность, рассчитана по линейному уравнению.

При прогнозировании графика нагрузки, учёт максимальной и минимальной мощности является самой важной проблемой. Максимальная и минимальная мощность полученного графика заменились значениями, рассчитанными по линейному тренду от предыдущего периода. Отличие заключается в том, что расчет производился с исключением нетипичных дней, так как они искажают тренд.

$$P'_{k_{jmax}} = P_k^{max}; \quad P'_{k_{jmin}} = P_k^{min}$$

где j_{max} – номер час с максимальной мощностью, j_{min} – номер час с минимальной мощностью, P'_{kj} – мощность в j -й час прогнозного графика.

$$P'_{k_{jmax}} = P_k^{max}; \quad P'_{k_{jmin}} = P_k^{min}$$

где P_k^{max} – максимальная мощность, рассчитана по линейному тренду, P_k^{min} – минимальная мощность, рассчитана по линейному тренду.

Метеорологические факторы оказывают значительное влияние на потребление. Наиболее существенное влияние на потребление оказывает температура, влажность и освещенность. Учет влияния метеофакторов важен при формировании краткосрочных прогнозов. Оценка влияния метеофакторов на потребление осуществляется с помощью корреляционного и регрессионного анализа. Для оценки их влияния применяются так называемые коэффициент влияния. Они отражают линейную взаимосвязь отклонений нагрузки от регулярной составляющей и отклонений метеофакторов от регулярной компоненты на 1 единицу [15]. Уравнение коэффициента влияния выражается следующим соотношением. Умножив изменение метеофакторов на коэффициент влияния, можно получить поправки.

$$K = \frac{\left| \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sigma P_i \right|}{|M_{cp}|}$$

где N – количество выборки в ретроспективе, $|M_{cp}|$ – среднее значение метеофакторов ретроспективы, σP – нерегулярный компонент потребления (отклонение от среднесуточной мощности).

Колебания нагрузки значимо зависят от температуры нескольких прошедших суток. Вместе с тем достаточно использовать предыдущие двое суток. Зависимость нагрузки от температуры рассчитывается с учетом эквивалентной температуры, определяющейся следующим уравнением [15]. В данной работе весовые коэффициенты рассчитаны так: α_1 , α_2 , α_3 – весовые коэффициенты в летний период составляют 0.7, 0.2, 0.1, в зимний период – 0.5, 0.3, 0.2. $T_3(n) = \alpha_1 T(n) + \alpha_2 T(n-1) + \alpha_3 T(n-2)$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты, $T(n)$, $T(n-1)$, $T(n-2)$ – соответственно температуры в прогнозный день, вчерашний и т.д. дни.

Погрешность прогнозирования следует измерять с помощью средней по модулю ошибки (MAE – main absolute error) и средней по модулю ошибки в процентах (MAPE – main absolute percentage error), которые выражаются следующими уравнениями.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N |P_m - P'_m|$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left| \frac{P_m - P'_m}{P_m} \right| \cdot 100$$

где N – число часов в выборке, P'_m – значение прогноза мощности в m -й час, P_m – фактическое значение в m -й час.

Результаты эксперименты

В качестве исходных данных использованы суточные почасовые графики нагрузки и данные о температуре и влажности наружного воздуха центральной энергосистемы, занимающей большую часть энергопотребления и выработки в Монголии за 2021 год. На рис.1 представлена зависимость потребления от температуры наружного воздуха за 2021 год. На графике показаны сезонные циклы, на которых изображены зависимости потребления от температуры. Для оценки точности прогнозирования в каждом месяце года выбирался один рабочий день для прогнозирования, данные предыдущего месяца использовались в качестве входных данных для описанного выше алгоритма.

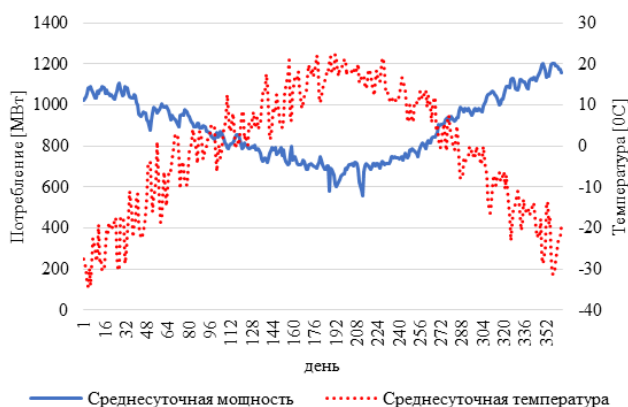


Рис. 1. График среднесуточного потребления и среднесуточной температуры за 2021 г.

Fig. 1. Curve of average demand and average temperature for 2021.

Построение графика нагрузки по тренду. Первым этапом прогнозирования является определение тренда по данным предыдущего месяца. В большинстве крупных энергосистем тренд искажается значениями нетиповых дней из-за того, что их график электропотребления формируется иначе, чем в рабочие дни. Поэтому, в работе отдельно выполнен анализ без учета выходных и праздничных дней и с их учетом. Для составления математической модели использован график, построенный по среднесуточным мощностям во временном ряде (пример для одного из дней показан на рис.2).

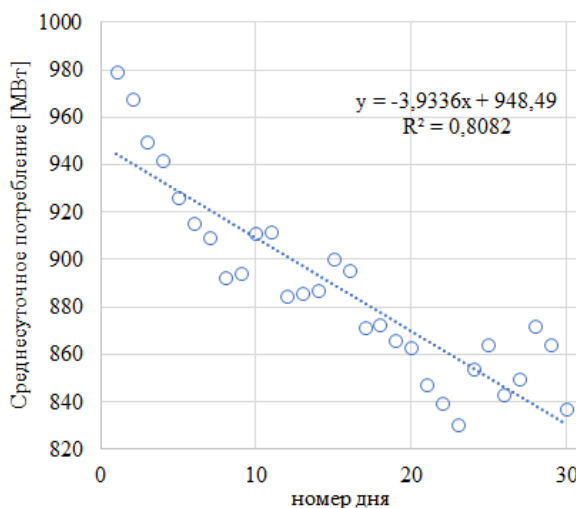


Рис. 1. График средней мощности сутки и тенденции за период с 18.03.2021 до 19.04.2021.

Fig. 2. Graph of average daily power and trend for the period from 03/18/2021 to 04/19/2021.

С помощью линейного уравнения, выражающего тренд, высчитана среднесуточная мощность прогнозного дня. Затем, по вышеуказанной методике сформирован почасовой график нагрузки прогнозного дня. Результаты показаны на таблице 1.

Средний коэффициент достоверности R^2 недостаточен для обоих случаев, хотя погрешность уменьшается если учитывать выходные и праздничные дни. Отсюда можно сделать вывод, что прогнозирование только по тенденции может привести к погрешности. Таким образом, для улучшения прогнозирования требуются некоторые поправки с учетом дополнительных факторов, влияющих на потребление.

Таблица 1

Результаты прогнозирования по тренду среднесуточной мощности

	С исключением нетипичных дней			Без исключения нетипичных дней		
	R^2	MAE [МВт]	MAPE [%]	R^2	MAE [МВт]	MAPE [%]
Январь	0,21	24,74	2,40	0,18	22,27	2,19
Февраль	0,0003	22,37	2,25	0,003	16,85	1,72
Март	0,11	31,18	3,10	0,03	32,37	3,61
Апрель	0,76	24,32	3,08	0,82	14,08	1,80
Май	0,36	28,19	4,01	0,44	26,81	3,79
Июнь	0,16	12,04	1,62	0,24	11,35	1,54
Июль	0,31	10,07	1,42	0,23	11,47	1,56
Август	0,3	35,53	4,67	0,03	19,69	2,87
Сентябрь	0,83	22,80	2,91	0,74	23,98	3,06
Октябрь	0,89	45,22	4,54	0,88	42,17	4,26
Ноябрь	0,67	22,43	2,25	0,54	20,24	2,05
Декабрь	0,67	33,71	2,75	0,57	46,72	3,81
Результат	0,43	26,05	2,92	0,39	24,00	2,68

В случаях построения тренда на данных, состоящих из большого числа выходных и праздничных дней, наблюдается высокая погрешность. Также анализ подтвердил, что если в используемые для построения тренда входят дни с крупными авариями и плановыми ремонтами, ограничившими потребление электроэнергии, то значительно ухудшается прогнозирование.

Поправки с учетом максимальной и минимальной мощности. При планировании работы энергосистем учёт максимальной и минимальной мощности является важным аспектом. Максимальная и минимальная мощность полученного графика нужно заменить значениями, рассчитанными по линейному тренду.

Таблица 2

Результаты прогнозирования с учетом макс/мин мощности

	С исключением нетипичных дней		Без исключения нетипичных дней	
	Без поправки	С учетом $R_{\max}/R_{\min}$	Без поправки	С учетом $R_{\max}/R_{\min}$
	MAPE [%]			
Январь	2,4	2,34	2,19	2,12
Февраль	2,25	2,18	1,72	1,64
Март	3,1	3,14	3,61	3,68
Апрель	3,08	2,94	1,8	1,71
Май	4,01	3,99	3,79	3,77
Июнь	1,62	1,69	1,54	1,61
Июль	1,42	1,57	1,56	1,57
Август	4,67	4,45	2,87	2,76
Сентябрь	2,91	2,24	3,06	3,00
Октябрь	4,54	4,48	4,26	4,20
Ноябрь	2,25	2,22	2,05	2,00
Декабрь	2,75	2,76	3,81	3,81
Средне	2,92	2,83	2,68	2,65

Из таблицы 2 видно, что после корректировки максимальной и минимальной мощности погрешность уменьшилась в обоих случаях. Так же, случаи без исключения нетипичных дней показывают лучший результат, подтверждая это как лучший выбор на прогнозировании для энергосистемы Монголии.

Поправки с учетом метеофакторов. На рисунке 3,4 графики показывают взаимосвязи между потреблением и метеофакторами, температурой (рис.3) и влажностью (рис.4).

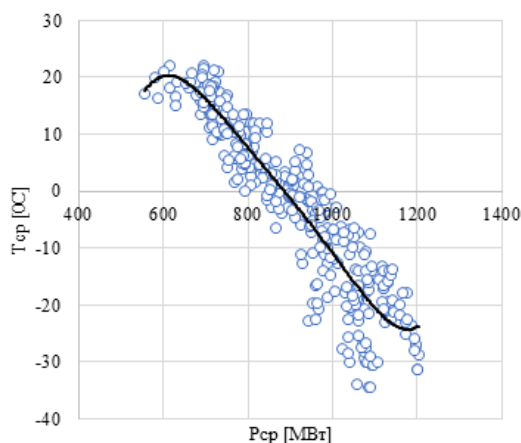


Рис. 2. График зависимости среднесуточного потребления от среднесуточной температуры.

Fig. 3. Graph of the dependence of the average daily consumption on the average daily temperature.

Взаимосвязь более подробно объясняется значением корреляционных коэффициентов, высчитанных на платформе Loginnom 6.5. Для температуры коэффициент корреляции равен $-0,92$, для влажности $0,25$ за 2021 года. Следует отметить, что при прогнозировании суточного графика для различных месяцев наблюдаются разные коэффициенты корреляции.

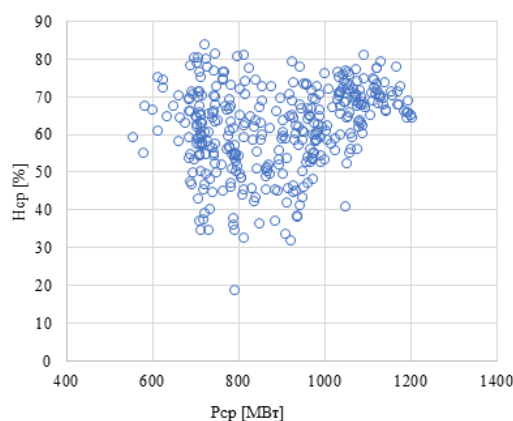


Рис. 3. График зависимости среднесуточного потребления от среднесуточной влажности.

Fig. 4. Graph of the dependence of the average daily consumption on the average daily humidity.

Это подтверждает, что необходимо учитывать метеофакторы при прогнозировании. Несмотря на то, что коэффициент корреляции между потреблением и влажностью показывает слабую связь, с точки зрения краткосрочных временных рядов имеется случай со значительно зависимостью.

Также определение зависимости между потреблением и метеофакторами было рассчитано по двум вариантам, в том числе с учетом нерабочих дней и без учета нерабочих дней

Таблица 3

Результаты прогнозирования с учетом метеофакторов				
	С исключением нетипичных дней		Без исключения нетипичных дней	
	При расчете зависимости между метеофакторами и потреблением			
	Без нерабочих дней	С нерабочими днями	Без нерабочих дней	С нерабочими днями
	MAPE [%]			
Январь	2,29	1,53	2,07	1,57
Февраль	1,84	1,92	1,58	1,59
Март	2,93	3,00	3,48	3,54
Апрель	2,83	2,64	1,42	1,46
Май	3.03	2.56	3.52	2.83

Июнь	1,68	1,67	1,64	1,66
Июль	1,52	1,50	1,36	1,42
Август	4,33	4,68	2,75	2,83
Сентябрь	2,10	2,16	2,80	2,89
Октябрь	3,53	3,61	3,65	3,76
Ноябрь	1,11	1,29	1,36	1,41
Декабрь	1,84	1,89	2,32	2,37
Результат	2,47	2,37	2,33	2,26

Результат в таблице 3 показывает, что наиболее точный прогноз получается с учетом всех дней ретроспективы при определении тренда и зависимости между потреблением и метеофакторами. В ходе проведения работы наблюдались некоторые случаи, что при большой разнице между среднесуточной и прогнозной температурой появится большая погрешность, которой ухудшилось качество прогнозирования. Для решения этого вопроса использовались метод весовых коэффициентов, соответствующих двум предыдущим суткам, считав запаздывание влияния температуры. Итоговые результаты приведены в Таблице 4 и на Рисунке 5.

Таблица 4

Итоговые Результаты

№	Варианты, проведенные эксперименты	Погрешность прогнозирования		
		MAE [МВт]	MAPE [%]	
1	Определение тренда без учета нерабочих дней	Без поправки	26,05	2,92
2		Учета минимальной и максимальной нагрузки	25,32	2,83
3		Учета метеофакторов при расчете исключения нерабочих дней	21,25	2,47
4		Учета метеофакторов по всем дням	20,62	2,37
5	Определение тренда с учетом нерабочих дней	Без поправки	24,00	2,68
6		Учета минимальной и максимальной нагрузки	23,85	2,65
7		Учета метеофакторов при расчете исключения нерабочих дней	20,70	2,33
8		Учета метеофакторов по всем дням	19,66	2,26

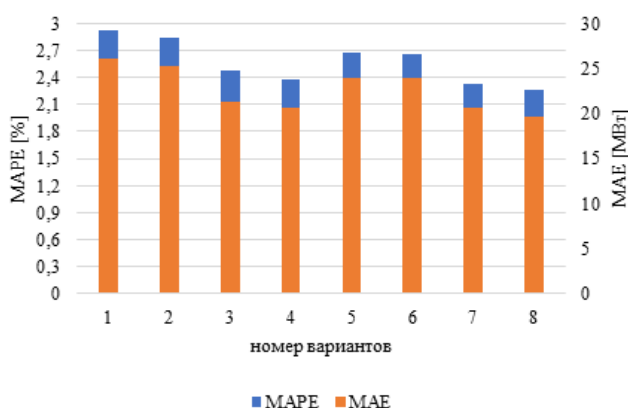


Рис. 4. Гистограмма итоговых результатов.

Fig. 5. Histogram of final results.

Вывод

В данной работе впервые применена методика прогнозирования почасового графика нагрузки с учетом рабочих и нерабочих дней, отдельного прогнозирования суточных минимумов и максимумов мощности и метеорологических факторов для центральной энергосистемы Монголии. Полученные результаты показывают, что базовый вариант без учета нерабочих дней, поправки на минимальную и максимальную мощность и метеофакторы дал погрешность 2,92%. После введения нерабочих дней в расчет тренда, погрешность уменьшилась до 2,68%. Поправки на максимальную и минимальную мощность снизили погрешность до 2,65 %, поправки на метеофакторы до 2,47 %. Комплексное использование всех указанных модификаций привело к уменьшению ошибки

до 2,26%. Таким образом, снижение ошибки составило 0,66 п.п или 22%. Можно сделать вывод, что для энергосистемы Монголии при прогнозировании графика нагрузки рабочих дней необходимо учитывать данные всех дней предыдущего месяца ретроспективы (кроме учета максимальной и минимальной мощности), чтобы получить правильный тренд. В ходе вычислительного эксперимента были обнаружены следующие два недостатка. Многодневные нерабочие периоды, крупные аварии и плановые ремонты, ограничивающие потребление электроэнергии отрицательно влияют на определение тренда. В связи с этим значительно уменьшается точность прогнозирования. При учете поправки на метеофакторы, если среднее значение поправки на метеофакторы меньше 1, то данная поправка не учитывается.

Литература

1. Alfares H.K., Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods // International journal of systems science. 2002. Т. 33. №. 1. С. 23–34.
2. Русина А.Г. и др. ГЭС: Искусство управления. 2019.
3. Çevik H.H., Çunkaş M. Short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS // Neural Computing and Applications. 2015. Т. 26. №. 6. С. 1355–1367.
4. Ghalekhondabi I. et al. An overview of energy demand forecasting methods published in 2005–2015 // Energy Systems. 2017. №. 2. С. 411–447.
5. Абдурахманов А.М. и др. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. №. 1. С. 3–23.
6. Patel H, Shah M. Energy Consumption and Price Forecasting Through Data-Driven Analysis Methods: A Review // SN Computer Science. 2021. Т. 2. №. 4. С. 1-16.
7. Филиппова Т.А., Русина А.Г., Дронова Ю.В. Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электроэнергетических систем. 2009. Новосибирск.
8. Vinagre E. et al. Electrical energy consumption forecast using support vector machines // 2016 27th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA). IEEE. 2016. С. 171-175.
9. Sadaei H.J. et al. Short-term load forecasting by using a combined method of convolutional neural networks and fuzzy time series // Energy. 2019. Т. 175. С. 365-377.
10. Fernandes K.C. et al. Electric load analysis and forecasting using artificial neural networks // 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE. 2019. С. 1274-1278.
11. Антоненков Д.В., Матренин П.В. Исследование ансамблевых и нейросетевых методов машинного обучения в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления горных предприятий // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №. 3 (52). С. 57-65.
12. Alobaidi M.H, Chebana F, Meguid M.A. Robust ensemble learning framework for day – ahead forecasting of household based energy consumption // Applied energy. 2018. Т. 212. С. 997–1012.
13. Wang J. et al. A trend fixed on firstly and seasonal adjustment model combined with the ε -SVR for short-term forecasting of electricity demand // Energy Policy. 2009. Т. 37. №. 11. С. 4901–4909.
14. Калантаевская.Н.И., Латыпов С.И., Кошеков К.Т. Модель организации данных и процесса обучения нейронной сети при построении графиков нагрузки на сутки вперед // Алматынского университета энергетики и связи. 2019. Т. 3. С. 11.
15. Макоклюев Б.И. и др. Влияние метеофакторов на режимы потребления электроэнергии энергосистем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 2015. №. 65. С. 405-414.
16. Tepedino C. et al. A forecasting model based on time series analysis applied to electrical energy consumption // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2015. Т. 9. С. 432-445.

Авторы публикации

Осгонбаатар Тувшин – аспирант, Новосибирский государственный технический университет. Email: o.tuvshin.21@gmail.com.

Русина Анастасия Георгиевна – д-р техн. наук, декан факультета энергетики, Новосибирский государственный технический университет. Email: anastasiarusina@gmail.com.

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Email: pavel.matrenin@gmail.com.

Попов Никита Сергеевич – ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Новосибирский государственный технический университет. Email: n.popov@corp.nstu.ru.

References

1. Alfares HK, Nazeeruddin M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. *International journal of systems science*, 2002;33(1):23-34.
2. Rusina AG. et al. *HPP: The art of control engineering*. 2019.
3. Çevik HH, Çunkaş M. Short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS. *Neural Computing and Applications*, 2015;26(6):1355-1367.
4. Ghalekhondabi I. et al. An overview of energy demand forecasting methods published in 2005–2015. *Energy Systems*. 2017;2:411-447.
5. Abdurahmanov AM. et al. Forecasting methods in electricity distribution networks (review). *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2016;3(1):3-23.
6. Patel H, Shah M. Energy Consumption and Price Forecasting Through Data-Driven Analysis Methods: A Review. *SN Computer Science*, 2021;2(4):1-16.
7. Filippova TA, Rusina AG, Dronova YuV. *Models and methods for forecasting electrical energy and power in controlling the regimes of energy systems*, 2009.
8. Vinagre E. et al. Electrical energy consumption forecast using support vector machines. 2016 27th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA). *IEEE*, 2016, pp. 171-175.
9. Sadaei HJ. et al. Short-term load forecasting by using a combined method of convolutional neural networks and fuzzy time series. *Energy*. 2019;175:365-377.
10. Fernandes KC. et al. Electric load analysis and forecasting using artificial neural networks. 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). *IEEE*. 2019, pp. 1274-1278.
11. Antonenkov DV, Matrenin PV. Ensemble and Neural Network Machine Learning Models for Short-Term Load Forecasting of Open Cast Mining Companies. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021;3(52):57-65.
12. Alobaidi MH, Chebana F, Meguid M. A. Robust ensemble learning framework for day – ahead forecasting of household based energy consumption. *Applied energy*. 2018;212:997-1012.
13. Wang J. et al. A trend fixed on firstly and seasonal adjustment model combined with the ε -SVR for short-term forecasting of electricity demand. *Energy Policy*. 2009;37(11):4901-4909.
14. Kalantayevskaya NN, et al. Neural network when constructing schedules of loading for the day forward. *Energy and communication in University of Almata*. 2019;3(11).
15. Makoklyuev BI, et al. Effect of meteorological factors on energy consumption of power systems. *Methodological problems in reliability study of large energy systems*. 2015;65(405-414).
16. Tepedino C. et al. A forecasting model based on time series analysis applied to electrical energy consumption. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. 2015;9:432-445.

Authors of the publication

Osgonbaatar Tuvshin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: o.tuvshin.21@gmail.com.

Anastasia G. Rusina – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: anastasiarusina@gmail.com.

Pavel V. Matrenin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: pavel.matrenin@gmail.com.

Nikita S. Popov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: n.popov@corp.nstu.ru.

Получено

29.03.2022г.

Отредактировано

13.04.2022г.

Принято

15.04.2022г.



НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ

А.В. Синюков¹, Т.В. Синюкова¹, Е.И. Грачева², Michal Kolcun³

¹Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Technical University of Kosice.

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка и анализ систем управления для механизмов перемещения грузов, не содержащих в своей структуре датчик скорости. Использование интеллектуальных устройств при реализации бездатчиковых систем управления. Исследование предлагаемых решений в системах замкнутого типа с целью выявления наиболее оптимального варианта, обеспечивающего наилучшие показатели по предъявляемым критериям, в данном случае – точности отработки скорости. МЕТОДЫ. Добиться поставленных целей возможно за счет использования математического моделирования, осуществляемого в среде имитационного моделирования Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. При исследовании производился анализ систем содержащих в своей структуре наблюдатели скорости разного рода. Устойчивость работы рассматриваемых наблюдателей оценивалась с учетом внешних возмущающих воздействий – рассмотрен режим межвиткового замыкания. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование систем управления, не имеющих в своей структуре датчиков, востребовано на механизмах, установленных в помещениях с небольшой площадью, на объектах с повышенными температурами окружающей среды и при ее повышенном загрязнении. При исследовании осуществлялось сравнение систем с датчиком скорости, системы, содержащей неадаптивный наблюдатель и систем с нейросетевыми наблюдателями. Оптимальные показатели были получены в системе, содержащей нейроконтроллер NARMA-L2. Предложена совмещенная структура, содержащая несколько нейрорегуляторов, которые обучаются на динамические параметры двигателя и отслеживаемые опасные режимы, которые могут возникнуть в динамике.

Ключевые слова: Нейронная сеть; контроллер; имитационное моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 108-118. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-107-118.

NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN CONTROL SYSTEMS OF CARGO MOVEMENT MECHANISMS

AV. Sinyukov¹, TV. Sinyukova¹, EI. Gracheva², Michal Kolcun³

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Technical University of Kosice.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Development and analysis of control systems for cargo movement mechanisms that do not contain a speed sensor in their structure. The use of intelligent devices in the implementation of sensorless control systems. The study of the proposed solutions in closed-type systems in order to identify the most optimal option that provides the best performance according to the criteria, in this case, the accuracy of speed testing. METHODS. It is possible to achieve these goals through the use of mathematical modeling carried out in the

Matlab Simulink simulation environment. RESULTS. In the study, the analysis of systems containing various kinds of velocity observers in their structure was carried out. The stability of the work of the observers under consideration was evaluated taking into account external disturbing influences – the inter-turn closure mode was considered. CONCLUSION. The use of control systems that do not have sensors in their structure is in demand on mechanisms installed in rooms with a small area, on objects with elevated ambient temperatures and with increased pollution. The study compared systems with a speed sensor, a system containing a non-adaptive observer and systems with neural network observers. Optimal indicators were obtained in a system containing a NARMA-L2 neurocontroller. A combined structure is proposed containing several neuroregulators that are trained for dynamic engine parameters and monitored dangerous modes that may occur in dynamics..

Keywords: Neural network; controller; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.

For citation: Sinyukov AV., Sinyukova TV, Gracheva EI. Neural network technologies in control systems of cargo movement mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):107-118. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-107-118.

Введение

К работе оборудования, задействованного в ответственном технологическом процессе, предъявляются повышенные требования с позиций надежности, так как данный параметр влияет на обеспечение безотказного функционирования всего процесса производства. Избежать простой оборудования, связанный с необходимостью проведения ремонтных работ возможно за счет отказа от датчиков скорости в пользу бездатчиковых систем управления [1], реализация которых возможна как на базе неадаптивных наблюдателей, так и с применением нейроконтроллеров.

На механизмах перемещения грузов устанавливаются как двигатели постоянного тока, так и двигатели переменного тока. Наибольшее применение в последнее время получили двигатели переменного тока, которые показали себя, при использовании правильно выбранной системы управления, по динамическим показателям не хуже двигателей постоянного тока. Значительным преимуществом двигателей переменного тока являются меньшие, по сравнению с двигателем постоянного тока, габаритные размеры, отсутствие элементов, нуждающихся в постоянном контроле и обслуживании [2, 3].

В качестве систем управления, позволяющих получить характеристики схожие с двигателями постоянного тока, наиболее хорошо себя зарекомендовали частотно-регулируемые системы, представителями которых являются скалярные [4, 5] и векторные [6, 7] методы управления. Для исследования выбрана векторная система управления, в связи с простотой ее реализации из-за отсутствия сложного математического аппарата характерного для скалярной системы управления.

Бездатчиковые системы управления находят широкое применение благодаря относительной простоте реализации и повышенной точности определяемых показателей. Существует несколько методов, позволяющих реализовать бездатчиковые методы нахождения значения скорости:

- в основе лежит математический аппарат, основанный на данных о значениях напряжения статора, тока статора, определяемых путем измерения этих величин в частотном преобразователе и данных, полученных на основе расчетов [8, 9];
- адаптивный наблюдатель базируется на использовании блока адаптации, назначение которого заключается в снижении рассогласования выходных параметров блоков, реализующих эталонную и адаптивную модель [10, 11];
- наблюдатель, учитывающий конструктивные особенности двигателя. Определение скорости, базирующееся на законах нейронных сетей, дает хорошие результаты за счет робастности системы, применимости на сложных динамических объектах, точности определения параметров [12];
- наблюдатель, в основе которого лежат законы нейронных цепей [13].

Качественная работа бездатчиковой системы управления электрическим двигателем напрямую связана с типом используемого наблюдателя, точностью определенных и измеренных параметров. Для дальнейшего исследования в системах управления механизмами перемещения груза выбраны неадаптивный тип наблюдателя и наблюдатель, в основе работы которого лежат нейросетевые технологии [14, 15].

Материалы и методы. Система, содержащая неадаптивный наблюдатель

Работа данного типа наблюдателя базируется на вычислительных операциях, в которых исходными параметрами являются значения, полученные на основании математического описания асинхронного двигателя в системе координат, являющейся неподвижной.

Система управления электродвигателем перемещения груза, содержащая неадаптивный наблюдатель, в виде структурной схемы представлена на рисунке 1.

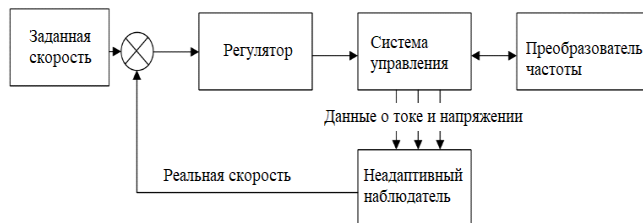


Рис. 1. Система с неадаптивным наблюдателем

Fig. 1. A system with an unadaptive observer

Адекватность работы рассматриваемого типа наблюдателя была проверена путем имитационного моделирования в среде *Matlab Simulink*, при анализе полученные в системе с неадаптивным наблюдателем показатели сравнивались с данными, выданными системой, имеющей в своей структуре датчик скорости. Результаты моделирования отражены на рисунках 2 и 3.

Графики скорости и момента показывают хорошую работоспособность предлагаемой системы. При моделировании наблюдаются небольшие расхождения между характеристиками, полученными в системе с датчиком скорости на валу двигателя и в системе, содержащей неадаптивный наблюдатель скорости.

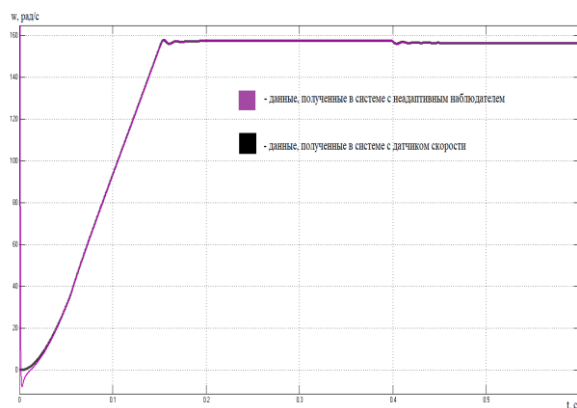


Рис. 2. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах

Fig.2. Characteristics showing the nature of velocity formation in the studied system

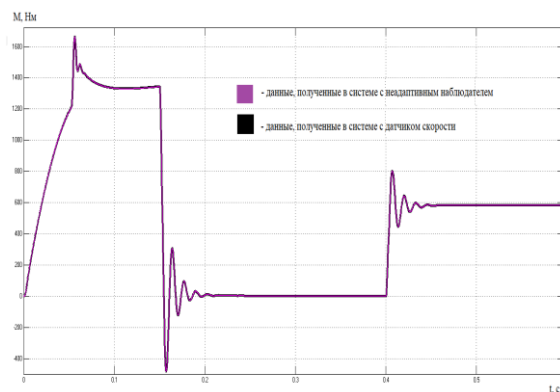


Рис. 3. Характеристики, показывающие интенсивность формирования момента в исследуемых системах

Fig. 3. Characteristics showing the nature of the moment formation in the studied systems

Система с неадаптивным наблюдателем скорости, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Для исследования поведение наблюдателя в режиме межвиткового замыкания статорных обмоток в исходной модели двигателя осуществлялись корректировки значений индуктивности статора L_s и индуктивности намагничивания L_m . Схема системы управления электродвигателем, содержащая неадаптивный наблюдатель скорости приведена на рисунке 4. Полученные в среде *Matlab Simulink* характеристики показаны на рисунке 5, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 1.

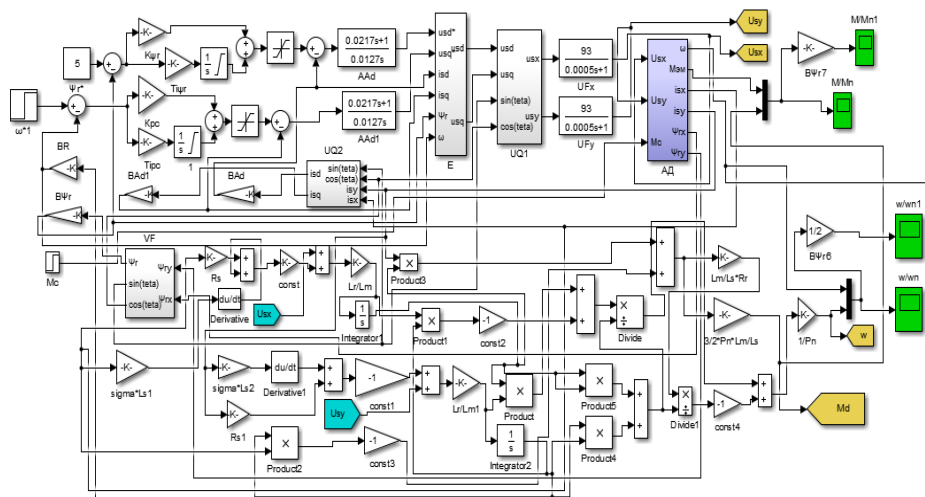


Рис. 4. Модель системы управления двигателем, содержащая неадаптивный наблюдатель в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.4. A model of the motor control system containing a non-adaptive observer in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

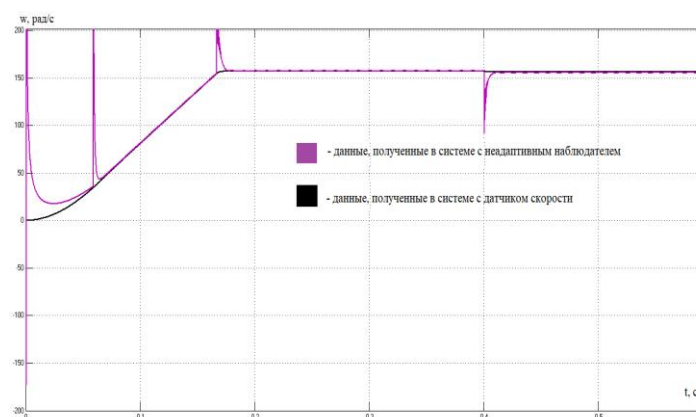


Рис. 5. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.5. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Таблица 1

Зависимость отклонения скорости от изменения индуктивности

$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	0,26
0,02241	0,023232	0,33
0,021165	0,022748	0,4
0,01992	0,022264	0,6

Полученная характеристика скорости в системе с неадаптивным наблюдателем свидетельствует о присутствии колебаний. Отклонение скорости увеличивается с уменьшением индуктивности статора.

Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе NARMA-L2 Controller, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Применение нейронной сети в качестве наблюдателя скорости позволяет осуществлять процесс обучения при поиске решения с прогнозированием будущих событий. Реализация нейроконтроллера происходила на базе *NARMA-L2 Controller*. Данный тип контроллера позволяет перестраивать нейросетевые модели объекта управления с минимальными затратами памяти процессора на осуществление вычислений. Работа контроллера заключается в преобразовании динамики нелинейных систем в линейную динамику путем устранения нелинейностей. Разработка наблюдателя осуществляется поэтапно:

- задается массив данных, базирующихся на исходной модели;
- определяется нейросетевая архитектура наблюдателя;
- при обучении нейросети необходимо выполнить соответствующие настройки обучающих данных, численность циклов обучения, осуществить генерирование обучающей выборки;
- выполнить обучение нейросети – данный процесс является завершающим при создании нейроконтроллера типа *NARMA-L2*.

Математическая модель предлагаемой системы в среде *Matlab Simulink* представлена на рисунке 6.

Результаты имитационного моделирования отражены на рисунке 7. Как и в предыдущем исследовании устойчивое состояние наблюдателя исследовалось в режиме межвиткового замыкания, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 2.

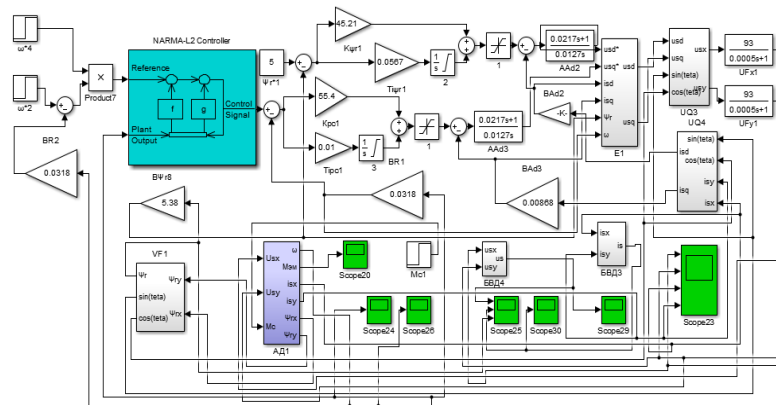


Рис. 6. Модель системы управления двигателем, содержащая наблюдатель *NARMA-L2* в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора.

Fig. 6. A model of the engine control system containing the *NARMA-L2* observer in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

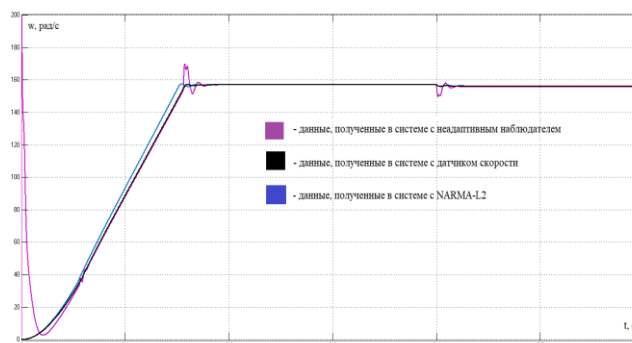


Рис. 7. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.7. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Анализ переходных процессов, позволяет сделать вывод о качественном улучшении полученных характеристик. Удалось избавиться от неустойчивого состояния скоростной характеристики, наблюдавшегося при использовании неадаптивного

наблюдателя, установившийся режим характеризуется хорошей точностью отработки наблюдателя.

Таблица 2

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
L_s , Гн	L_m , Гн	Δw , %
0,023655	0,023716	$2,6 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$3 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$4 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$6,2 \cdot 10^{-4}$

Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе Predictive, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Данный тип наблюдателя функционирует на базе прогнозирующих моделей, работающих на основе нейронных сетей. Модель позволяет предсказывать реакцию объекта на входные сигналы с целью поиска наиболее оптимального варианта управления.

Архитектура эталонного управления нейронной моделью использует две нейронные сети: сеть контроллера и сеть модели установки. Сначала идентифицируется модель установки, а затем контроллер обучается таким образом, чтобы выходные данные установки соответствовали выходным данным эталонной модели. Процесс создания нейроконтроллера данного типа происходит поэтапно: обучение эталонного контроллера модели; обучение сети – осуществляется посегментно, до тех пор, пока весь обучающий диапазон не будет предоставлен сети. Система, содержащая нейроконтроллер *Predictive Controller*, представлена на рисунке 8.

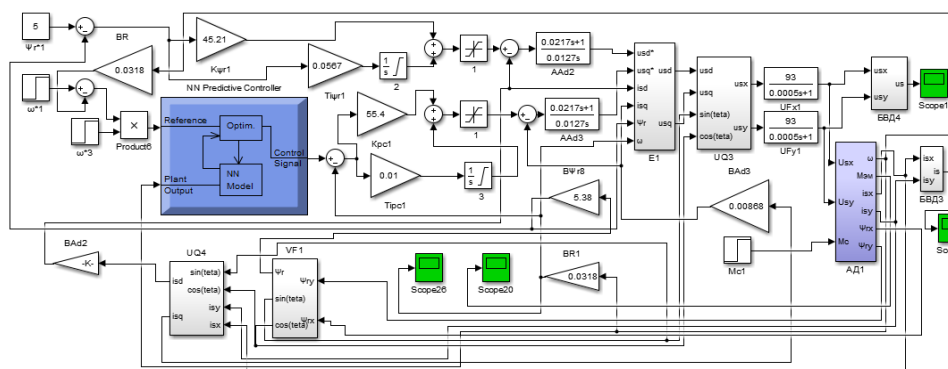


Рис. 8. Модель системы управления двигателем, содержащая *Predictive Controller* в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig. 8. A model of the motor control system containing a *Predictive Controller* in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Устойчивость наблюдателя проверялась путем имитационного моделирования, полученные результаты отражены на рисунке 9.

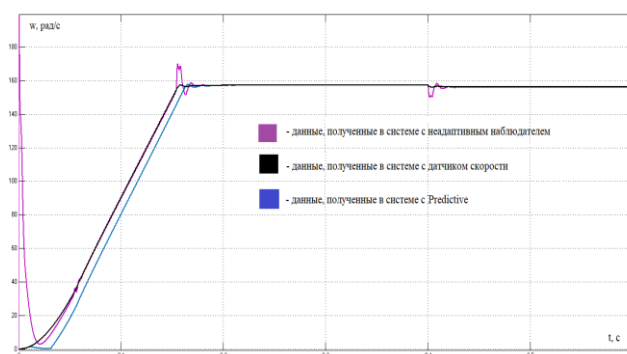


Рис. 9. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.9. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблице 3.

Таблица 3

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	$2,3 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$2,35 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$3 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$5,2 \cdot 10^{-4}$

Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе Model Reference Controller, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Model Reference Controller представляет адаптивный тип управления с эталонной моделью, где архитектура эталонного управления нейронной моделью использует две нейронные сети: сеть контроллера и сеть модели установки. Сначала идентифицируется модель установки, а затем контроллер обучается таким образом, чтобы выходные данные установки соответствовали выходным данным эталонной модели. Каждая сеть состоит из двух слоев, при реализации нейроконтроллера возможен выбор количество нейронов для использования в скрытых слоях. Внедрение Model Reference Controller в систему управления асинхронным двигателем представлено на рисунке 10.

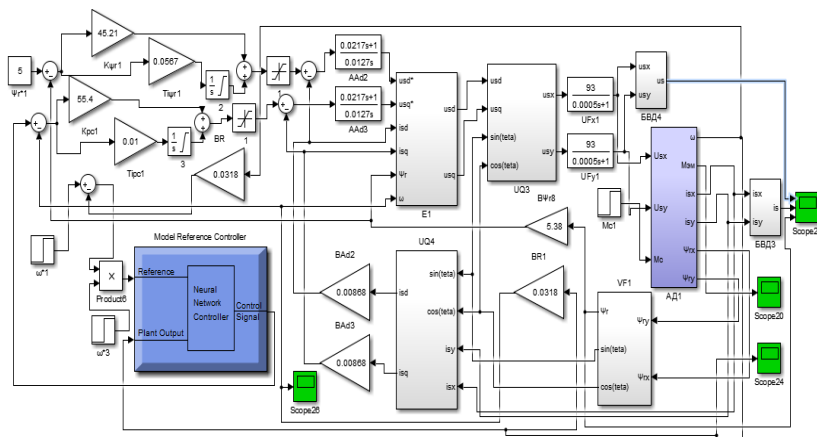


Рис.10. Модель системы управления двигателем, содержащая Reference Controller в среде Matlab Simulink, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig. 10. A model of the motor control system containing a Reference Controller in the Matlab Simulink environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Как и в предыдущих исследованиях была проверена устойчивость рассматриваемого типа нейросетевого наблюдателя, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 4, полученные результаты отражены на рисунке 11.

Таблица 4

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	$1,9 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$2 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$2,9 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$4,5 \cdot 10^{-4}$

Анализ приведенных на рисунке 11 характеристик позволяет сделать вывод о довольно устойчивой работе данного типа нейросетевого наблюдателя, не смотря на некоторое расхождение полученного сигнала скорости с показателями с датчика скорости.

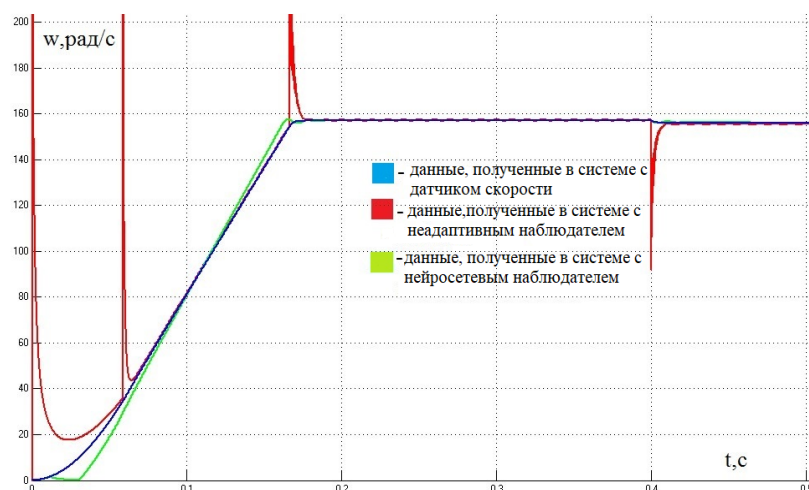


Рис. 11. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.11. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Результаты и Обсуждение

Хорошие результаты при моделировании показала система содержащая нейросетевой контроллер NARMA-L2. Соответственно дальнейшее исследование целесообразно производить с использованием данного нероконтроллера.

Внедряемая в разных сферах концепция аутсорсинга производственных мощностей, реализуется посредством датчиков особого назначения с беспроводной передачей снимаемых данных и шлюза, осуществляющего сбор и передачу данных в облачное пространство, где происходит их обработка с применением машинного обучения, позволяет использовать рассмотренные наблюдатели, как носители функций разного рода, сопоставимых с интеллектуальными датчиками. Функциональная схема предлагаемой системы, содержащей несколько нейронных структур с разными исходными данными: отклонение нагрева обмоток [16], точность отработки скорости, аномалии параметров обмоток двигателя (межвитковое замыкание обмоток), используемыми для обучения, показана на рисунке 12. В системе адаптации происходит корректировка работы наблюдателя, путем переключения между нейтоконтроллерами, базируясь на необходимости корректировки того или иного, из заложенных в нейроструктуре параметров.

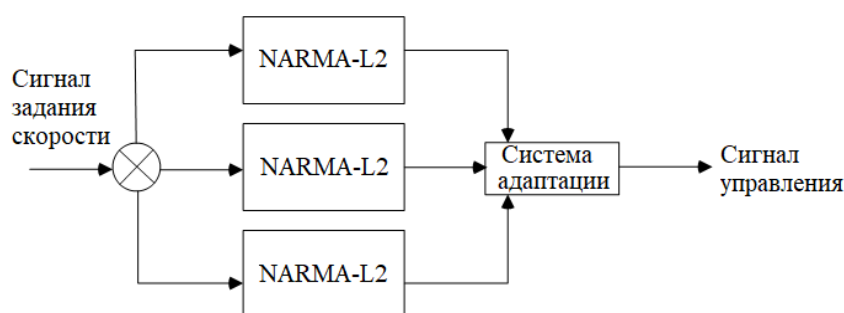


Рис.12. Система, содержащая несколько нейросетевых наблюдателей

Fig. 12. A system containing several neural network observers

Проведем имитационный режим межвитковых замыканий, являющийся самый опасным для электрического двигателя, в динамике. Для этого в режиме межвитковых замыканий осуществим резкое изменение индуктивности статора и взаимной индуктивности, результаты показаны на рисунке 13.

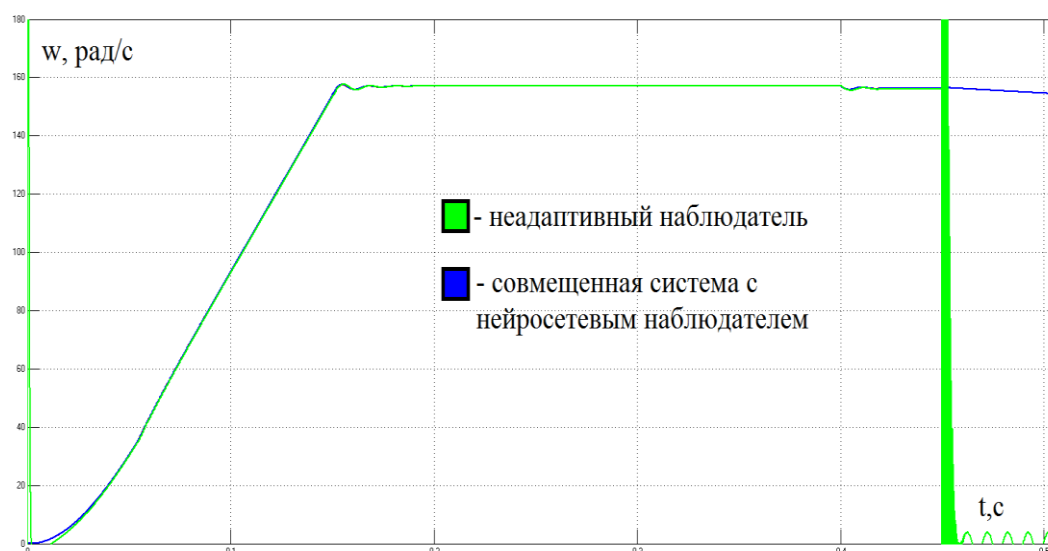


Рис.13. Формирование скорости

Fig. 13. Speed formation

Необходимо отметить, что предлагаемая модель является базовой, так как ядро системы позволяет дополнять систему нейрорегуляторами, которые будут обучены на необходимые отслеживаемые аварийные режимы и контролируемые параметры.

Выводы

Применение нейросетевых технологий при создании наблюдателей скорости привело к качественному улучшению их функционирования, позволило исключить статическую ошибку и нестабильность в работе, колебательный характер переходных процессов, присущий традиционным математическим аппаратам.

Нейроконтроллеры позволяют осуществлять компенсацию неучтенных внешних воздействий, приводящих к появлению возмущений в системе управления.

Предлагаемая структура системы управления, содержащая несколько нейроконтроллеров, позволит учитывать изменения параметров двигателя в процессе его работы и реагировать на появление аварийных режимов.

Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) на основании договора №17227ГУ/2021 от 22 декабря 2021 года.

Литература

1. Скляр А.В., Чижма С.Н., Чегодаев Ф.В. Бездатчиковый контроль частоты вращения ротора асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. Т. 60. № 1. С.14-19.
2. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. – 2019. №3. С. 33-37.
3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O.. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
4. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылев А.В., Плотников Ю.В., Поляков В.Н., Эрман Г.З., Антонов Д.Л. Энергетическая эффективность законов скалярного частотного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. – 2012. № 9. С. 44-47.
5. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И., Хабаров А.И. Оптимизация асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления // Электротехника. – 2012. № 9. С. 25а-29.
6. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Boikov A., Mukhametzhanov R. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed

Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.

7. Даденков Д.А., Солоцкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С. 117-128.

8. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2012. № 1. С. 2-7.

9. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.

10. Bedioui N., Houimli R., Besbes M. Adaptive observer design for sensor fault detection and reconstruction // Mechatronics, Automation, Control. - 2019. Т. 20. № 9. С. 515-523.

11. Вдовин В.В., Панкратов В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия томского политехнического университета. - 2012. Т. 320. № 4. С. 147-153.

12. Ланграф С.В., Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечетким регулятором // Известия Томского политехнического университета. - 2010. Т. 316. №4. С. 168-173.

13. Козлова Л.Е. Принцип построения архитектуры нейроэмулятора угловой скорости электропривода по схеме ТРН – АД // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. - 2015 №1(58). С. 161-170.

14. Saihi L., Bouter A. Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer // 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). - 2016. P. 48-57. 7804294.

15. Deenadayalan, A. Position Sensorless Sliding Mode Observer with Sigmoid Function for Brushless DC Motor // Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APT). - August 2012. - P. 1-6. 6302028.

16. Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Kolcun M. Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2021 г. Т. 23. № 6. С. 87-98.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – аспирант кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: stw0411@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Michal Kolcun – professor, Technical University of Kosice.

References

1. Sklyar AV, Chizhma SN, Chegodaev FV. Sensorless control of the rotor speed of an asynchronous motor. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2017;60(1):14-19.

2. Kozyaruk AE. Modern efficient electric drives of production and transport mechanisms. *Electrical engineering*. 2019;3:33-37.

3. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems*. E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.

4. Braslavsky IYa, Ishmatov ZSh, Kostylev AV, et al. Energy efficiency of the laws of scalar frequency control of asynchronous electric drive. *Electrical Engineering*. 2012;9:44-47.

5. Schreiner RT, Kostylev AV, Shilin SI, et al. Optimization of asynchronous frequency-controlled electric drive with scalar control system. *Electrical engineering*. 2012;9:25a-29.
6. Meshcheryakov V, Sinykova T, Sinyukov A, et al. *Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor*. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
7. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.
8. Afanasyev KS, Glazyrin AS. Application of the extended Kalman filter to improve parametric robustness of a sensorless asynchronous electric drive. *Electrotechnical complexes and control systems*. 2012;1:2-7.
9. Ning ZM, Demkin V, Lin YH, et al. *Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system*. In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. Pp. 2591-2594.
10. Bedioui N, Houimli R, Besbes M. Adaptive observer design for sensor fault detection and reconstruction. *Mechatronics, Automation, Control*. 2019;20(9):515-523.
11. Vdovin VV, Pankratov VV. Synthesis of an adaptive observer of coordinates of a sensorless asynchronous electric drive. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2012;320(4):147-153.
12. Langraf SV, Sapozhnikov AI, Glazyrin AS, et al. Dynamics of an electric drive with a fuzzy controller. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2010;316(4):168-173.
13. Kozlova LE. The principle of constructing the architecture of the neuroemulator of the angular velocity of an electric drive according to the TRN – AD scheme. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2015;1(58):161-170.
14. Saihi L, Boutera A. *Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer*. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). 2016. P. 48-57. 7804294.
15. Deenadayalan A. Position Sensorless Sliding Mode Observer with Sigmoid Function for Brushless DC Motor. *Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APT)*. August 2012. P. 1-6. 6302028.
16. Sinyukov AV, Sinyukova TV, Gracheva EI, et al. Optimized sensorless control systems for cargo movement mechanisms. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(6):87-98.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Michal Kolcun – professor, Technical University of Kosice.

Получено 26.03.2022г.

Отредактировано 14.04.2022г.

Принято 15.04.2022г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.315

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-2-119-131

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА

Р.Р. Хуснутдинов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8371-1497>

khrr@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследовать возможность использования лабораторной консоли ядерного магнитного резонанса в качестве прибора для обнаружения поддельных лекарственных препаратов. Проблема обнаружения поддельных и контрафактных лекарственных препаратов в настоящее время стоит очень остро. Рассмотреть потенциал применения метода радиоспектроскопии ядерного квадрупольного резонанса для определения подлинности и контроля качества лекарственных препаратов неразрушающим способом. **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Метод ядерного магнитного резонанса входит в перечень физико-химических методов используемых в фармакопии. Спектроскопия ядерного квадрупольного резонанса, являясь схожей по физическим принципам, имеет свои достоинства и преимущества, что в целом позволит усилить контроль подлинности и качества лекарственных препаратов. **МЕТОДЫ.** Приведена теория ядерного квадрупольного резонанса и особенности позволяющие исследовать лекарственные препараты. Описывая конструкцию этого аппаратно-программного комплекса на основе спектрометра ядерного квадрупольного резонанса Apollo Redstone, даны описание его узлов, характеристики и параметры, отдельное внимание уделено разработке датчика для аппаратно-программного комплекса и системе его согласования со спектрометром. Подробно описаны его радиотехнические характеристики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье показаны результаты использования аппаратно программного комплекса – проведены измерения спектров ядерного квадрупольного резонанса для лекарственного препарата парацетамол, разработанного различными производителями, как России так и зарубежными фармацевтическими компаниями. Показана возможность измерения спектральных характеристик непосредственно в упаковке. Приведены необходимые многоимпульсные серии импульсов, применявшиеся при измерении спектральных характеристик. Показана возможность получения сигналов спинного эха с хорошим отношением сигнал/шум и также возможность различения по форме линии спектров парацетамола различных производителей в зависимости от формы выпуска. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показана принципиальная возможность создания на основе данного метода компактных и портативных приборов для неразрушающей идентификации лекарственных препаратов.

Ключевые слова: ядерный квадрупольный резонанс; качество лекарств; неразрушающий контроль; повышение чувствительности; поиск поддельных лекарств.

Для цитирования: Хуснутдинов Р.Р. Аппаратно-программный комплекс для определения подлинности лекарственных препаратов методом ядерного квадрупольного резонанса //

HARDWARE AND PROGRAM SYSTEM FOR DETERMINATION OF AUTHENTICITY OF MEDICINES BY NUCLEAR QUADRUPOLE RESONANCE METHOD

RR. Khusnutdinov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8371-1497>, khrr@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Study the possibility of using a laboratory nuclear magnetic resonance console as a device for detecting counterfeit medicines. The problem of detecting counterfeit and counterfeit medicines is now very acute. Consider the potential of applying the nuclear quadrupole resonance radiospectroscopy method to determine the authenticity and quality of medicines by non-destructive means. *ACTUALITY.* The nuclear magnetic resonance method is included in the list of physico-chemical methods used in pharmacopoeia. The spectroscopy of nuclear quadrupole resonance, being similar in physical principles, has its advantages and advantages, which in general will strengthen the control of the authenticity and quality of medicines. *METHODS.* The theory of nuclear quadrupole resonance and features that allow to investigate medicinal preparations is resulted. The structural design of this hardware and software complex based on the Apollo Redstone nuclear quadrupole resonance spectrometer is described, its nodes are described, characteristics and parameters are given, a special attention is paid to the development of the sensor for the hardware the software complex and its coordination system with the spectrometer. Detailed description of its radio technical characteristics. *RESULTS.* The article shows the results of using the hardware software complex - measurements of spectra of nuclear quadrupole resonance for the drug paracetamol developed by various manufacturers, both Russia and foreign pharmaceutical companies. The possibility of measuring spectral characteristics directly in the package is shown. The necessary multi-pulse series of pulses, used in the measurement of spectral characteristics, are given. The possibility of receiving signals of spin echo with a good signal/noise ratio is shown, as well as the possibility of distinguishing different manufacturers' spectra of paracetamol according to the form of the release. *CONCLUSION.* The article shows a principal possibility of creation on the basis of this method of compact and portable devices for non-destructive identification of medicinal preparations.

Keywords: nuclear quadrupole resonance; the quality of medicines; non-destructive testing; increased sensitivity; dual-frequency NQR.

For citation: Khusnutdinov RR. Hardware and program system for determination of authenticity of medicines by nuclear quadrupole resonance method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):119-131. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-119-131.

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется контролю качества медицинских изделий, лекарственных препаратов и пищевых добавок.

Согласно официальной статистике доля фальшивых (поддельных, контрафактных) лекарств лекарственных препаратов (ЛП) в РФ составляет 2-4%, по неофициальным данным количество поддельных лекарств значительно выше и по некоторым позициям достигает 10%. В странах Европы процент некачественных ЛП ниже, чем в России, в странах Азии и Африки доля поддельных лекарств достигает 50% для некоторых популярных типов лекарственных препаратов [1, 2]. В России официальные лаборатории, подчиняющиеся Росздравнадзору, осуществляют постоянный контроль качества медицинских изделий, но их возможности позволяют проверить только 1% ЛП находящихся в обращении. Поэтому в последние годы приняты государственные решения по усилению контроля качества медицинских изделий и ЛП в рамках реализации национального проекта «Здоровье» и активно развиваются методы для диагностики ЛП.

На сегодняшний день лаборатории контролирующие качество ЛП оснащены современными аналитическими приборами. Обязательным набором, как правило, являются методы химического анализа, хроматографический анализ, методы ИК-спектроскопии [3], масс-спектроскопия. Большинство из данных методов исследования позволяют провести качественный анализ ЛП на соответствие нормативной документации. Однако существующее аналитическое оборудование имеет ряд недостатков. Например, как правило, требуются предварительная подготовка образца, изготовление тестовой пробы. Оборудование громоздко и требует квалифицированного персонала. Современный аналитический метод, основанный на спектроскопии Рамановского (комбинационного) рассеяния лишен основных недостатков – обеспечивается неразрушающий контроль, т.е. можно провести анализ, не повреждая упаковку, и сканеры портативны и легки в управлении [4-6]. В то же время их использование ограничено требованиями оптической прозрачности среды, что означает невозможность исследования ЛП в непрозрачных упаковках и большинство таблеток или порошков в капсулах. Поэтому техника ядерного квадрупольного резонанса имеет перспективы в качестве метода для определения качества ЛП, так как позволяет исследовать химические соединения в твердой фазе непосредственно в упаковке (в блистерах, пластиковых и картонных коробках и тубах).

Использование спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса для идентификации лекарственных препаратов относительно недавно привлекло внимание исследовательских коллективов. В перечне статей ОФС (Общая фармакопейная статья) определяющих различные физические, физико-химические, химические и другие методы исследования лекарственных препаратов, имеется статья ОФС.1.2.1.1.0007.15 «Спектроскопия ядерного магнитного резонанса». Поскольку ЯКР является по сути магнитным резонансом в нулевом поле, есть шансы, что в последствии и сам метод ЯКР будет добавлен к данному перечню сертифицированных методов исследования. В этой связи исследования в области определения подлинности, либо качества лекарственных препаратов актуальны и несомненно будут востребованы специалистами различных отраслей. Несмотря на то, что измерения спектральных характеристик химических соединений, соответствующих лекарственным препаратам проводилось с начала 1980-х годов, данные измерения касались в основном определения резонансной частоты, получения спектров и выполнялись с предварительной подготовкой образцов. Лекарственные препараты извлекались из упаковки, перемалывались в порошок и помещались в специальную пробирку и затем приступали к измерению спектральных параметров. В начале 2000-х годов в связи с развитием техники удаленного детектирования, разработанной в первую очередь для поиска и обнаружения мин, взрывчатых веществ, где очень важно было решить проблему повышения чувствительности и повышения отношения сигнал/шум [7, 8], несколько исследовательских коллективов начали применять полученные навыки для неразрушающих измерений лекарственных препаратов. Пионерским в данной области можно считать работы, проводимые в Kings College London (Великобритания) группой под руководством Джона Ас. Смита [9-12]. В этих работах, выполнявшихся с кооперацией с группами из Словении, Швеции, Японии впервые также была показана возможность создания прибора, предназначенного только для определения подлинности лекарственных препаратов. Упор в исследованиях главным образом ставился на измерение спектров лекарственных препаратов и сравнение их с эталонными образцами. В данной работе показана возможность использования лабораторного оборудования, изначально предназначенного для измерения заранее подготовленных и расфасованных в штатные пробирки образцов в качестве основы для неразрушающего, без предварительной подготовки образца, контроля и измерений.

Материалы и методы. Основы теории ЯКР

Прежде чем описать методику измерения параметров лекарственных препаратов следует кратко остановиться на принципах спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса. Явление ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) заключается в резонансном поглощении электромагнитной энергии в кристаллах, обусловленное переходами между энергетическими уровнями, образующимися в результате взаимодействия электрического квадрупольного момента ядра с градиентом электрического поля (ГЭП) в месте расположения ядра.

Взаимодействие квадрупольного момента ядра Q с градиентом электрического поля кристалла $Q_{\alpha\beta}$ приводит к появлению энергетических состояний, соответствующих

различным ориентациям ядерного спина $\vec{I}$ относительно кристаллографических осей. Радиочастотное магнитное поле, так же, как и в случае ЯМР, вызывает вынужденные переходы между этими состояниями, что обнаруживается как резонансное поглощение электромагнитной энергии. В отличие от ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для наблюдения ЯКР не требуется наличие внешнего магнитного поля, что значительно упрощает аппаратуру. Основные положения приведены в многочисленных обзорных публикациях и монографиях, например в [13, 14].

ЯКР наблюдается в твердом агрегатном состоянии (моно- и поликристаллические вещества), а также в замороженных жидкостях. Типичными ядрами, на которых наблюдается ЯКР, являются ^{35}Cl , ^{37}Cl , ^{79}Br , ^{81}Br , ^{127}I , ^{121}Sb , ^{123}Sb , ^{75}As , ^{63}Cu , ^{65}Cu , ^{14}N , ^{10}B , ^{11}B и т.д. ЯКР является идентифицирующим методом, так как каждому соединению соответствует свой уникальный спектр исследуемого ядра. Основными параметрами являются резонансная частота, константа квадрупольного взаимодействия, релаксационные характеристики, ширина линии.

Параметры спектра ядерного квадрупольного резонанса для каждого химического соединения уникальны. Значения частот квадрупольного резонанса даже для одного и того же ядра существенно меняются в разных соединениях. Такие изменения происходят вследствие различия в величинах градиента электрического поля. ГЭП на ядре может определяться совокупностью различных вкладов. Это могут быть электрические заряды соседних ионов, мультипольные вклады окружающих атомных групп, электроны исследуемого атома.

Метод ядерного квадрупольного резонанса применяется в современных технологиях для исследований сегнетоэлектриков, полупроводников, которые используются как солнечные батареи, оптические запоминающие устройства; сверхпроводников, детектирования взрывчатых и наркотических веществ, контроля фармацевтических веществ, а также фундаментальных исследований в области молекулярных и ионных кристаллов.

На рисунке 1 показаны уровни энергии и допустимые переходы между ними.

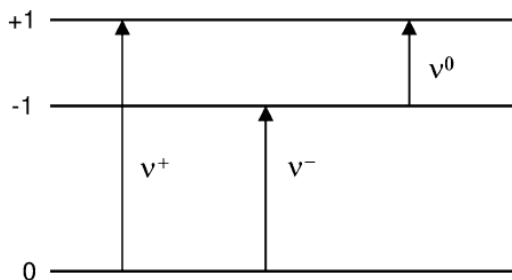


Рис.1 Уровни энергии для спина $I=1$.

Fig. 1 Energy levels for spin $I=1$.

Соответствующие уровни энергии и частоты переходов определяются следующим образом. Для спина $I=1$ при условии, что параметр асимметрии $\eta \neq 1$ существуют три невырожденных энергетических уровня (см. Рис.1):

$$E_+ = A(1 + \eta); \quad E_0 = -2A; \quad E_- = A(1 - \eta)$$

где $A = \frac{e^2 Q q}{4I(2I-1)} = \frac{e^2 Q q}{4}$ - константа квадрупольного взаимодействия. Очевидно, что

$$E_+ + E_0 + E_- = 0. \text{ Частоты ЯКР переходов зависят и от константы квадрупольного}$$

взаимодействия A и от параметра асимметрии η .

Частоты переходов удобно определить следующим образом

$$\omega_{+0} = \frac{1}{\hbar}(E_+ - E_0) = \frac{A(3 + \eta)}{\hbar}; \quad \omega_{0-} = \frac{1}{\hbar}(E_0 - E_-) = \frac{A(3 - \eta)}{\hbar};$$

$$\omega_{+-} = \frac{1}{\hbar}(E_+ - E_-) = -\frac{2A\eta}{\hbar}$$

Аппаратура для детектирования

Как и во всех методах радиоспектроскопического оборудования, набор основных узлов спектрометров состоит из ряда стандартных блоков. Различия между спектроскопией ЯМР, ЭПР, ЯКР заключаются главным образом в том, что для ЯКР не требуется наличие постоянного магнитного поля. Набор стандартных компонентов без источника магнитного поля представлен на рисунке 2.

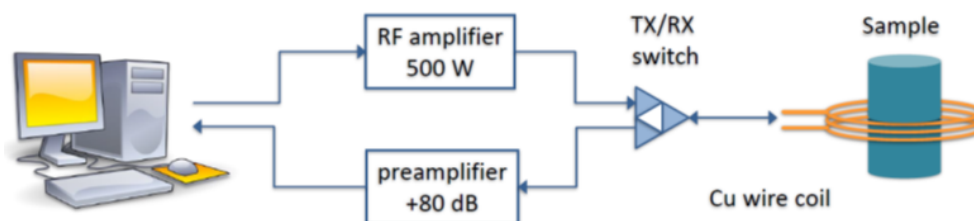


Рис.2 Принцип работы ЯКР спектрометра

Fig.2 Operating principle of JKR spectrometer

Графический интерфейс специализированного программного обеспечения, управляющего спектрометром, предоставляет возможность исследователю создать необходимую последовательность импульсов, вводя в соответствующие временные позиции частоту, фазу, продолжительность импульса или серии импульсов, частоту и период их повторения. Таким же образом выставляются параметры окна, в котором происходит запись сигнала: частота дискретизации и количество точек. Далее сгенерированная импульсная последовательность реализуется в программаторе, который может быть реализован либо на плате компьютера, либо в специальном блоке прибора. Усиленная с помощью линейного усилителя мощности последовательность импульсов подается на датчик спектрометра, как правило, представляющий собой радиочастотный контур, настроенный на резонансную частоту. Блок приемной части состоит из предусилителя, фильтров и окончательное сохранение/обработка записанных сигналов осуществляется компьютерной программой. Так как в большинстве приборов подобного типа передающая катушка является также и приемной, то перед ней стоит «переключатель» который поочередно открывает либо передающую часть, либо приемную. С развитием компьютерных алгоритмов и специализированных пакетов обработка сигналов выполняется уже для записанных данных с использованием либо готовых пакетов, например *Mathematica* или *MathLab* [15] либо в специально написанных программах для обработки спектров.

Ниже будет подробное описание этого блока и также характеристики остальных узлов. Приблизительные длительности и амплитуда импульса и сигналов показаны на рисунке 3.

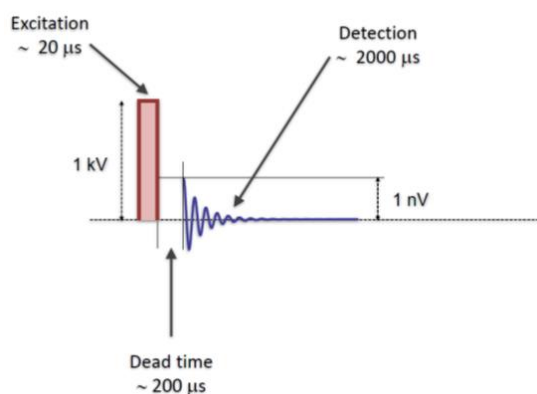


Рис.3. Схема действия радиочастотного импульса

Fig. 3. RF pulse scheme

Техника ЯКР для определения подлинности лекарств.

Значительное количество лекарственных препаратов содержит квадрупольные ядра, например методом ЯКР возможно наблюдать спектры кристаллов содержащие ядра азота, хлора, бора, алюминия и др. (рис.4.)

D																			He
Li	Be																		
Na	Mg																		
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
Fr	Rd	Ac																	

Рис. 4. Элементы периодической таблицы, *Fig. 4. Elements of the periodic table with*
обладающие квадрупольными ядрами *quadrupole kernels*

Наиболее подходящим элементом является азот N-14. Ядра азота входят в большое количество лекарственных препаратов. Наиболее популярными и, следовательно, наиболее часто подделываемыми являются парацетамол, фурасемид, карбпаземин, сульфамицил и другие. Согласно исследованиям, ученых из Университета King's College London, можно выделить несколько групп лекарственных препаратов, подходящих для метода ЯКР. Это группа ЛП содержащих парацетамол, группа антималярийных ЛП, группа противораковых ЛП [9-12]. Кроме ЛП также можно исследовать пищевые добавки [16-18]. Кроме азота N-14, содержащегося в большом количестве лекарственных препаратов, метод якр можно также использовать на других квадрупольных ядрах, например на хлоре Cl-35 [19]. Характерно, так как частота ЯКР определяется взаимодействием ядра с компонентами тензора ГЭП, то для каждого химического соединения спектр будет уникален. Таким образом, даже для парацетамола, возможно отличить по спектру препараты разных производителей и разной формы – в таблетках, в порошках. Структура молекулы и ее спектр представлены на Рис.5. Более того так амплитуда сигнала ЯКР пропорциональна количеству резонансных ядер, то техника ЯКР позволяет производить не только качественный, но и количественный контроль (процентное содержание действующего вещества). Помимо качественного и количественного анализа, с помощью ЯКР возможно исследование полиморфизма у некоторых лекарственных препаратов [20].

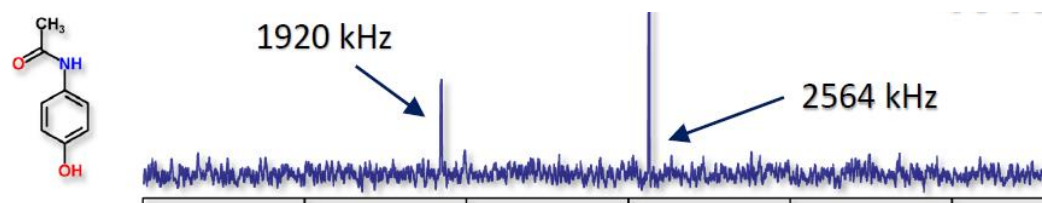


Рис.5. Структура молекулы парацетамола и *Fig.5. The structure of the paracetamol molecule*
резонансные частоты. *and resonance frequencies.*

Датчик спектрометра

Датчик катушки представляет собой параллельный или колебательный контур, содержащий как минимум два конденсатора C_M и C_T , первый из которых предназначен для согласования выходного сопротивления передатчика с входным сопротивлением колебательного контура, второй предназначен для настройки контура на резонансную частоту. Кроме этого для разделения мощных импульсов возбуждения от слабых переходных сигналов, возникающих в катушке используются кросс-диоды, в качестве фильтра используется четвертьволновая линия.

Катушка спектрометра может иметь разные формы. Для исследования таблеток без упаковки, настройки и подбора оптимальных параметров многоимпульсных последовательностей удобнее использовать соленоидную катушку диаметром 13 мм и длиной 40-50 мм. В такой катушке наиболее оптимально укладываются таблетки парацетамола большинства производителей. Для измерения спектров лекарства в упаковке изготовлена соленоидная катушка изображенная на рисунке 6. Особое внимание требуется уделить получению высокой добротности колебательного контура. Обычная соленоидная катушка, намотанная одножильным медным проводом подходящего сечения (как правило, 0,5 – 1 мм для данного диапазона частот) обладает добротностью в диапазоне 70-90, что не позволяет получить переходные сигналы достаточной величины.

Основная причина этого заключается в скин-эффекте – на высоких частотах переменного тока протекание тока в проводнике осуществляется в поверхностном слое проводника. Толщина скин-слоя для меди составляет около 0,08 мм на частоте около 1 МГц. Суммарная площадь поверхности для скрученных в жгут большого количества проводом меньшего сечения намного больше чем у одножильного провода, что приводит к уменьшению сопротивления на высоких частотах и следовательно к увеличению добротности. Было принято решение использовать провод марки литцендрат марки ЛЭШО 50х0,07, состоящий из 50 изолированных лаком и скрученных в жгут медных проводов диаметром 0,07 мм в общей изоляционной оболочке из шелка. Данный провод лишен потерь, возникающих из-за скин-эффекта и эффекта близости, вследствие чего добротность возросла до 256. Параметры катушки изображенной на Рис.6 следующие: 65 витков, диаметр 5 см, длина 5 см выбраны с учетом того чтобы возможно было проводить измерения таблеток без оболочки, таблеток в блистере, таблеток в тубе (рис.4).



Рис.6 Радиочастотная катушка аппаратно-программного комплекса и размещение исследуемых образцов в катушке.

Fig. 6 Radio-frequency coil of hardware and software complex and placement of test samples in the coil.

Структура и характеристики аппаратно-программного комплекса

Для измерений спектров лекарственных препаратов создан аппаратно-программный комплекс на основе лабораторной консоли для ЯМР и ЯКР измерений Redstone производства компании Tecmag (США). Структурная схема основных блоков и узлов представлена на рисунке 7. В рисунке использованы принятые в научной среде англоязычные наименования. Данный прибор имеет возможность измерения спектров как ядерного магнитного так и квадрупольного резонанса. Естественно, что для ЯМР измерений понадобится дополнительно магнит и схемы для его питания и управления. В зависимости от типа измерений некоторые блоки могут быть не задействованы или использоваться в другом сочетании. Существует достаточное количество монографий посвященные аппаратуре для радиоспектроскопии ЯКР в которых вопросы конструирования и электроники рассмотрены достаточно подробно [12-14].

Данный прибор имеет активно используемые в последние годы в экспериментальном оборудовании, средства компьютеризации выполнения измерений. Специализированной программой *NTNMR* посредством понятного графического интерфейса можно в широком диапазоне управлять всеми процессами, начиная от создания необходимой последовательности импульсов, заканчивая обработкой полученных сигналов.

Основные характеристики спектрометра:

1. Частотный диапазон для проведения измерений составляет от 0.5 МГц до 125 МГц;
2. Максимальную длительность импульса переменного радиочастотного поля составляет 10 мс, что позволяет получить магнитное поле до 5 мТл в закрытом (экранированном) контуре;
3. При добротности датчика спектрометра (приемопередающего рч контура) более 150 время восстановления приемного тракта в зависимости от резонансной частоты составляет от 400 мксек на частоте 0,5 МГц до 5 мксек на частоте более 20 МГц;
4. На чувствительность приемника главным образом помимо образца влияют шумы, возникающие в приемной катушке;
5. Представляется неограниченная возможность создания импульсных последовательностей с манипулированием фазами импульсов, циклами, и т.д;
6. Производится квадратурное детектирование;
7. Встроенные импульсные генераторы обеспечивают высокую стабильность параметров во время проведения измерений;
8. В качестве примера измерения спектральных характеристик – на 10 граммах КСЮЗ на квадрупольных ядрах Cl-35, 37 значение отношения сигнал/шум не менее 6 дБ при комнатной температуре (без накоплений).

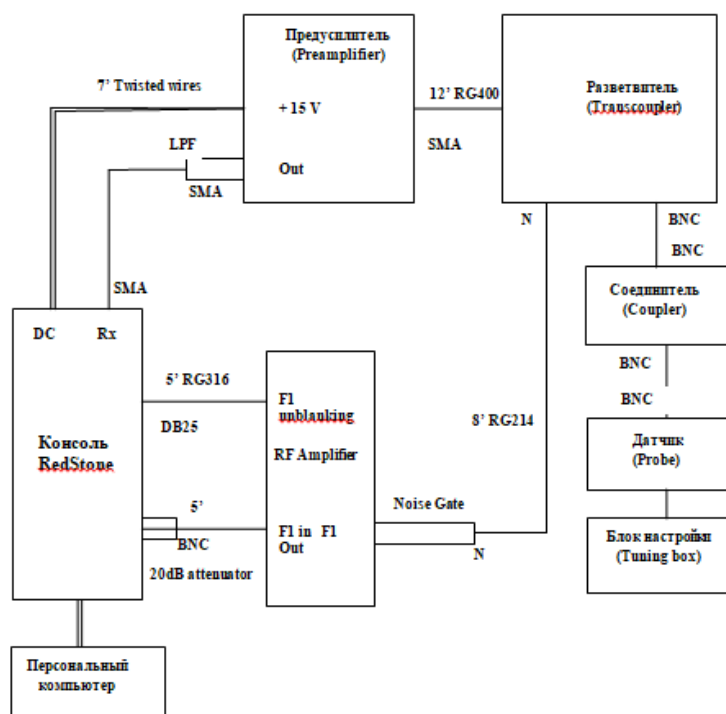


Рис. 7. Блок-схема ЯКР спектрометра

Fig. 7. Spectrometer JKR Flow Diagram

Описание блоков спектрометра.

Передающий блок. Данный блок обеспечивает подачу на датчик спектрометра (Probe) заранее спrogramмированной серии мощных радиочастотных импульсов. Максимальная амплитуда определяется усилителем мощности входящим в комплект спектрометра. В типовом исполнении мощность достигает 1кВ. Необходимая мощность определяется как параметрами датчика, так и исследуемым образцом. В данный блок входят генератор рч импульсов и импульсный программатор, вырезающий из непрерывной последовательности видеопульсы необходимой длительности.

Блок управления – представляет собой собранную на нескольких платах цифровых сигнальных процессоров – DSP, модуль сопряжения с персональным компьютером и операционной системой Windows, единый радиочастотный узел, цифровой приемник, дополнительные генераторы для создания градиентных полей. В состав консольного блока входят:

1. *RF Transmitter* – блок управляемого радиочастотного передатчика: передатчик представляет собой DSP управляемый DSP, и использующий метод прямого цифрового синтеза *DDS (Direct Digital Synthesizer)* синтезатор частоты и плату модулятора передатчика. На выходе передатчика получается амплитуда напряжения в пике 1 В, рассчитанного на согласованную, на 50 Ом нагрузку.;

2. импульсный программатор в сочетании с системой обработки данных (*pulse programmer and data acquisition system*): данный программатор также использует платы цифровых сигнальных процессоров и имеет временное разрешение - 100 нс, минимальную длительность импульсов 300 нс, практически неограниченное количество циклов и 1024 события. Каждый рч канал имеет 8 TTL линий, созданный для контроля оборудования. Усреднитель снабжен встроенным питанием и обладает комплексной, работающей в реальном времени экран 4 *MWord* (2048 x 2048) памятью. При необходимости память можно расширить 32 *MWord* (512 x 256 x 256) путем установки дополнительных плат *SIMM*.

К блоку передатчика относится отдельно установленный усилитель мощности. В описанном аппаратно-программном комплексе используется усилитель мощности австралийского производства *Tomco*. Радиочастотные импульсы сгенерированные оператором в блоке управления и усиленные усилителем мощности поступает на блок разветвителя (*Transcoupler*) и затем через соединитель (*Coupler*) подаются на катушку (*Probe*) в которую помещается исследуемый образец. Слабые на уровне нескольких микровольт переходные сигналы ЯКР усиливаются в предусилителе и затем отправляются в приемную часть блока управления.

Разветвитель выполняет очень важную функцию – разделяет мощный сигнал от усилителя мощности направляя его на датчик и при этом не пропуская его на вход приемного устройства; после окончания импульса разветвитель открывает приемник для слабых переходных сигналов наведенных в образце и перекрывает вход усилителя мощности.

Одна из распространенных схем коммутации датчика сигналов ЯКР с выходом передатчика и входом предусилителя показана на Рис. 8. Кремниевые диоды имеют нелинейный участок на своей вольтамперной характеристике и работают как пассивный переключатель «приемник-передатчик», который открыт для больших сигналов и закрыт для малых. Встречноключенные диоды D_1 и D_2 (обычно кремниевые) проводят ток в течение действия импульсов, высокого напряжения открывает диоды. Вследствие этого передатчик связан в этот момент с датчиком, и в то же время предусилитель отключен от опасно перегруженной резонансной цепи. После завершения действия радиочастотных импульсов, т.е. в режиме приема, импеданс диодов увеличивается (при низких значениях напряжения диоды закрыты и не проводят ток) и закрывается канал (через диоды D_1) от передатчика к резонансной цепи, изолируя цепь от приходящего по этому каналу шума. Кроме того, четвертьволновый коаксиальный кабель ($\lambda/4$) преобразует импеданс закороченных на землю встречноключенных диодов D_2 (ZD_2) согласно уравнению трансформации сопротивления:

$$Z_{ВХОД} = Z_0^2 / Z_{D2},$$

где $Z_0 = 50$ Ом (характеристический импеданс) и в этом случае резонансная цепь непосредственно связывается с предусилителем.

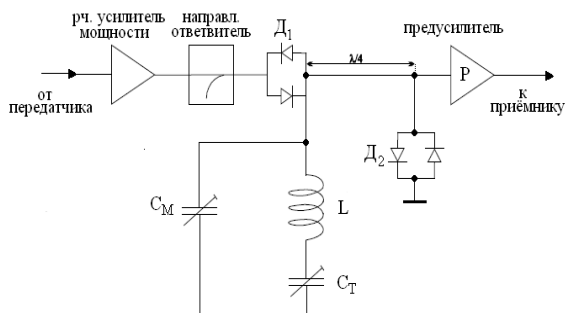


Рис. 8. Схема коммутации датчика сигналов ЯКР с выходом передатчика и входом предусилителя

Fig. 8. JKR signal sensor switching circuit with transmitter output and preamplifier input

Эксперимент

Для проведения измерений были приобретены образцы лекарственного соединения «Парацетамол» различных торговых марок разных стран (таб. 1) содержащие 500 мг и 1000 мг действующего вещества. Измерения проводились при комнатной температуре, используя многоимпульсную последовательность двойной спин-локинг, представляющую собой последовательность из двух серий 90°-ых импульсов разделенных интервалом для накопления и записи сигнала. Длительность импульса и интервал между импульсами варьировались в широком диапазоне и подбирались по максимуму сигнала эха. На частоте якр перехода 2,564 МГц наиболее оптимальными оказались длительности импульса 30 мксек, интервал между импульсами 2000 мксек. Количество импульсов в серии 1024, время записи сигнала 2,56 мсек (количество стробов 512 с интервалом 5 мксек).

Таблица 1

Параметры лекарственных препаратов

Торговое наименование	Страна производитель	Количество действующего вещества, мг	Форма
Panadol Novum	Чехия	500	Прессованная таблетка
Parol	Турция	500	Прессованная таблетка
Paralen	Чехия	500	Прессованная таблетка
Paracetamolo	Италия	500	Порошок в капсуле
Tachipirina 1000	Италия	1000	Прессованная таблетка
Tachipirina 500	Италия	500	Прессованная таблетка
Парацетамол	Россия	500	Прессованная таблетка
Merimol 650	Индия	650	Прессованная таблетка
Panadol	Россия	500	Прессованная таблетка

На рисунке 9 представлены объединенные сигналы эха от различных образцов после Фурье преобразования и сглаживания высокочастотных шумов. Заметна разница в ширине линии, позволяющая отличать одного производителя от другого.

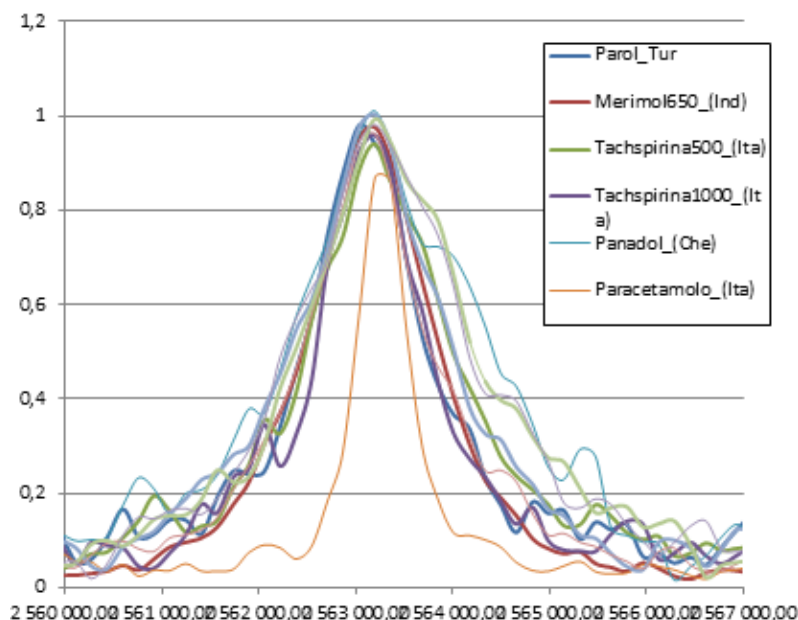


Рис. 9. Сигналы ЯКР эха различных образцов парацетамола при комнатной температуре.

Fig. 9. Echo signals of various paracetamol samples at room temperature.

Заключение

Среди массы физико-химических методов исследования лекарственных препаратов, метод спектроскопии ядерного квадрупольного резонанса имеет свои преимущества и недостатки. Основным преимуществом является однозначная идентификация наличия действующего вещества в лекарственном препарате и отсутствие предварительной подготовки образцов. Кроме того, анализируя ширину линии, возможно,

различить препараты от различных производителей. Чувствительность предложенного программно-аппаратного комплекса достаточная для определения подлинности промышленно выпускаемых лекарственных препаратов. Недостатками же является влияние шумов на амплитуду сигнала от металлических фрагментов упаковки, что требует увеличения времени измерения для накопления сигнала. Ограничение имеется также необходимости наличия в составе лекарственного препарата квадрупольных ядер и по форме выпуска препаратов, так как метод работает только в твердой фазе. Предложенная конструкция позволяет изготовить прибор для контроля качества лекарственных препаратов в компактной портативной версии. С точки зрения сравнения характеристик данного комплекса с прототипами, изготовленными в других странах, например, группой доктора *J. Barras* [18, 19], датчик данного комплекса обладает повышенной добротностью, что позволяет увеличить чувствительность детектирования, что в конечном итоге сказывается на времени измерения.

Литература

1. Некондиционная и фальсифицированная медицинская продукция /// Всемирная организация здравоохранения: официальный сайт. 2020. Доступно по URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/substandard-and-falsified-medical-products> (дата обращения: 27.01.2020).
2. Поддельные/ ложно маркированные/ фальсифицированные/ контрафактные лекарственные средства // Всемирная организация здравоохранения: официальный сайт. 2020. Доступно по URL: <https://www.who.int/medicines/services/counterfeit/ru/> (дата обращения: 27.01.2020).
3. Chen H., Lin Z., Tan C. (2020) Application of near-infrared spectroscopy and class-modeling to antibiotic authentication. *Analytical Biochemistry*, 590 (113514). doi: 10.1016/j.ab.2019.113514
4. Assi S., Khan I., Edwards A. On-spot quantification of modafinil in generic medicines purchased from the Internet using handheld Fourier transform-infrared, near-infrared and Raman spectroscopy // *JOURNAL OF ANALYTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*. 2020. V.1, №11.
5. Degardin K., Guillemain A., Klespe P. Packaging analysis of counterfeit medicines // *FORENSIC SCIENCE INTERNATIONAL*. 2018. V. 291. C. 144-157.
6. Eliasson, C. and Matousek, P. Noninvasive authentication of pharmaceutical products through packaging using spatially offset Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 2007. 79(4). C. 1696–1701.
7. *Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials*, Editors: Apih T., Rameev B., Mozzhukhin G., Barras J. (Eds.) Springer, 2014, ISBN 978-94-007-7265-6, NATO Science for Peace and Security Ser.B: Physics and Biophysics.
8. J. A. S. Smith (1995). Nitrogen-14 Quadrupole Resonance Detection of RDX and HMX Based Explosives, in: *European Convention on Security and Detection*, vol. 408, pp. 288–292
9. Kyriakidou, G., Jakobsson, A., Althoefer, K., and Barras, J. (2015). Batch-specific discrimination using nuclear quadrupole resonance spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 87(7):3806–3811.
10. Barras, J., Althoefer, K., Rowe, M. D., Poplett, I. J., and Smith, J. A. S. (2012a). The emerging field of medicines authentication by nuclear quadrupole resonance spectroscopy. *Applied Magnetic Resonance*, 43(4):511–529.
11. Barras, J., Katsura, S., Sato-Akaba, H., Itozaki, H., Kyriakidou, G., Rowe, M. D., Althoefer, K. A., and Smith, J. A. S. (2012b). Variable-pitch rectangular cross-section radiofrequency coils for the nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance investigation of sealed medicines packets. *Analytical Chemistry*, 84(21):8970–8972.
12. Barras, J., Murnane, D., Althoefer, K., Assi, S., Rowe, M. D., Poplett, I. J. F., Kyriakidou, G., and Smith, J. A. S. (2013). Nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance spectroscopy: A promising analytical methodology for medicines authentication and counterfeit antimalarial analysis. *Analytical Chemistry*, 85(5):2746–2753.
13. Сафин И.А., Осокин Д.Я. Ядерный квадрупольный резонанс в соединениях азота. М.: Наука, 1977. С.35-39.
14. Vladimir I. Chizhik, Yuri S. Chernyshev, Alexey V. Donets, et al. *Shelyapina, Magnetic resonance and its Application*, 2014. doi:10.1007/978-3-319-05299-1.
15. Shao W., Barras J., Kosmas P. (2019) A novel wavelets method for cancelling time-varying interference in NQR signal detection. *SIGNAL PROCESSING*, 154: 238-249.

16. C. Chen, F. Zhang, S. Bhunia, S. Mandal (2017). Broadband Quantitative NQR for Authentication of Vitamins and Dietary Supplements, *Journal of Magnetic Resonance*, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2017.03.011>.
17. Masna NVR., Zhang FC., Chen C., Mandal S, Bhunia S. (2018). Authentication of dietary supplements through Nuclear Quadrupole Resonance (NQR) spectroscopy. *International Journal of Food Science and Technology*. 2018. V. 53 (12). Pp. 2796-2809. doi: 10.1111/ijfs.13892
18. Chen C., Zhang FC., Barras J., Althoefer K., Bhunia S., Mandal S. (2016). Authentication of Medicines Using Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy. *IEEE-ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*. 2016. V.13 (3). pp. 417-430. doi: 10.1109/TCBB.2015.2511763
19. Tate, E., Althoefer, K., Barras, J., Rowe, M. D., Smith, J. A. S., Pearce, G. E. S., and Wren, S. A. C. (2009). Quantitative ³⁵Cl nuclear quadrupole resonance in tablets of the antidiabetic medicine diabinese. *Analytical Chemistry*. 2009. V. 81(13). Pp. 05574–5576.
20. Zvonko Trontelj, Janez Pirnat, Vojko Jazbinšek, Janko Lužnik, Stane Srčič, Zoran Lavrič, Samo Beguš, Tomaž Apih, Veselko Žagar and Janez Seliger (2020). Nuclear Quadrupole Resonance (NQR) A Useful Spectroscopic Tool in Pharmacy for the Study of Polymorphism. *Crystals*, 10(6), 450. <https://doi.org/10.3390/cryst10060450>.

Авторы публикации

Рустем Рауфович Хуснутдинов – канд. физ-мат.наук, заведующий кафедрой «Физика», Казанский государственный энергетический университет». Email: khrr@yandex.ru

References

1. Substandard and falsified medical products. *World Health Organization: official site*. 2020. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/substandard-and-falsified-medical-products> (accessed: 27.01.2020).
2. Counterfeit / falsely labeled / falsified / counterfeit medicines. *World Health Organization: official site*. 2020. URL: <https://www.who.int/medicines/services/counterfeit/ru/> (accessed: 27.01.2020).
3. Chen H., Lin Z., Tan C. (2020) Application of near-infrared spectroscopy and class-modeling to antibiotic authentication. *Analytical Biochemistry*. 2019;590(113514). doi: 10.1016/j.ab.2019.113514
4. Assi S, Khan I, Edwards A. On-spot quantification of modafinil in generic medicines purchased from the Internet using handheld Fourier transform-infrared, near-infrared and Raman spectroscopy. *JOURNAL OF ANALYTICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*. 2020;1:11.
5. Degardin K, Guillemain A. Klespe P. Packaging analysis of counterfeit medicines. *FORENSIC SCIENCE INTERNATIONAL*. 2018;291:144-157.
6. Eliasson, C. and Matousek, P. Noninvasive authentication of pharmaceutical products through packaging using spatially offset Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*. 2007;79(4):1696–1701.
7. Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials, Editors: Apih T., Rameev B., Mozzhukhin G., Barras J. (Eds.) *Springer*. 2014. NATO Science for Peace and Security Ser.B: Physics and Biophysics.
8. J.A.S. Smith (1995). *Nitrogen-14 Quadrupole Resonance Detection of RDX and HMX Based Explosives*, in: *European Convention on Security and Detection*.1995;408:288–292
9. Kyriakidou G, Jakobsson, A, Althoefer, K. (2015). Batch- specific discrimination using nuclear quadrupole resonance spectroscopy. *Analytical Chemistry*. 87(7):3806–3811.
10. Barras J, Althoefer K, Rowe M.D., et al. (2012a). The emerging field of medicines authentication by nuclear quadrupole resonance spectroscopy. *Applied Magnetic Resonance*. 43(4):511–529.
11. Barras J, Katsura S, Sato-Akaba H, et al. (2012b). Variable-pitch rectangular cross-section radiofrequency coils for the nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance investigation of sealed medicines packets. *Analytical Chemistry*. 84(21):8970–8972.
12. Barras J, Murnane D, Althoefer K., Assi S, et al. (2013). Nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance spectroscopy: A promising analytical methodology for medicines authentication and counterfeit antimalarial analysis. *Analytical Chemistry*. 85(5):2746–2753.
13. Safin I.A, Osokin D.a, Сафин ИА. *Nuclear quadrupole resonance in nitrogen compounds*. М.: Nauka, 1977.
14. Vladimir I. Chizhik, Yuri S. Chernyshev, Alexey V. Donets, Vyacheslav V. Frolov,

Andrei V. Komolkin, Marina G. Shelyapina, *Magnetic resonance and its Application*. 2014. doi:10.1007/978-3-319-05299-1.

15. Shao W, Barras J, Kosmas P. (2019) *A novel wavelets method for cancelling time-varying interference in NQR signal detection*. SIGNAL PROCESSING, 154: 238-249.

16. C. Chen, F. Zhang, S. Bhunia, S. Mandal (2017). Broadband Quantitative NQR for Authentication of Vitamins and Dietary Supplements. *Journal of Magnetic Resonance*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmr.2017.03.011>.

17. Masna NVR, Zhang FC, Chen C, et al. (2018). Authentication of dietary supplements through Nuclear Quadrupole Resonance (NQR) spectroscopy. *International Journal of Food Science and Technology*. 2018;53 (12):2796-2809. doi: 10.1111/ijfs.13892

18. Chen C, Zhang FC, Barras J, et al. (2016). *Authentication of Medicines Using Nuclear Quadrupole Resonance Spectroscopy*. IEEE-ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 13(3):417-430. doi: 10.1109/TCBB.2015.2511763

19. Tate E., Althoefer K, Barras J, et al. (2009). Quantitative ³⁵Cl nuclear quadrupole resonance in tablets of the antidiabetic medicine diabinese. *Analytical Chemistry*. 81(13):5574–5576.

20. Zvonko Trontelj, Janez Pirnat, Vojko Jazbinšek, Janko Lužnik, Stane Srčič, Zoran Lavrič, Samo Beguš, Tomaž Apih, Veselko Žagar and Janez Seliger (2020). Nuclear Quadrupole Resonance (NQR). A Useful Spectroscopic Tool in Pharmacy for the Study of Polymorphism. *Crystals*. 10(6), 450. <https://doi.org/10.3390/cryst10060450>.

Authors of the publication

Rustem R. Khusnutdinov –Kazan State Power Engineering University. Email: khrr@yandex.ru.

Получено 25.02.2022г.

Отредактировано 14.03.2022г.

Принято 21.03.2022г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ РАБОЧЕГО РЕСУРСА

Д.А. Иванов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>, ivanov.da@kgeu.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ статьи является обсуждение результатов исследований по изучению характеристик частичных разрядов на дефектах различного типа в высоковольтных изоляторах – на диэлектрическом стержне и контакте «стержень-оконцеватель». Анализ нетипичных характеристик частичных разрядов в высоковольтных изоляторах производился с использованием оригинального способа определения их состояния с помощью набора диагностических параметров. МЕТОДЫ. Экспериментальные результаты получены электромагнитным и акустическим методами бесконтактных измерений характеристик частичных разрядов. РЕЗУЛЬТАТОМ проведенных исследований являются полученные схемы электрофизических процессов в диэлектрических полостях дефектов на диэлектрическом стержне и контакте «стержень-оконцеватель» в течение одного периода приложения высокого напряжения. Схема электрофизических процессов учитывает изменения, индуцированного частичными разрядами поля в полости дефекта и на его диэлектрических поверхностях. ВЫВОД. Основным выводом является тот факт, что разработанная схема генерации обычных и мощных частичных разрядов нашла подтверждение в модели процесса генерации и последующего распространения первичного разряда в полости дефекта. В реальных условиях излучения частичного разряда в полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторах имеет более сложный характер, поэтому была сделана первая попытка объяснения генерации мощных частичных разрядов в реальных высоковольтных энергетических системах. Увеличение количества частичных разрядов и их интенсивности за фазовый интервал 20° и наличие мощных частичных разрядов являются основными признаками дефектности высоковольтных изоляторов.

Ключевые слова: дистанционная диагностика; частичные разряды электрофизические процессы; неразрушающий контроль; высоковольтные изоляторы; дефекты изоляции; система мониторинга.

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: Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.

STUDY OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES AND AGING OF THE MATERIAL OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS TO DETERMINE THEIR WORKING LIFE

DA. Ivanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The article is aimed to discuss the results of research on the characteristics of partial discharges on defects of different types in high-voltage insulators - on dielectric rod and contact «terminal rod». The atypical characteristics of partial discharges in high-voltage insulators were analysed using an original method of determining their condition using a set of diagnostic parameters. **METHODS.** Experimental results are obtained by electromagnetic and acoustic methods of non-contact measurements of partial discharge characteristics. **THE RESULTS** of conducted studies are obtained circuits of electrophysical processes in dielectric cavities of defects at dielectric rod and contact «terminal rod» during one period of high voltage application. The circuit of electrophysical processes takes into account changes of the field induced by partial discharges in the defect cavity and on its dielectric surfaces. **CONCLUSIONS.** The main conclusion is the fact that the developed scheme of generation of conventional and powerful partial discharges found confirmation in the model of the process of generation and subsequent distribution of primary discharge in the defect cavity. Under real conditions of partial discharge radiation in polymer and porcelain high-voltage insulators is more complex, so the first attempt to explain the generation of powerful partial discharges in real high-voltage power systems was made. The increase in the number of partial discharges and their intensity during the phase interval of 20° and the presence of powerful partial discharges are the main signs of defective high-voltage insulators.

Keywords: remote diagnostics; partial discharges; electrophysical processes; non-destructive testing; high-voltage insulators; insulation defects; monitoring system.

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: Ivanov DA. Study of electrophysical processes and aging of the material of high-voltage insulators to determine their working life. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.

Введение

Высоковольтное электротехническое оборудование, вследствие его сложности, использовании разнообразных материалов и работе в условиях воздействия сильных электрических, электромагнитных полей, электродинамических и тепловых воздействий подвержено большому риску образования дефектов, последующих затем неисправностей и отказов. Поэтому целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. В последние десятилетия начался переход от системы планово-предупредительного ремонта высоковольтного оборудования к ремонту по техническому состоянию и в том числе с помощью неразрушающего контроля технического состояния оборудования. Главное отличие его от ранее разработанных и использующихся методов диагностики состоит в возможности обследовать оборудование без прекращения процесса передачи электроэнергии. Быстрому и успешному переходу к методу диагностики под рабочим напряжением мешает ряд насущных проблем, требующих предварительного решения:

- отсутствие нормативных документов, включающих в себя предельные диагностические параметры, на основании которых можно принимать решение о техническом состоянии; отсутствие согласования параметров, получаемых с отключением оборудования, с диагностическими параметрами при использовании метода «под рабочим напряжением»;

- отсутствие методов многократного диагностирования с определенной периодичностью, т.е. мониторинга диагностических параметров. Периодичность должна определяться скоростью возможного образования и развития дефекта в любом контролируемом элементе оборудования;

- отсутствие универсального набора измерительных комплексов и приборов для

дистанционной диагностики или мониторинга рабочего состояния высоковольтного оборудования; отсутствие набора программных комплексов, позволяющих проводить диагностику в автоматизированном режиме и выдавать решение о выводе оборудования из эксплуатации;

- отсутствие наиболее универсальных и надежных способов дистанционной бесконтактной диагностики энергетических систем.

В предложенной статье частично обобщен опыт сотрудников КГЭУ по разработке комплексного метода и соответствующей системы мониторинга из наиболее ответственных и наиболее уязвимых в процессе эксплуатации узлов – высоковольтных изоляторов (ВИ) подстанций и воздушных линий электропередачи. В настоящее время большинство энергетических систем перешло на использование полимерных изоляторов (ПИ) на рабочие напряжения до 500 кВ. Однако сохранились и более старые системы с использованием фарфоровых изоляторов (ФИ).

По нашим представлениям, основанных на ранее полученных результатах, эффективная система мониторинга должна быть способна устанавливать текущее техническое состояние объекта, определять характеристики наиболее опасных дефектов и самостоятельно выделять наиболее быстро развивающиеся дефекты и определять периодичность процессов диагностики.

Начиная со второй половины XX века основное внимание в научных статьях, международных и отечественных стандартах уделялось частичным разрядам (ЧР) как первичным электрофизическим процессам, определяющим рабочее состояние ВИ. Более того, в последнее десятилетие было установлено, что ЧР на дефекте способны создавать сверхбольшие градиенты электрических полей, значительно превышающих напряженность полей в высоковольтной электрической сети.

В ВИ различают три основных вида ЧР: микрозаряды в малых кавернах, существующих как на поверхностях электродов, так и в объеме диэлектриков; частичные разряды вдоль границ раздела двух диэлектриков; частичные (незавершенные) пробои на границе «твердый диэлектрик – газ». Им соответствуют дефекты, чаще всего в виде воздушных полостей сферической формы внутри диэлектриков и плоскопараллельных воздушных слоев внутри диэлектрика и на границе «диэлектрик – электрод» (дисковые каверны). Ранее уже сообщалось об обнаружении мощных ЧР (МЧР) и разработанном наборе диагностических параметров для их обнаружения [1, 2]. Однако не были разработаны физические принципы развития дефектов в полимерных материалах под действием МЧР и не были построены модели развивающихся дефектов и модели остаточного ресурса в зависимости от новых диагностических параметров.

Материалы и методы

К настоящему времени были разработаны только несколько физических моделей, описывающих распространение стримеров в газовых прослойках дефектов в виде сфер или трехмерных эллипсоидов [3]. В их основе лежит закон Пашена и предложенное положение о зависимости интенсивности q МЧР от общей поверхности полости дефекта [4, 5]

$$q = \pi \varepsilon_0 \varepsilon b^2 [1 + \varepsilon_r (K(a/b) - 1)] E_{\text{чр}}, \quad (1)$$

где ε_0 и ε_r – соответственно диэлектрические проницаемости газа и диэлектрика; a и b – продольный и поперечный размеры полости дефекта; значения K -фактора инверсной поляризации были эмпирически определены в работе [4]: $K \approx 1$ ($a/b \ll 1$), $K = 3$ ($a/b \sim 1$), $K \approx 4$ ($1 < a/b < 10$).

Это выражение было использовано в работах [6, 7] при изучении особенностей ЧР в модельных полимерных образцах. Однако, в этих работах, было недостаточно уделено внимание авторов таким одновременным процессам в газовом промежутке, как возрастание скорости распространения стримера, с увеличением длины разрядного промежутка, с соответствующим повышением наведенного предыдущими ЧР, на диэлектрических поверхностях дефекта напряженности поля, в полости E_i и одновременным уменьшением напряженности приложенного к полости поля fE_a , где E_a – напряженность поля, приложенного к электродам ВИ, а f – фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня. Хотя ранее было предположено [4], что этот эффект эмпирически можно представить в виде

$$U_d = B d^n, \quad (2)$$

где коэффициент B определяет зависимость напряжения пробоя от величины разрядного промежутка d и давления газа в полости дефекта (Закон Пашена). В таком приближении при малых $d \leq 1$ мм коэффициент n приближается к 1, а для больших $d > 1$ мм величина n уменьшается до 0,5-0,7. Качественно предложенная зависимость была обнаружена для образцов первой, частично второй групп и в модельных образцах [3]. Причем в обоих экспериментах значительное изменение в зависимости $q(d)$ наблюдалось вблизи $d \approx 1$ мм.

Значительно меньшее внимание ранее было обращено на особенности распространения ЧР на втором этапе вдоль диэлектрической поверхности дефекта, причем в отмеченных выше работах не рассматривалось распределение плотности зарядов на диэлектрической поверхности и их изменение в течение периода приложенного напряжения. Некоторое качественное обсуждение процессов распространения ЧР через полость в диэлектрике, ограниченной одной с одной стороной электродом, было выполнено в работах [8-9]. В этих работах было показано, что увеличение площади канала распространения импульса на поверхности диэлектрика приводит к задержке его затухания и изменению общей мощности. По-видимому, это обстоятельство и является главной причиной расхождения между результатами по количеству, интенсивности и фазовому распределению МЧР, полученных с помощью электромагнитных и акустических датчиков.

Еще одно расхождение в характере генерации МЧР для дефектов плоской формы, изученных в реальных ВИ, и дефектов сферической формы, изученных в ряде зарубежных исследований [3, 10], состоит в том, что в сферических дефектах релаксация ЧР осуществляется путем взаимодействия электронов и ионов от двух противоположных отрезков поверхностей сферы дефекта. Наибольшая интенсивность МЧР достигается в том случае, когда возрастает радиус сферы, и напряженность поля возрастает по сравнению с напряженностью приложенного напряжения в 8 раз, максимального заряда МЧР в 13 раз с одновременным уменьшением общего количества ЧР так же за период в 2,6 раза при увеличении радиуса сферы от 0,55 до 1,175 мм [11].

В реальных ВИ релаксация зарядов МЧР осуществляется путем их рассеяния на диэлектрических поверхностях дефектов. Поэтому увеличение или уменьшение заряда МЧР во многом будет зависеть от процесса распределения индуцированного заряда на поверхности, который сам зависит от ряда параметров – проводимостью поверхности, размерами. Эти параметры имеют противоречивое влияние на индуцированное на поверхности поле E_i . Увеличение проводимости приводит к возрастанию скорости перемещения зарядов вдоль поверхности и разрастанию площади зарядов на поверхности. Этот эффект, как показано в работе [12], создает повышение зарядов на поверхности и увеличение интенсивности МЧР. Он наиболее характерен для распространения стримеров, образованных положительными ионами, как было показано на модельных образцах [12, 13] и нами на реальных ВИ. Уширение формы импульсов положительных ЧР в спадающей части связано с расширением площади стримера на поверхности. При этом не наблюдалось подобного уширения отрицательных импульсов ЧР.

Следует подчеркнуть особенности различия фазовых интервалов генерации МЧР для дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель». В первом случае накопление индуцированных ЧР и МЧР возникает поочередно на обеих граничных поверхностях дефекта. Во втором случае – только на одной диэлектрической границе полости, поскольку второй границей является металлический электрод. Эта особенность отражается на фазовом распределении МЧР.

В определенном приближении и упрощении согласно приведенному выше выражению (2) для зависимости интенсивности ЧР от формы полости в виде эллипсоида первый тип дефекта можно отнести к виду $a > b$, а дефект «стержень-оконцеватель» к виду $a < b$. Это предположение уже нашло экспериментальное подтверждение [1]

$$\bar{E}_n = \bar{E}_a + \bar{E}_i \quad (3)$$

Выполненный анализ группы параметров характеристик МЧР показал, что возможный набор диагностических параметров технического состояния ВИ может быть основан на ряде фазозависимых характеристик мощных частичных разрядов, поскольку последние являются одними из главных источников ускоренного развития дефектов. Конкретно при первичном контроле дефектности ВИ такими диагностическими

параметрами могут быть значения коэффициентов отношения количества МЧР к общему количеству ЧР за определенный интервал измерений и коэффициент отношения количества ЧР в положительном и отрицательном полупериодах приложенного высокого напряжения.

Результаты

На основе полученных данных по фазовым характеристикам ЧР и напряженности электрических полей были построены более полные схемы электрофизических процессов (рис. 1), происходящих в полостях обоих видов дефектов в течение одного периода приложения высокого напряжения. На рисунке 1 представлены следующие обозначения полей: E_a – изменение поля в полости, E_i – индуцированное частичными разрядами поле на диэлектрических поверхностях полости, φ – фазовые интервалы генерации ЧР [14].

До начала излучения импульсов ЧР поле E_a в полости однородно (рис. 1). С ростом поля E_a , начиная с нулевой фазы, до достижения условия $E_a \geq E_n$ (0° - 50°), где E_n – поле электрического пробоя, начинается излучение малых ЧР. Оно сопровождается накоплением зарядов на диэлектрических поверхностях полости, которые образуют поле E_i , противоположное по знаку приложенному полю E_a . Поле E_i возрастает с каждым последующим ЧР, пока не превысит поле E_a , что приводит к прекращению излучения ЧР и дальнейшего роста поля E_i . Причем вследствие малой электропроводности диэлектрика, поле E_i сохраняется до следующего ЧР. После смены фазы приложенного напряжения при 180° поля E_a и E_i становятся одинаковыми по знаку, и их векторное сложение ($E_a + E_i$) $> E_n$ приводит к излучению МЧР (180° - 240°).

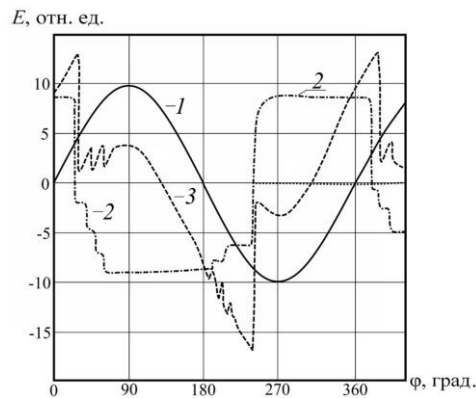


Рис. 1. Модель электрофизических процессов в полости дефекта за один период фазы приложенного электрического поля (E_a): 1 – приложение поля E_a в полости дефекта, 2 – поле индуцированных зарядов E_i на диэлектрических поверхностях полости, 3 – суммарное поле в полости $E_t = E_i \pm E_a$

Fig. 1. Diagram of the distribution of fields in the cavity of the defect depending on the phase of the applied electric field (E_a): 1 – application of the field E_a in the cavity of the defect, 2 – field of induced charges E_i on the dielectric surfaces of the cavity, 3 – total field in the cavity $E_t = E_i \pm E_a$

Сверхбольшие разряды происходят в полости дефекта при высокой напряженности электрического поля. Такой мощный разряд возможен при большом размере поверхности полости, что и подтверждается в экспериментах. Одним из главных выводов по результатам измерений набора характеристик ЧР на фарфоровых и полимерных ВИ стало подтверждение ранее установленного на модельных дефектах факта, что возникновение мощных частичных разрядов на больших дефектах ($d \geq 1$ мм) связано с накоплением электрических зарядов и соответствующих им индуцированных электрических полей за счет зарядов предыдущих обычных ЧР на дефекте. Было установлено, что такое формирование индуцированных полей в полости дефекта характерно не только для полимерных, но и фарфоровых ВИ. Причем для малых дефектов ($d \leq 1$ мм) индуцированные ЧР поля малы по сравнению с приложенным нормированными электрическими полями. Однако с ростом размеров дефектов ($d \geq 1$ мм) и повышением интенсивности соответствующих им ЧР выше 2 нКл начинается изменение общего поля в полости ($E_a + E_i$). При повышении интенсивности МЧР до 4-6 нКл возникало значительное изменение формы, ширины и скорости распространения положительных МЧР, при неизменности тех же характеристик для отрицательных импульсов (рис. 2 и рис. 3).

На схеме (рис. 1) возникновение отрицательного МЧР соответствует резкому изменению поля E_t при $\varphi \approx 240^\circ$. Для дефекта с одной диэлектрической поверхностью (контакт стержень-оконцеватель) процесс излучения МЧР на этом фазовом цикле ($\varphi < 270^\circ$) заканчивается, а для дефекта с двумя диэлектрическими поверхностями при дальнейшем увеличении фазовых углов происходит накопление зарядов и образование поля E_i противоположного знака (фазовый интервал 240° - 360°). Этот процесс заканчивается возникновением положительного МЧР уже в фазовом интервале следующего цикла приложенного напряжения (0° - 50°).

В соответствии с предложенной схемой в каждом периоде E_a с началом малых ЧР увеличивается скорость генерации индуцированных электронов в процессе разряда, что приводит к более ранней фазе начала излучения ЧР и соответствующего поля зарядов на поверхности без изменения их полярности. МЧР возникают при смене поляризации максимального поля E_t внутри полости. С ростом размера полости дефекта увеличивается разрядный промежуток, количество и скорость индуцированных электронов, количество и интенсивность МЧР в каждом периоде приложенного напряжения.

Интерес к изучению характеристик ЧР в различных материалах, используемых в основном в качестве элементов изоляции, не прекращался, начиная со второй половины XX века, причем периодически возрастал с учетом применения новых материалов, как это было с возрастающим использованием полимеров, так и с повышением напряженности электрических полей. Уже в конце XX века появились первые экспериментальные работы по изучению влияния ЧР на развитие дефектов в основном сферической или цилиндрической формы [3]. В то же время появились и первые теоретические расчеты по взаимодействию электрических разрядов, генерируемых ЧР на диэлектрических поверхностях дефектов. На рисунках 2 и 3 представлены формы импульсов МЧР для обоих видов изученных дефектов.

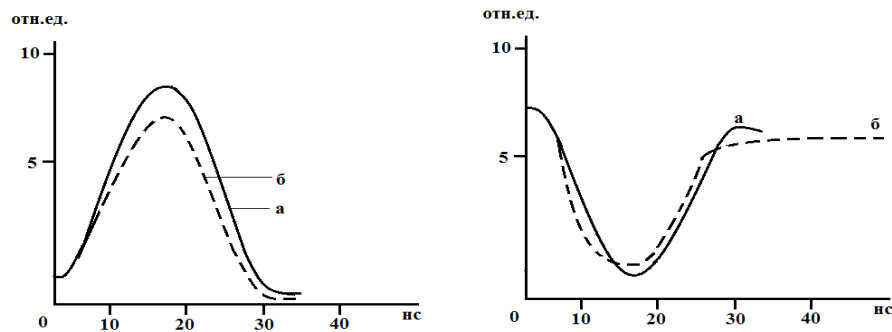


Рис. 2. Импульсы частичных разрядов на дефекте стержня ВИ [18]: а – теоретическая, б – экспериментальная.

Fig. 2. Shape of PD pulses on a dielectric rod defect: a – theoretical, b – experimental.

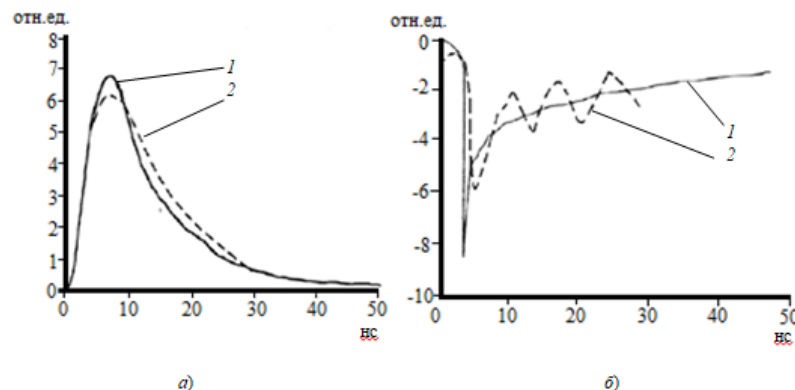


Рис. 3. Положительные (а) и отрицательные (б) импульсы частичных разрядов на дефекте «стержень – оконцеватель»: 1 – теоретическая, 2 – экспериментальная [18].

Fig. 3. The shape of positive (a) and negative (b) PD pulses on the defect "dielectric rod-end fitting": 1 - theoretical, 2 - experimental.

Форма импульсов частичных разрядов практически одинакова (положительные и

отрицательные импульсы на рис. 2) для дефекта на стержне ВИ. Для дефекта вида «стержень-оконцеватель» формы импульсов ЧР для положительных и отрицательных разрядов отличаются (рис. 3).

Положительные и отрицательные импульсы частичных разрядов в диэлектрической полости развиваются следующим образом. Индуцированное предыдущими частичными разрядами поле и внешнее приложенное поле совместно порождают дрейф индуцированных зарядов к поверхности диэлектрика. Высокая дрейфовая скорость электронов стимулирует развитие отрицательных ЧР стримерного типа. Задняя часть отрицательных и положительных импульсов ЧР медленно затухает из-за перемещения индуцированных зарядов вдоль поверхности диэлектрика.

Процесс распространения МЧР через полость дефекта сопровождался расширением площади канала стримера в несколько раз для отрицательных импульсов. Было установлено, что при каждом расширении так же значительно возрастала амплитуда заряда МЧР, что вполне соответствовало форме импульсов на рисунке 3. Этот экспериментальный результат вполне соответствует ранее разработанной модели распространения импульсов через дефекты в диэлектриках эллипсоидальной формы [4]. В этой модели предполагалась квадратичная пропорциональность заряда q стримера диаметру b электромагнитного импульса

$$q(a) b_i \varepsilon_2 \approx \pi \varepsilon_2 b^2 E_c \quad (4)$$

Разработанная схема генерации МЧР нашла подтверждение в феноменологической модели процесса генерации и последующего распространения первичного разряда в полости дефекта. Как оказалось, в реальных условиях излучения ЧР в высоковольтных изоляторах, как полимерных, так и фарфоровых, имеет более сложный характер и до сих пор серьезно практически не изучался [3]. По существу, была сделана первая попытка объяснения генерации МЧР в реальных высоковольтных энергетических системах.

На рисунке 4 представлена разработанная схема фазового распределения приложенного поля E_a , индуцированного предыдущими частичными разрядами поля E_i и суммарного поля E , в пределах одного периода.

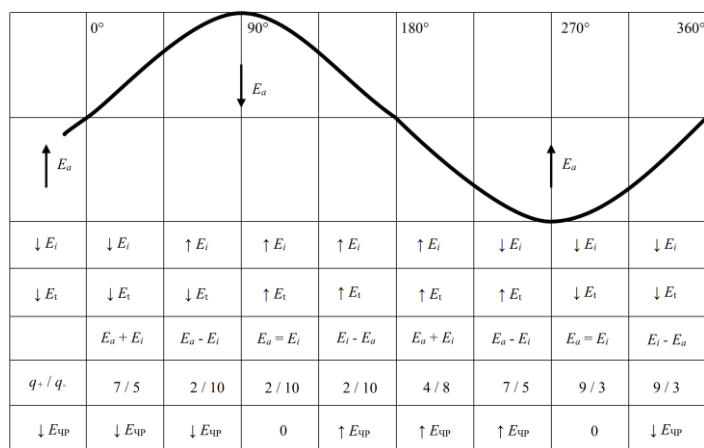


Рис.4. Схема фазового распределения напряженности приложенного поля E_a

Fig.4. Scheme of the phase distribution of the applied field strength E_a

В первой четверти первого полупериода ($0^\circ \leq E_a(\varphi) \leq 45^\circ$) возникновение положительных частичных разрядов обусловлено полем отрицательных зарядов E_i на поверхности диэлектрика, сохранившихся после предыдущего ЧР, если суммарное поле $E_t = (E_a + E_i)$ превышает поле пробоя E_b . На диэлектрических поверхностях полости будут накапливаться положительные заряды из-за поляризации воздушного промежутка. Они частично компенсируют поле E_i и уменьшают количество ЧР с ростом фазы более 20° . При увеличении фазы более 90° поля E_a и E_i уменьшаются, удерживая количество положительных ЧР на низком уровне.

Начиная с фазы $\varphi = 120^\circ$ поле накопленных положительных зарядов на поверхности диэлектрика начинает превосходить не только поле E_a , но и поле пробоя E_b ($E_t = E_j - E_a > E_b$). Начинается генерация отрицательных ЧР до достижения E_a значений,

соответствующей фазовым углам $\varphi = 220^\circ$. В фазовом интервале $180^\circ - 220^\circ$ интенсивность и количество отрицательных ЧР будет значительно превосходить подобные значения для других фазовых интервалов приложенного напряжения, что и наблюдалось в наших измерениях. Ближе к фазовым интервалам $270^\circ - 300^\circ$ начинает снижаться поле E_t и уменьшается количество отрицательных ЧР вследствие накопления свободных электронов и отрицательных ионов на поверхности полостей. Затем при $\varphi \geq 320^\circ$ возникает новый ЧР, создаваемый уменьшением E_a и возрастанием поля отрицательных зарядов, накопленных на поверхности ранее. Общее поле $E_t = (E_i - E_a)$ начинает превосходить поле пробоя E_b и возникают положительные ЧР, продолжающиеся и в начале следующего периода приложенного напряжения. Следовательно, основной причиной генерации ЧР и расположение их в указанных фазовых интервалах для дефекта типа «стержень-оконцеватель» является индуцированное разрядами на поверхности полости диэлектрика поле. Тем более важно, что напряженность E_i может превосходить напряженность приложенного поля E_a . Величину индуцированного разрядами на поверхности полости поля можно оценить по интенсивности ЧР, возникающих в близких к 0° и 180° фазовых интервалах приложенного поля. Были выявлены такие особенности обследованных образцов, как совпадение измеренных с помощью электромагнитного и акустического методов характеристик ЧР, отсутствие ЧР большой интенсивности и наличие узкой полосы мощностных интервалов ЧР. Это говорит о том, что дефекты имеют малые размеры, различия отрицательных и положительных импульсов и сдвиг фаз генерации ЧР (рис.4).

На рис. 5 приведены амплитудно-фазовые характеристики ЧР (АФХ) фарфорового высоковольтного изолятора. Характерной особенностью этого образца является отличие АФХ, полученных электромагнитным и акустическим датчиками, т.к. электромагнитный датчик детектировал незначительное количество положительных ЧР, что может быть связано с меньшим полем положительно заряженных зарядов на поверхности полости, образующей дефект. Малые размеры дефекта, характеризующиеся узкой мощностной полосой генерации ЧР ответственны за малую интенсивность отрицательных ЧР в фазовом интервале $100^\circ - 160^\circ$, поскольку для этого интервала генерация отрицательных ЧР создается за счет зарядового поля на поверхности диэлектрика.

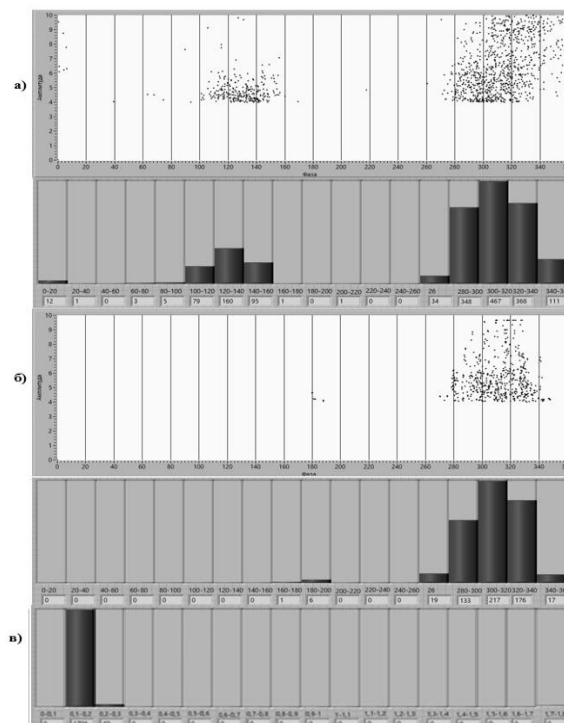


Рис. 5. Амплитудно-фазовая и количественно-фазовая характеристики ЧР, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; в – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности ЧР.

Fig. 5. Amplitude-phase and quantitative-phase characteristics of the PD detected by (a) electromagnetic and (b) acoustic sensors; (c) distribution of the number of PDs depending on the intensity of PDs in porcelain high voltage insulator (sample no. 7).

Для этого образца наблюдаются отличия регистрируемых ЧР и их амплитудно-

фазовых и количественно-фазовых характеристик, получаемых электромагнитным и акустическим методами. Для фазовых интервалов 100° - 140° интенсивности ЧР ниже, чем для интервала 280° - 360° , значит, положительные ЧР акустическим датчиком не регистрируются. Интенсивные положительные импульсы ЧР, создающиеся суммой полей E_a и E_b , обладают частотным спектром вблизи частоты электромагнитного датчика, но выше частоты акустического датчика, поэтому не регистрируются акустически в фазовом интервале 0° - 90° .

Был разработан способ [19] определения технического состояния высоковольтных изоляторов по характеристикам ЧР. Для его обоснования были проведены измерения набора характеристик частичных разрядов на сериях полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторов, содержащих различные виды дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись на испытательном стенде и на подстанциях с помощью электромагнитного приемника. На рис. 6 представлены амплитудно-фазовые характеристики ЧР для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (диаграммы a_1 , a_2 , a_3) и дефекты на контакте «стержень-оконцеватель» (диаграммы b_1 , b_2 , b_3). Диаграммы a_1 и b_1 соответствуют начальному развитию дефектов, не представляющих опасность для эксплуатации ВИ. Диаграммы a_2 и b_2 измерены для ВИ с более развитыми дефектами и содержат МЧР с зарядом $q > 2$ нКл [19]. Для дефектов на стержне они расположены симметрично на положительном и отрицательном фазовых полупериодах высокого напряжения. Для дефектов «стержень-оконцеватель» такие разряды характерны только для отрицательного полупериода. На диаграммах a_3 и b_3 приведены распределения ЧР для образцов с большими дефектами, представляющими опасность для дальнейшей эксплуатации. Для них характерно значительное увеличение количества и заряда МЧР, а также расширение фазовых интервалов их генерации.

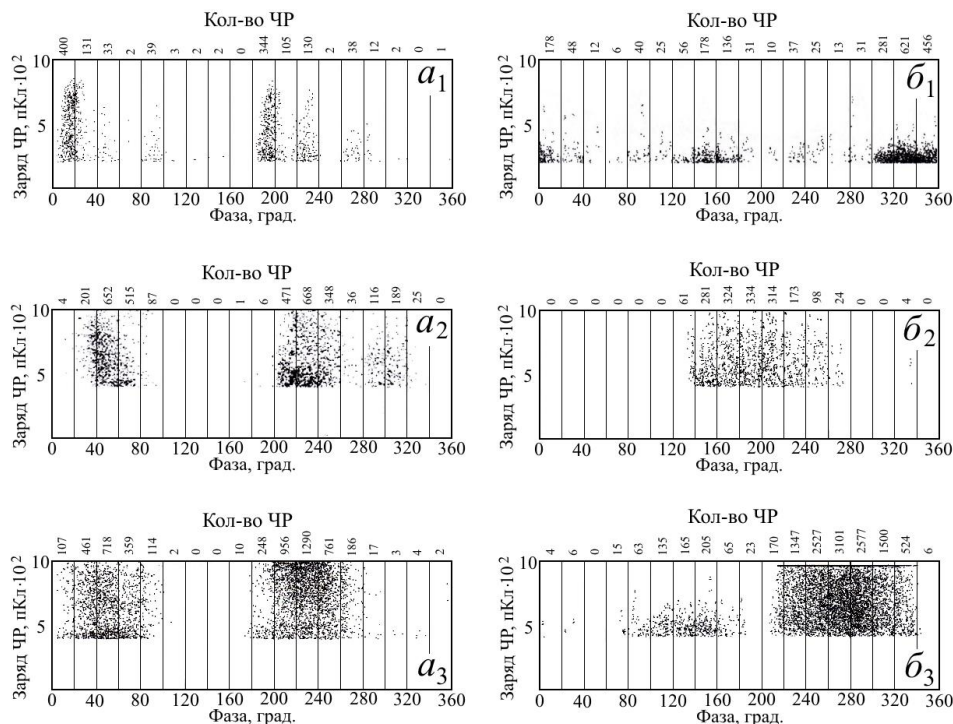


Рис.6. АФХ распределения отдельных частичных разрядов для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (а) и дефекты на контакте «стержень-оконцеватель» (б): 1 – начальное развитие дефектов, 2 – более развитые дефекты, содержащие мощные ЧР, 3 – большие дефекты, представляющие опасность для дальнейшей эксплуатации [19].

Fig.6. Amplitude-phase characteristic of the distribution of individual partial discharges for insulators containing defects on the dielectric rod (a) and defects on the contact "dielectric rod-end fitting" (b): 1 - initial development of defects, 2 - more developed defects containing extra-large PDs, 3 - large defects that pose a danger to further operation

Проведенные измерения развития дефектов ВИ позволили обнаружить сдвиги фазовых углов начала возникновения ЧР при обследовании их с интервалом в три месяца (рис. 7). В результате было установлено возрастание заряда и увеличение

количества ЧР за один фазовый интервал. Это позволяет сделать вывод об увеличении размеров дефектов, на которых возникают мощные ЧР, что не противоречит разработанной электрофизической модели.

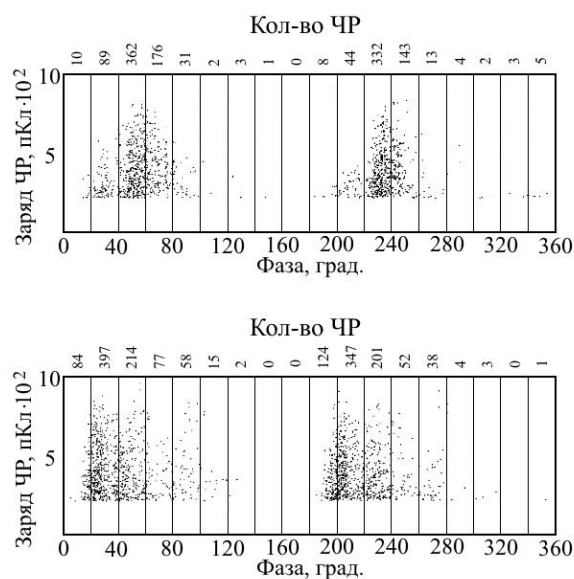


Рис.7. Фазовый сдвиг интервала генерации мощных ЧР в сторону меньших углов.

Fig.7. Phase shift of the generation interval of extra-large PDs towards smaller angles

Обсуждение

Как уже рассматривалось выше, измерениями был установлен ряд ранее неизвестных особенностей совместного использования электромагнитных и акустических датчиков. Так, при регистрации ЧР с интенсивностями не выше 1,0-1,5 нКл их фазовые интервалы совпадали на 90% и выше, а другие отличия касались только интенсивности и количества ЧР, что было вызвано различной чувствительностью датчиков. Однако при детектировании мощных ЧР ($q > 2$ нКл) наблюдались различия в фазовых интервалах МЧР, которые увеличивались с ростом дефектов, ответственных за генерацию ЧР. Примеры таких приведены на рисунке 5.

Причиной тому может быть различия в процессах передачи информации от импульсов ЧР к измерительным датчикам. Первичным процессом при возникновении ЧР является генерация импульсов электромагнитного поля стримерного типа и их распространение в полости дефекта. При этом параметры излучения акустических волн управляются характеристиками механической системы. При представлении дефекта в виде сферы малого радиуса r как простейшего случая при условии $r \ll \lambda_a$, где λ_a – длина акустической волны, полная акустическая мощность W_a равна

$$W_a \approx \frac{\rho_c r^2 V_a}{2\pi}, \quad (5)$$

где ρ_c – волновое сопротивление, V_a – амплитуда колебательной скорости.

Поэтому изменение размеров дефекта в процессе эксплуатации может существенно влиять на мощность акустического излучения. Вторым не менее важным фактором является изменение электрического поля внутри полости за счет накопления зарядов предыдущих ЧР. При этом также будет изменяться плотность индуцированных зарядов в полости дефекта. Таким образом, предложенный эмпирический метод прогнозирования дальнейшего срока службы предполагает использование двух типов датчиков – высокочастотного электромагнитного и акустического датчиков.

Важным элементом в определении диагностических параметров является периодичность их регистрации, которая в основном определяется скоростью развития дефектов. Поскольку сама скорость развития возрастает пропорционально размерам дефектов и приложенным напряжениям, то возникает необходимость в создании физической модели развития дефектов для каждого типа диэлектрических элементов. Сложность решения данной задачи возрастает с использованием для регистрации

характеристик ЧР одновременно нескольких датчиков, например, электромагнитного и акустического. Как указывается в ряде работ [4, 6, 7] наиболее быстроразвивающимися являются именно ЧР, причем периодичность регистрации диагностических параметров высоковольтной изоляции с большими дефектами может ускоряться до 2-х часов.

В результате изучения двух видов ВИ с различными рабочими напряжениями было установлено, что скорость развития дефектов определяется двумя параметрами: значением приложенного к дефектам напряжения и их размерами. Как уже отмечалось выше, оба параметра характеризуются интенсивностью ЧР, количеством за определенные фазовые интервалы регистрации измерений. Об увеличении скорости развития дефекта, как указано в [20], при неизменности рабочего напряжения в сети говорит увеличение размеров дефекта и снижение напряженности поля в области дефекта. До настоящего времени попытка установить такие интервалы дефектов, были сделаны только для сферической формы дефектов в модельных полимерных материалах, но они пока не позволили получить реальные результаты [21]. Поэтому предложен эмпирический метод измерения скорости развития дефектов, основанный на измерении ряда характеристик только для МЧР, как главных источников ускорения процессов старения ВИ.

Выводы

Было установлено, что мощные разряды возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов предыдущими обычными частичными разрядами. Наведенные разряды образуют индуцированные поля (E_i), которые могут значительно превышать приложенные высоковольтные поля (E_a). Мощные разряды возникают при сложении одинаково направленных полей E_i и E_a , что происходит в фазовых интервалах положительного ($0-50^\circ$) и отрицательного ($180^\circ-240^\circ$) полупериодов поля E_a . Количество и интенсивность мощных разрядов возрастают с увеличением размера дефекта и могут составлять 2-6 разрядов за период каждого цикла высокого напряжения с интенсивностью 2-6 нКл [22].

Именно такие мощные разряды вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль над характеристиками мощных разрядов является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов.

В отличие от контактного стендового метода испытания изоляции высоким напряжением измерение интенсивности ЧР, частоты их повторения и фазовый момент возникновения за определенный интервал времени при бесконтактном дистанционном методе связано с большими погрешностями, зависящими от расстояния между датчиком и ВИ, влияния климатических и внешних помех. Эксперименты на реальных ВИ показали, что наиболее важными и достоверными характеристиками ЧР при дистанционном контроле технического состояния полимерных ВИ являются изменения фазовых интервалов, соответствующих наиболее мощным ЧР, интенсивности и частоты повторения, по сравнению с бездефектными ВИ того же типа. Повышение точности таких измерений достигается одновременным использованием нескольких методов: акустического и тепловизионного, электромагнитного и акустического, а также дополнительно оптического с накоплением сигналов ЧР и последующей компьютерной обработкой сигналов. Диагностический прогноз дальнейшего срока технического состояния положительных ВИ возможен на оценке изменения фазовых углов начала ЧР, количества и интенсивности самых мощных импульсов ЧР за длительный период (не менее одного часа, а также в течении месяца) воздействия высокого напряжения. Установление длительного (~ 800 часов) периода изменения таких параметров МЧР в дефектных полимерных ВИ, как возрастание интенсивности и количества разрядов, сдвиг начала разрядов к нулевым или 180° значениям фазы переменного напряжения, могут быть использованы в качестве диагностических параметров при прогнозировании остаточного ресурса ВИ.

Режим мониторинговой диагностики значительно отличается от однократных измерений диагностических параметров, в качестве которых также используются характеристики частичных разрядов. На основе выполненных измерений параметров ЧР контактным и бесконтактным способами с использованием электромагнитного и акустического датчиков, а также электрооптического способа измерения напряженности электрических полей, были установлены необходимые наборы параметров характеристик ЧР и ряда других электрофизических параметров. Причем обоснование использования их для оценки ЧР было дано в последнем ГОСТ и международном

стандарте [23, 24]. Справедливость подобного подхода основана на том обстоятельстве, что большинство отказов высоковольтного оборудования вызвано дефектами, параметры которых наиболее точно регистрируются с помощью характеристик ЧР.

На временном интервале эксплуатации ВИ мониторинг логично разделить на три этапа. На первом следует выполнить измерения диагностических параметров информационного типа, которые необходимы при постановке ВИ в эксплуатацию и дополнения характеристик ЧР от завода-изготовителя. В соответствии с ГОСТ [23, 24] необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения контактным способом с использованием регулируемого источника напряжения. Определение вида и места первоначальных дефектов с не детектируемым уровнем ЧР следует выполнять с помощью электрооптического датчика. Применение электрооптического датчика позволяет точнее их определять, поскольку это наиболее прямой способ, измерять напряженность электрического поля в области дефекта и устанавливать их предельные значения для безопасной эксплуатации ВИ. На первом этапе необходимо получить диагностические параметры информационного типа для конкретного типа изолятора, если они не были ранее получены от завода-изготовителя или после планово-профилактического ремонта. Наиболее сложным на первом этапе является получение нормированных значений такого набора характеристик ЧР, который позволил бы определять техническое состояние ВИ в изменяющихся эксплуатационных условиях. Предварительные исследования ВИ из полимерного и керамического (фарфор) материалов с рабочим напряжением до 110 кВ позволили сделать заключение, что для оценки их технического состояния возможно использование одного набора диагностических параметров ЧР, но с различными нормированными значениями. Однако при измерении параметров характеристик мощных ЧР в ВИ на 110 кВ и выше нужно учитывать, что параметры МЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, начинают различаться пропорционально значениям заряда в них выше 3 - 4 нКл.

Второй этап мониторинга обеспечивает многократные измерения разработанного на первом этапе набора диагностических параметров ЧР, позволяя проводить их сравнение с нормированными значениями, в том числе определение вида и места расположения и степени опасности новых возникших в ходе эксплуатации дефектов. Одной из главных сложностей диагностического контроля ВИ является их многочисленность на ЛЭП и кучность расположения на подстанциях. Эти обстоятельства ограничивают общий объем информации о параметрах ЧР от диагностируемого объекта, поскольку от состояния каждого ВИ зависит работоспособность всей ПС или ЛЭП. Поэтому количество диагностических параметров, измеряемых при мониторинге, вначале следует свести к минимуму. Так при измерении параметров ВИ до 110 кВ в качестве главного критического диагностического параметра следует выделить ВИ, имеющие определенное относительное количество ЧР с зарядом выше 1,8-2 нКл (более 10% от общего количества ЧР за период разового диагностирования). Затем другие параметры ЧР в этих ВИ должны подвергнуться разбору с выделением ЧР, имеющих интенсивность выше 3,5-4 нКл, поскольку именно такие ЧР могут создавать дополнительную деградацию полимеров в области дефектов и способствовать их дальнейшему развитию. Конечно, в этом процессе следует также учитывать относительное количество ВИ, содержащих МЧР. Поскольку определение таких диагностических параметров, как количество и интенсивность ЧР не обладает высокой точностью, то следует использовать в этих случаях дополнительные параметры – различное распределение числа ЧР по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения и расширение фазовых интервалов излучения ЧР. Наличие ЧР при нулевых фазах приложенного напряжения, определение вида, места расположения и их изменения при многократном диагностировании позволяет устанавливать периодичность регистрации диагностических параметров.

Процесс мониторинга технического состояния ВИ уже в настоящее время, возможно, осуществлять посредством автоматизированного измерения основной части текущих диагностических параметров под рабочим напряжением современными техническими средствами с помощью современных компьютерных программ. Однако пока не полностью решенной является задача установления реального остаточного ресурса, поскольку он во многом определяется совокупностью физических процессов, определяющих старение не только полимерных и керамических материалов, но и конструкции всего ВИ в целом. В отсутствии серьезных научных исследований в этом

направлении, эмпирическому решению этой задачи может помочь выполнение диагностического контроля и анализа ВИ после окончания его эксплуатации, что составляет третий заключительный этап мониторинга.

Комплексный метод дистанционного контроля позволяет решать задачи определения технического состояния и остаточного ресурса ВИ в процессе эксплуатации и представляет собой инструмент для решения широкого круга практических задач, прошедший апробацию в промышленности и учебном процессе в ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Литература

1. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Effect of partial discharges on the operating condition of highvoltage insulators // E3S Web of Conferences. 2019. 124. pp. 03001. doi 10.1051/e3s.
2. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment // E3S Web Conf., 288 (2021). pp 01088.
3. M. Borghei, M. Ghassemi, J. M. Rodríguez-Serna and R. Albarracín-Sánchez. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. V. 36. no. 4, pp. 2570-2581.
4. L. Niemeyer. A generalized approach to partial discharge modeling // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. V. 2. no. 4. pp. 510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание. 3-е изд. перераб. и доп. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.
6. C. Pan, G. Chen, J. Tang and K. Wu. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. V. 26. no. 3. pp. 981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.
7. K. Wu, C. Pan, Y. Meng and Y. Cheng. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20, no. 2. pp. 612-619. doi: 10.1109/TDEI.2013.6508765.
8. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. Патент № 2679759 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов: № 2018110016: заявл. 21.03.2018; опубл. 12.02.2019 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».
9. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No 8. P. 596-602.
10. A. Villa, L. Barbieri, R. Malgesini, A. R. Leon-Garzon. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability // Journal of Applied Physics 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.
11. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. No. 24. P. 245202.
12. Cheng Pan, Yongpeng Meng, Kai Wu, Zenghui Han, Kai Qin and Yonghong Cheng. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44, N. 25. 255201.
13. F. Gao, Q. Wang, D. Dai, W. Ning, Y. Zhang and L. Li. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions // Journal of Physics D: Applied Physics, 2020. V. 53, N. 34, 345202.
14. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Комплексная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 12. С. 1651-1654. doi 10.1134/S0367676519120068.
15. Овсянников А.Г., Коробейников. С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. 2014. №8. С. 37-43.
16. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 89-93.
17. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation // Energies. 2021. 14 (18). С. 5670.

doi:10.3390/en14185670.

18. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в условиях эксплуатации: диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.13 / Марданов Георгий Дамирович; [Место защиты: Казан. гос. энергет. ун-т]. Казань, 2019. 98 с.

19. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И. Дистанционно измеряемые диагностические параметры, позволяющие оценивать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов, Д. А. Иванов, Р. И. Калимуллин, А. В. Семенников // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т.84. №12. С.1763-1766. doi 10.31857/S0367676520120224.

20. T. Tanaka. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1986. V. EI-21. no. 6. pp. 899-905. doi: 10.1109/TEI.1986.348999.

21. P.H.F. Morshuis. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. V. 12. no. 5. pp. 905-913. doi: 10.1109/TDEI.2.

22. Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Голенищев-Кутузов А.В., и др. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6(180). С. 48-55. doi 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55.

Авторы публикации

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Effect of partial discharges on the operating condition of highvoltage insulators*. E3S Web of Conferences. 2019. 124.P. 03001. doi 10.1051/e3s.

2. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment*. E3S Web Conf., 288 (2021).P. 01088.

3. M. Borghei, M. Ghassemi, J. M. Rodríguez-Serna and R. Albarracín-Sánchez. *A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2021;36(4):2570-2581.

4. L. Niemeyer. *A generalized approach to partial discharge modeling*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.1995;2(4):510-528, Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.

5. Raiser YuP. *Physics of the gas discharge*. Scientific publication. Raiser Yu.P. 3rd ed. revised. and additional. Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2009. 736 p.

6. C. Pan, G. Chen, J. Tang and K. Wu. *Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019;26(3):981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.

7. K. Wu, C. Pan, Y. Meng and Y. Cheng. *Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.2013;20(2):612-619. doi: 10.1109/TDEI.2013.6508765.

8. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA. Patent No. 2679759 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/12. *Method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators* : No. 2018110016 : Appl. 03/21/2018 : publ. February 12, 2019. applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University».

9. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA. *Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators*. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(8):596-602.

10. Villa A, Barbieri L, Malgesini R, A. R. Leon-Garzon. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability. *Journal of Applied Physics* 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

11. Illias HA, Chen G, Lewin PL. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events . *Journal of Physics D: Applied*

Physics. 2011;44(24):245202.

12. Cheng Pan, Yongpeng Meng, Kai Wu, Zenghui Han, Kai Qin and Yonghong Cheng. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011;44(25):255201.

13. F. Gao, Q. Wang, D. Dai, W. Ning, Y. Zhang and L. Li. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020;53(34):345202.

14. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Complex Diagnostics of Defects in High-Voltage Insulators. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019;83(12):1490-1493. doi 10.3103/S1062873819120062.

15. Ovsyannikov AG, Korobeinikov SM, Vagin DV. Communication of apparent and true charges of partial discharges. *Electricity*. 2014;8:37-43.

16. Golenishchev-Kutuzov A.V, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Complex method of remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;5-6:87-93.

17. Ivanov DA, Sadykov MF, Yaroslavsky DA, et al. *Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation* Energies. 2021;14(18):5670. doi:10.3390/en14185670.

18. *Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators under operating conditions*: dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.11.13 / Mardanov Georgy Damirovich; [Place of protection: Kazan state power engineering university]. Kazan, 2019. 98 p.

19. Golenishchev-Kutuzov AV. Ivanov DA, Kalimullin RI, et al. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2020;84(12):1502-1504. doi 10.3103/S1062873820120229.

20. Tanaka T. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1986;EI-21(6):899-905. doi: 10.1109/TEI.1986.348999.

21. P.H.F. Morshuis. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005;12(5):905-913. doi: 10.1109/TDEI.2.

22. Ivanov DA, Galiyeva TG, Golenishchev-Kutuzov AV .Detection of acoustic signals of partial discharges on defects in insulating equipment. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021;6 (180):48-55. doi 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55.

Authors of the publication

Dmitry A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

25.02.2022г.

Отредактировано

11.03.2022г.

Принято

18.03.2022г.

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 531.01

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-2-147-159

МОДЕЛЬ ОПОРНОЙ НОГИ АНТРОПОМОРФНОГО РОБОТА ИЛИ ЭКСОСКЕЛЕТА С ДВУМЯ ПОДВИЖНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.О. Блинов, А.В. Борисов, Л.В. Кончина, К.С. Маслова

филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия

ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Резюме: В настоящее время направление, связанное с разработкой экзоскелетов и антропоморфных роботов, испытывает бурный рост в связи с увеличением вычислительных мощностей микропроцессоров и прорывным развитием теории управления сложными системами, в том числе электромеханическими, моделирующими биомеханику опорно-двигательного аппарата человека. В данной работе представлена управляемая мехатронная робототехническая модель опорной ноги антропоморфного робота или экзоскелета с двумя подвижными звеньями. **ЦЕЛЬ.** Математическое моделирование динамики опорной ноги экзоскелета или антропоморфного механизма в виде двух подвижных звеньев. **МЕТОДЫ.** Основное отличие представленной в данном исследовании модели от созданных ранее заключается в использовании углов, отсчитываемых между звеньями, соответствующих случаю реальной работы электроприводов. Для достижения цели работы применены методы робототехники, математического моделирования, мехатроники, теоретической механики, исследования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, теории управления, эмпирические данные для опорно-двигательного аппарата человека. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для модели механизма записана система уравнений Лагранжа второго рода, решены прямая и обратная задачи динамики при заданном программном управлении движением мехатронной робототехнической системы. Результаты представлены графически и в виде анимационной визуализации движения звеньев. Проведены расчеты как без учета динамики электроприводов, так и с учетом вращения роторов электродвигателей. Установлено, что влияние динамики ротора электродвигателя на механизм является существенным. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Разработанные методы задания программного движения опорной ноги экзоскелета или антропоморфного робота позволили решить прямую и обратную задачи динамики и установить необходимость учета вращающегося ротора электродвигателя.

Ключевые слова: экзоскелет; опорно-двигательный аппарат человека; антропоморфный робот; шарнир; звено; угол поворота; уравнения движения; управляющие моменты; электропривод.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Смоленской области в рамках научного проекта № 22-29-20308, <https://rscf.ru/project/22-29-20308/>

Для цитирования: Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Маслова К.С. Модель опорной ноги антропоморфного робота или экзоскелета с двумя подвижными звеньями с учетом динамики электропривода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 147-159. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-147-159.

MODEL OF THE SUPPORTING LEG OF AN ANTHROPOMORPHOUS ROBOT OR EXOSKELETON WITH TWO MOVABLE LINKS TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF THE ELECTRIC DRIVE

AO. Blinov, AV. Borisov, LV. Konchina, KS. Maslova

Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Abstract: Currently, the direction associated with the development of exoskeletons and anthropomorphic robots is experiencing rapid growth due to the increase in the computing power of microprocessors and the breakthrough development of the theory of control of complex systems, including electromechanical systems that simulate the biomechanics of the human musculoskeletal system. This paper presents a controlled mechatronic robotic model of the support leg of an anthropomorphic robot or exoskeleton with two moving links. **GOAL.** Mathematical modeling of the dynamics of the supporting leg of an exoskeleton or an anthropomorphic mechanism in the form of two moving links. **METHODS.** The main difference between the model presented in this study and those created earlier is the use of angles counted between links corresponding to the case of real operation of electric drives. To achieve the goal of the work, the methods of robotics, mathematical modeling, mechatronics, theoretical mechanics, the study of systems of ordinary differential equations, control theory, empirical data for the human musculoskeletal system were applied. **RESULTS.** For the model of the mechanism, a system of Lagrange equations of the second kind is written, direct and inverse problems of dynamics are solved for a given program control of the motion of a mechatronic robotic system. The results are presented graphically and as an animated visualization of the movement of the links. Calculations were carried out both without taking into account the dynamics of electric drives, and taking into account the rotation of the rotors of electric motors. It has been established that the influence of the dynamics of the rotor of the electric motor on the mechanism is significant. **CONCLUSION.** The developed methods for setting the program movement of the supporting leg of an exoskeleton or an anthropomorphic robot made it possible to solve direct and inverse problems of dynamics and establish the need to take into account the rotating rotor of an electric motor.

Keywords: exoskeleton; human musculoskeletal system; anthropomorphic robot; hinge; link; angle of rotation; equations of motion; control moments; electric drive.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation and Smolensk region № 22-29-20308, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20308/>

For citation: Blinov AO, Borisov AV, Konchina LV, Maslova KS. Model of the supporting leg of an anthropomorphous robot or exoskeleton with two movable links taking into account the dynamics of the electric drive. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(2):147-159. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-147-159.

Введение

Проблемы разработки механических систем с изменяемой геометрией и связями становятся востребованными для реализации движения систем твердых тел под действием внутренних источников энергии и наложенных внутренних и внешних связей, которые обеспечивают преобразование внутренней энергии в целенаправленное движение. Создание полностью или частично автономных механических систем с изменяемой геометрией и связями – сложная задача механики и теории управления. В настоящее время разработаны различные модели механических систем антропоморфного типа и методы управления ими.

Научная значимость исследования заключается в создании методов моделирования антропоморфных электромеханических систем с управляемым изменением геометрии под действием внутренних усилий в виде моментов от электроприводов и внешних связей применительно к биомеханике движений человека в экзоскелете и антропоморфных

роботов с использованием углов, отсчитываемых между звеньями и синтезе новых алгоритмов управления целенаправленным движением.

Практическая значимость исследования заключается в создании комфортной окружающей среды для лиц с ограниченными двигательными возможностями. Экзоскелеты, являясь высокотехнологичной продукцией робототехники, позволят вернуть инвалидов к полноценной жизни, повысить их социальную и физическую адаптацию, эффективность работы организма в целом за счет вертикализации положения тела. В этом плане экзоскелет имеет не только медицинское, но важное и социально-экономическое значение, позволяя социализировать в обществе и вернуть к активной полноценной трудовой деятельности инвалидов, ранее не имевших такой возможности. Применение экзоскелетов возможно в восстановительных и геронтологических центрах России для лечебного процесса пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата и для их использования медицинскими сестрами и врачами при уходе за лежащими больными. Экзоскелеты могут использоваться в быту и промышленности для улучшения качества жизни и работы людей, в тренировочном процессе, повышая спортивные достижения спортсменов нашей страны. При налаживании собственного производства в стране, массовое изготовление экзоскелетов приведет к развитию машиностроительного комплекса, электроники и других смежных областей отечественной промышленности.

Литературный обзор

Вопросами управления механическими системами занимаются как у нас в стране, так и за рубежом. В работе Виттенбурга Й. [1] рассматриваются вопросы динамики систем твердых тел. В исследованиях Вукобратовича М. решаются задачи управления манипуляционными и антропоморфными роботами [2, 3]. Работы Коренева Г.В. посвящены исследованию целенаправленного движения, в том числе и применительно к человеку [4, 5]. Обратные задачи динамики и управление движением механических систем рассматривались Галиуллиным А.С. [6]. Вопросам управления движением неустойчивых объектов, в том числе перевернутого маятника, посвящена работа Формальского А. М. [7]. Методы управления сложными нелинейными механическими системами рассмотрены в работах Черноусько Ф.Л., Ананьевского И.М., Решмина С.А., Болотника Н.Н. [8, 9]. Вопросы управления и стабилизации движений механических систем применительно к динамике экзоскелетов представлены в работах Борисова А.В., Мухарлямова Р.Г. Каспировича И.Е. [10-13]. Решение задач управления механическими системами можно найти в работах Борисова А.В., Розенблата Г.М., Кончиной Л.В. [14-16].

Практические исследования на данный момент наиболее активно ведутся в двух направлениях: 1) создание экзоскелетов; 2) создание антропоморфных роботов.

Над антропоморфными механизмами работают американские инженеры и ученые, многие при участии *DARPA* [17]. Так, в Массачусетском технологическом институте (MIT) совместно с *DARPA* [18] реализуется проект *DARPA Robotics Challenge*, в рамках которого разработан антропоморфный робот. В лаборатории *Boston Dynamics* [19] разрабатывается антропоморфный робот *Atlas* [20]. Модель управления роботом *Atlas* учитывает движения рук, корпуса и ног для манипуляций всем телом. Способность робота *Atlas* балансировать всем механизмом, как единым целым, позволяет ему выполнять требуемые задачи в пространстве, занимая лишь небольшую площадь. В Южной Корее создан антропоморфный робот *DRC-Hubo* [21], способный ходить на двух ногах, подниматься по лестницам и т.д., выполнять заданные действия. Его особенностью является наличие небольших колес на передней стороне «голени» в районе «коленки» и «стопы». Благодаря им, став на «колени», этот робот может достаточно быстро перемещаться по ровной поверхности. При возникновении необходимости преодоления препятствия он встает с «колен» на «ноги». В Японии много фирм занимаются разработкой антропоморфных роботов. Так, компания *Honda* создала робота-гуманоида *Asimo* [22]. Также разработаны вспомогательные устройства *Stride Management Assist* и *Bodyweight Support Assist*, облегчающее нагрузку на ноги человека во время ходьбы или выполнения трудовых операций [23]. Компания *Toyota* представила *Romeo robot* [24] на платформе антропоморфного робота *NAO* для использования в медицинских и геронтологических центрах при уходе за пациентами и пожилыми людьми. Также робот может применяться как личный помощник [25]. Фирма *Hocoma* [26] из Швейцарии создала мехатронное устройство Локомат (*Lokomat*),

представляющий собой роботизированный экзоскелет. Он применяется при реабилитации и восстановлении пациентов, имеющих заболевания опорно-двигательного аппарата. Компания Honda разработала вспомогательное робототехническое устройство *Honda–Walk Assist And Mobility Devices* [27]. Это портативный экзоскелет, который состоит из талии, являющейся рамой, к которой прикрепляются с обеих сторон бедра, предоставляющие по одной степени свободы. Фирма *Ekso Bionics* создала экзоскелет *Ekso* [28,29], представляющий собой бионический костюм, который позволяет людям с проблемами опорно-двигательного аппарата не только стоять, но и ходить. Эволюцией экзоскелетов являются мехатронные роботы, созданные *Kazerooni H.* [30]. Компания *ReWalk Robotics* создала роботизированный экзоскелет, который имеет четыре звена. Он программируется для заданного типа походки, чтобы реализовывать необходимую тренировку мышц пользователя [31]. Фирма *Rex Bionics Group* разработала мехатронный экзоскелет *Rex* [32], который реализует поддержку всей массы тела пользователя при равновесии без применения трости для дополнительной опоры.

Обзор имеющихся в настоящее время в открытом доступе моделей роботизированных экзоскелетов показывает, что пока не имеется управляемых моделей с углами, отсчитываемыми между звеньями, учитывающих динамику вращающегося ротора электродвигателя.

Материалы и методы

Рассмотрим робототехническую мехатронную модель механизма в виде опорной ноги экзоскелета, которая состоит из двух подвижных звеньев. Углы отсчитываются между звеньями и описываются тремя системами координат – абсолютной и локальными (рис. 1). Введем абсолютную неподвижную декартову систему координат A_0xyz , с плоскостью xA_0y , в которой происходит движение опорной ноги экзоскелета (рис. 1). Для описания движения первого, нижнего звена A_0A_1 введем подвижную локальную систему координат $A_0x_1y_1$, жестко связанную со звеном. Подвижную ось A_0x_1 направим вдоль звена, ось A_0y_1 введем, исходя из условия правого базиса. Аналогично локальная система координат вводится для второго звена. В отличие от предыдущих работ [14-16,33-37], углы отсчитываются между звеньями, т.е. между осями локальных систем координат против хода часовой стрелки от звена с меньшим номером, к звену с большим номером, а в случае первого звена – от абсолютной неподвижной системы координат к подвижной локальной системе, жестко связанной с первым звеном.

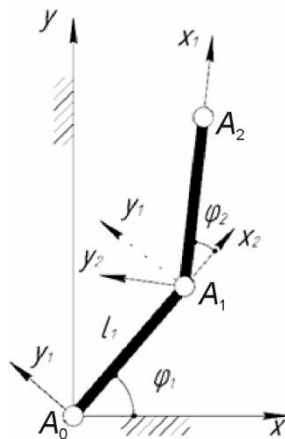


Рис. 1. Модель механизма с двумя подвижными звеньями и локальными системами координат, движущегося в вертикальной плоскости

Fig. 1. Model of a mechanism with two moving links and local coordinate systems moving in a vertical plane

Рассматриваемая модель механизма состоит из весомих звеньев, представляющих собой стержни (рис. 1). Звенья соединяются между собой посредством цилиндрических шарниров, расположенных в точках A_0 и A_1 . В точке A_0 имеется цилиндрический шарнир жестко соединенный с опорой. Учитывая силу тяжести, реакции опоры и соседних стержней, а также внутренние управляющие усилия реализуются относительные повороты звеньев между собой вокруг каждой из осей координат, тем самым, при заданном должным образом управлении может быть реализовано требуемое движение всего механизма.

Длины звеньев: $A_0A_1 = l_1$, $A_1A_2 = l_2$, представляющие собой прямолинейные стержни,

считаются неизменными во все время движения при любых прикладываемых усилиях. Масса первого звена A_0A_1 равна m_1 , второго звена A_1A_2 равна m_2 . Так как в выбранной модели механизма звенья представляют собой абсолютно твердые весомые стержни, то моменты инерции для них будут определены, как моменты инерции однородных твердых стержней. Тогда у первого звена A_0A_1 момент инерции относительно оси, которая проходит через точку A_0 перпендикулярно плоскости его движения $x_1A_0y_1$, обозначим I_1 . В силу однородности стержня $I_1 = m_1 l_1^2 / 3$. Аналогично вводится момент инерции для второго звена механизма относительно оси, проходящей через начало стержня.

Первое звено A_0A_1 совершает вращательное движение в цилиндрическом шарнире A_0 . Положение звена зависит от одного параметра и однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$. Обозначим через M_1 управляющий момент в шарнире A_0 .

Положение второго звена A_1A_2 , совершающего плоскопараллельное движение, зависит от движения точки A_1 , которую примем за полюс, и дополнительно от одного параметра – угла $\varphi_2(t)$. Управляющий момент, развиваемый в шарнире A_1 , обозначим через M_2 .

Обобщенными координатами, которые однозначно характеризуют положение опорной ноги экзоскелета на плоскости, являются углы между осями координат (рис. 1): $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$. Предложенная модель опорной ноги экзоскелета имеет две степени свободы. Чтобы реализовать управляемое движение необходимо использовать два независимых привода – для управления углом поворота каждого звена. Приводы могут быть различными: гидравлическими, пневматическими, электрическими. В дальнейшей работе предполагается использовать электрические двигатели. Для управления угловыми координатами электродвигатели будут работать в паре с редукторами, понижающими обороты и увеличивающими крутящие моменты.

Кинетическая энергия опорной ноги экзоскелета складывается из энергий движения стержней A_0A_1 , и A_1A_2 .

$$T = T_{A_0A_1} + T_{A_1A_2} = \frac{1}{2} \cdot [(I_1 + I_2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 + (2I_2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + I_2 \dot{\varphi}_2^2] \quad (1)$$

Выражение для кинетической энергии (1) получено следующим образом. Так как звено A_0A_1 вращается около неподвижной оси, находящейся в цилиндрическом шарнире A_0 , то его кинетическая энергия равна: $T_{(A_0A_1)} = I_1 \dot{\varphi}_1^2 / 2$. Вследствие того, что звено A_1A_2 совершает плоскопараллельное движение с полюсом A_1 , кинетическая энергия вычисляется по формуле, приводящейся в работах [35, с. 157 и 48, с. 21]. Запишем эту формулу, в виде удобном для реализации в системе компьютерной математики *Wolfram Mathematica*.

$$T_{A_1A_2} = \frac{1}{2} \cdot [m_2 (x_{A_1}^2 + y_{A_1}^2) + 2m_2 \begin{vmatrix} \dot{x}_{A_1} & \dot{y}_{A_1} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 \\ r_x & r_y & 0 \end{vmatrix} + I_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2] \quad (2)$$

Здесь x_{A_1} , y_{A_1} – координаты точки A_1 , являющейся полюсом для рассматриваемого звена A_1A_2 ; r_x , r_y – проекции радиус-вектора центра масс звена A_1A_2 относительно полюса A_1 , I_2 – момент инерции звена относительно полюса, т.е. момент инерции стержня относительно его начала.

Формулу для кинетической энергии звена A_1A_2 механизма можно получить, используя метод суммирования кинетических энергий бесконечно малых участков стержня, предложенный в работах [15,16,33].

$$T_{A_1A_2} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{l_2} V_x^2 \rho_2 d\chi \quad (3)$$

где χ – координата бесконечно малой частицы звена A_1A_2 ; ρ_2 – плотность материала, из которого изготовлено звено A_1A_2 ; V_x^2 – квадрат скорости бесконечно малой частицы звена A_1A_2 , вычисляемый относительно начала координат – точки A_0 .

Оба описанных метода подсчета кинетической энергии были реализованы в системе компьютерной математики *Wolfram Mathematica* и получено совпадение результатов, что гарантирует правильность вычисления кинетической энергии звена, совершающего плоскопараллельное движение с использованием углов между звеньями и локальных систем координат.

Используя уравнения Лагранжа второго рода, составлена система дифференциальных уравнений для модели опорной ноги экзоскелета с двумя подвижными звеньями и углом, отсчитываемым между ними:

$$(I_1 + I_2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + (I_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 (\sin \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - m_2 l_1 l_2 (\sin \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} g [(m_1 + 2m_2) l_1 \cos \varphi_1 + m_2 l_2 \cos (\varphi_1 + \varphi_2)] = M_1 - M_2, \quad (4)$$

$$(I_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + I_2 \ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} g m_2 l_2 \cos (\varphi_1 + \varphi_2) = M_2$$

Определим необходимые для задания антропоморфного движения рассматриваемых двух звеньев управляющие моменты. Они необходимы также для выбора электродвигателей с редукторами. Для этого используем систему дифференциальных уравнений движения (4). Считаем, что моделируется голень и бедро опорной ноги человека. Определим аналитически углы между звеньями, т.е. локальными системами координат в виде периодических функций, задающих антропоидное движение двух рассматриваемых звеньев механизма в абсолютной неподвижной системе координат.

$$\varphi_1(t) = \frac{\pi}{2} + j_1 \sin \left[f_1 - (1 - \cos [2\pi t / T]) \frac{\pi}{2} \right],$$

$$\varphi_2(t) = j_2 \cos \left[f_2 - \pi (1 - \cos [2\pi t / T]) \frac{\pi}{2} \right] - j_1 \sin \left[f_1 - (1 - \cos [2\pi t / T]) \frac{\pi}{2} \right] \quad (5)$$

где: T – период ходьбы, j_1, j_2 и f_1, f_2 – параметры ходьбы.

Выберем числовые характеристики механизма соответствующими значениям для голени и бедра человека, информация о которых приводится в монографии [37]. Длина голени $l_1 = 0.385$ м, бедра $l_2 = 0.477$ м, масса голени $m_1 = 2.91$ кг, бедра $m_2 = 8.93$ кг. Момент инерции звена определим, исходя из формулы момента инерции стержня для оси, проходящей перпендикулярно через его конец $I_i = \frac{m_i l_i^2}{3}$ ($i = 1, 2$). Момент инерции голени

$I_1 = 0.144$ кг·м², бедра $I_2 = 0.677$ кг·м². Ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с². Время, в течение которого происходит одноопорная фаза шага, т.е. половина периода ходьбы $t_k = 0.36$ с. Параметры ходьбы: $j_1 = j_2 = 0.25$, $f_1 = \pi/2$, $f_2 = 0.687$.

Графики углов поворота звеньев (5) и их угловых скоростей и ускорений представлены на (рис. 2).

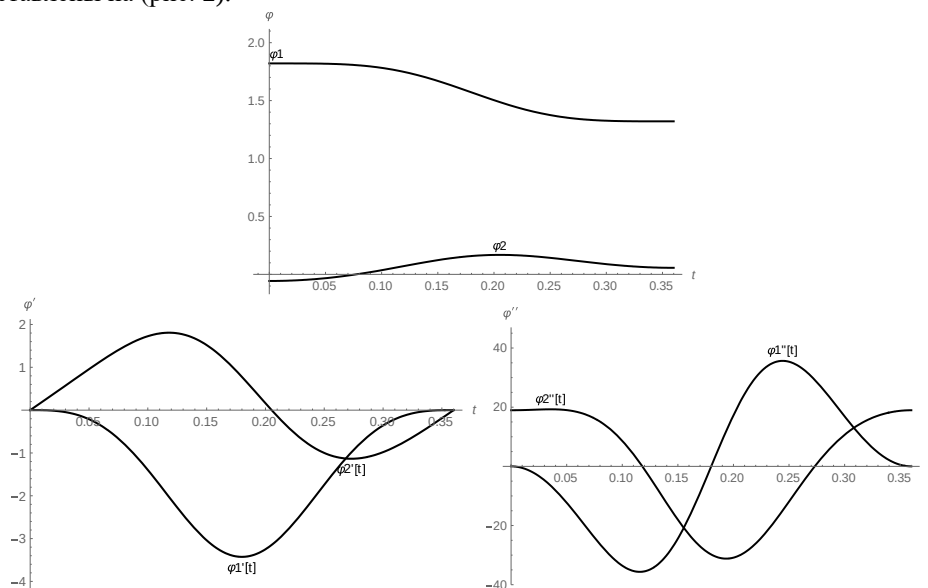


Рис. 2. Зависимости углов поворота φ_1, φ_2 , угловых скоростей $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ и угловых ускорений $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ звеньев от времени

Fig. 2. Dependences of rotation angles φ_1, φ_2 , angular velocities $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ and angular accelerations $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ of links on time

Приведем несколько кадров анимации движения двух звеньев (рис. 3).

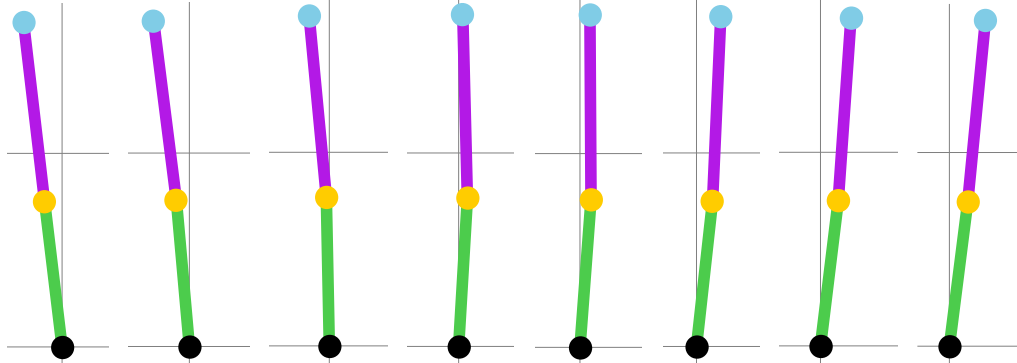


Рис. 3. Кадры анимации двух звеньев при движении с заданными формулами (5) углами φ_1, φ_2

Fig. 3. Animation frames of two links when moving with the given formulas (5) angles φ_1, φ_2

Из системы уравнений движения (4), решив обратную задачу динамики, находим управляющие моменты $M_1(t)$ и $M_2(t)$ для приводов опорной ноги экзоскелета, расположенных в шарнирах A_0 и A_1 (рис. 4).

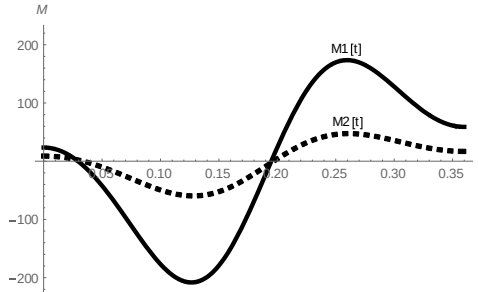


Рис. 4. Зависимости управляющих моментов M_1 и M_2 от времени

Fig. 4. Dependences of control moments M_1 and M_2 on time

Максимальные абсолютные значения управляющих моментов $M_1 = 208.218$ Н·м и $M_2 = 59.566$ Н·м используем для подбора электродвигателей и редукторов. Управляющие моменты M_1, M_2 – это моменты на выходном валу редуктора.

Проведем решение задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (4) с выбранными моментами, аппроксимируем ступенчатой кусочно-заданной функцией. Разобьем время движения на шесть равных участков, на каждом из которых момент будем брать постоянным. Значения моментов подсчитаем, как среднее арифметическое на заданных участках:

$$M_{\gamma} = \frac{\int_{t_{\gamma-1}}^{t_{\gamma}} M_1(t) dt}{t_{\gamma} - t_{\gamma-1}} \quad (6)$$

Графики в виде ступенчатых функций для управляющих моментов, полученных в результате решения обратной задачи (рис. 4), представлены на (рис. 5).

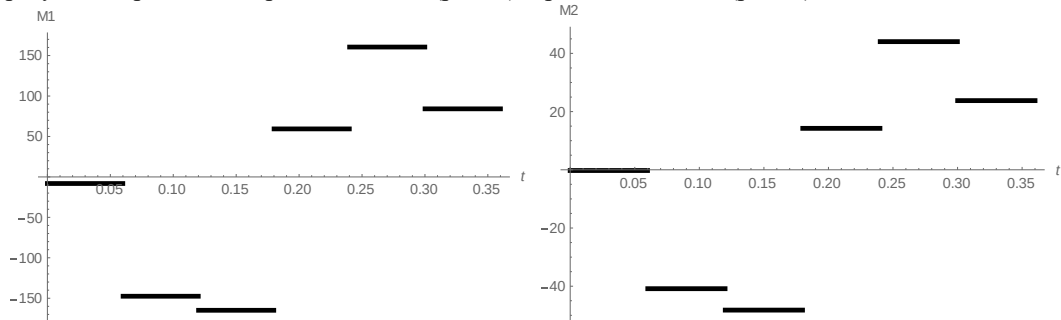


Рис. 5. Зависимости управляющих моментов $M_1(t)$ и $M_2(t)$ в виде кусочно-заданных функций

Fig. 5. Dependences of control moments $M_1(t)$ and $M_2(t)$ in the form of piecewise given functions

Результаты и обсуждения

Решая задачу Коши для системы (4) с управляющими моментами в виде ступенчатой функции, представленным на (рис. 5), получены графики угла поворота звена от времени, показанные на (рис. 6).

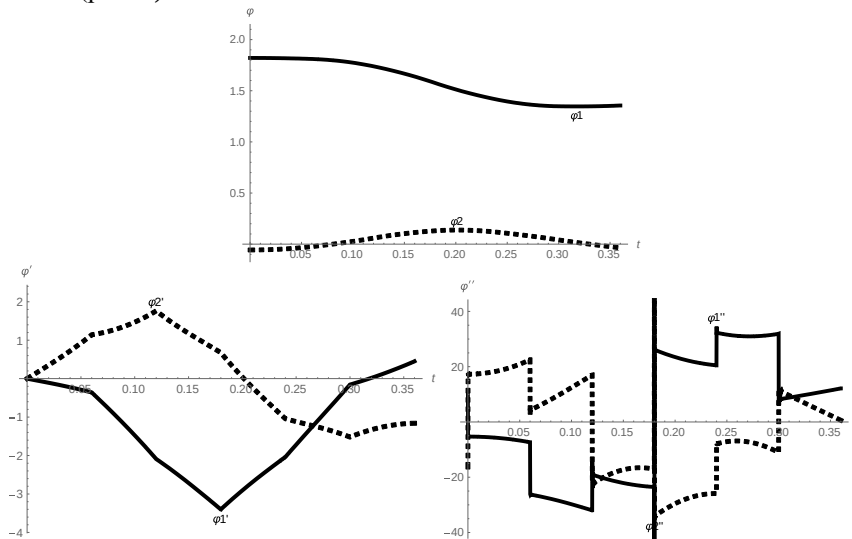


Рис. 6. Решение задачи Коши для механизма с двумя звеньями: углы поворота ϕ_1, ϕ_2 ; угловые скорости $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$; угловые ускорения $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2$ звеньев

Fig. 6. Solution of the Cauchy problem for a mechanism with two links: angles of rotation ϕ_1, ϕ_2 ; angular speeds $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$; angular accelerations $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2$ of links

В результате численного решения системы дифференциальных уравнений (4), сравнивая с исходным движением звеньев (рис. 2), видно, что получилось хорошее совпадение угла поворота звеньев, достаточно хорошее совпадение угловой скорости и приемлемое совпадение углового ускорения. Следовательно, импульсное управление в виде ступенчатых функций для управляющих моментов (рис. 5) является приемлемым и может быть использовано при управлении движением звена.

Затраты энергии при анализе антропоморфной ходьбы можно вычислить, как работу управляющих моментов в предположении об отсутствии сил сопротивления и рекуперации энергии при торможении звена.

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^k |M_i| dt \quad (7)$$

В результате применения формулы (6) к расчету энергетических затрат приводов, осуществляющих повороты звеньев при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций (рис. 4), имеем: $A_{\phi_1} = 104.119$ Дж, $A_{\phi_2} = 28.56$ Дж. Суммарные энергозатраты механизма составили 132.68 Дж.

Рассмотрим электромеханическую модель привода двух звеньев, состоящую из электродвигателей с редукторами, расположенными в неподвижном шарнире A_0 и подвижном A_1 . Пусть оси вращения звеньев и роторов двигателей расположены на одной прямой. Рассмотрим влияние инерционных характеристик двигателей на систему дифференциальных уравнений движения (4) [38]. Так как в точке с шарниром A_0 двигатель с редуктором жестко закреплены и неподвижны, то их масса не дает вклад в кинетическую энергию движения звена, и он не перемещается вдоль вертикали, его элементы не дают вклада в потенциальную энергию гравитационного взаимодействия. В подвижном шарнире A_1 установлен второй привод, следовательно, масса электродвигателя и редуктора должны учитываться в кинетической и потенциальной энергии. Подвижными относительно корпуса, скрепленного с опорой либо с предыдущим звеном, являются роторы электродвигателей, совершающие в данном случае вращательное движение вокруг осей, расположенных в точках A_0 и A_1 . Вклад вращающихся роторов в кинетическую энергию всей электромеханической системы учтем следующим образом:

$$T_{R_i} = \frac{I_{R_i} k_{R_i}^2 \dot{\phi}_i^2}{2} \quad (i = 1, 2), \quad (8)$$

где I_{R_i} – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_{R_i} – передаточное число редуктора, номер 1 относится к приводу в шарнире A_0 , номер 2 – в шарнире A_1 .

Вкладом в кинетическую энергию вращающихся элементов редуктора пренебрежем, т.к. конструкции редукторов бывают разными и здесь не конкретизируются, но обычно их масса и момент инерции гораздо меньше, чем у ротора электродвигателя. Также пренебрежем трением в подшипниках всех вращающихся элементов механизма.

Составленная с применением уравнений Лагранжа второго рода система дифференциальных уравнений с учетом наличия электроприводов и вращения роторов в электродвигателе, для модели опорной ноги экзоскелета с двумя подвижными звеньями и углом, отсчитываемым между звеньями, имеет вид:

$$\begin{aligned} & \left(I_1 + I_{R_1} k_{R_1}^2 + I_2 + m_2 l_1^2 + m_{E_2} l_1^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 \right) \ddot{\varphi}_1 + \left(I_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 \right) \ddot{\varphi}_2 - \\ & - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 (\sin \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - m_2 l_1 l_2 (\sin \varphi_2) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 + \\ & + \frac{1}{2} g \left[(m_1 + 2m_2 + 2m_{E_2}) l_1 \cos \varphi_1 + m_2 l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right] = M_1 - M_2, \\ & \left(I_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos \varphi_2 \right) \ddot{\varphi}_1 + \left(I_2 + I_{R_2} k_{R_2}^2 \right) \ddot{\varphi}_2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin \varphi_2 \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} g m_2 l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) = M_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Управляющие моменты M_1 и M_2 – это моменты на выходном валу редуктора, определенные выше из системы уравнений (4), m_{E_2} – масса всего электропривода в целом в шарнире A_1 , управляющим поворотом второго звена, т.е. изменением угла φ_2 . Сравнивая системы уравнений (4) и (9) видно, что структура уравнений не изменилась, только добавились некоторые новые слагаемые у угловых ускорений и силы тяжести.

Решим задачу Коши (рис. 7) для системы уравнений, учитывающих динамику электропривода (9) с решением, представленным на (рис. 6), полученным на основе моментов, аппроксимированных в виде ступенчатых кусочно-заданных функций (рис. 5). Исходя из максимальных значений момента нагрузки и скорости, в качестве примера выбираем подходящие электродвигатель и редуктор из номенклатуры выпускаемых в настоящее время. В результате подбора, для обоих шарниров выбираем синхронный двигатель с постоянными магнитами марки *TECNOTION QTR-A-78* [39] и волновой редуктор марки *Harmonic Drive CPL-2A* [40]. Момент инерции ротора электродвигателя $I_R = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, масса электродвигателя – 0.25 кг, масса редуктора – 0.24 кг, тогда $m_{E_2} = 0.49$ кг, передаточное число редуктора $k_R = 100$.

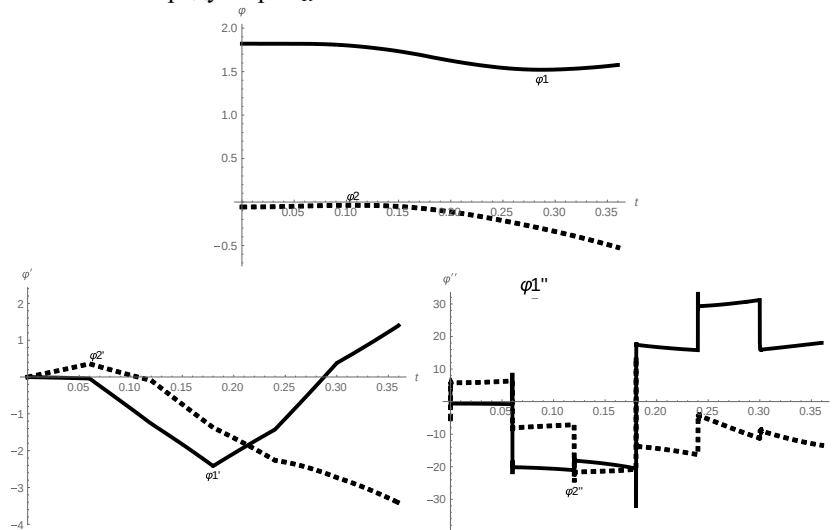


Рис. 7. Решение задачи Коши в случае учета динамики электропривода для механизма с двумя звеньями: углы поворота φ_1, φ_2 ; угловые скорости $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$; угловые ускорения $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ звеньев

Fig. 7. Solution of the Cauchy problem in the case of taking into account the dynamics of the electric drive for a mechanism with two links: angles of rotation φ_1, φ_2 ; angular speeds $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$; angular accelerations $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2$ of links

Сравнивая полученное решение с учетом динамики электропривода, представленное на (рис. 7) с решением без учета электродвигателей (рис. 6), можно сделать вывод, что в целом вид зависимостей качественно сохранился, однако углы поворота стали несколько иными и окончательная конфигурация механизма не совпадает с исходной, сохраняя при этом антропоморфность. Максимальные значения угловых скоростей и ускорений уменьшаются при учете динамики электропривода. Все это свидетельствует о недостаточности управления в системе, поэтому пренебрежение массой и вращающимися роторами электродвигателей при их относительно малой массе и моменте инерции приводит к значительной погрешности и пренебрегать ими не следует.

Заключение

1. Разработанная модель двух звеньев опорной ноги экзоскелета или антропоморфного робота отличается от имеющихся использованием углов, отсчитываемых между звеньями. Такой способ определения обобщенных координат соответствует случаю работы электроприводов в реальной мехатронной робототехнической системе.

2. Для созданной модели двух звеньев составлена система дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода с учетом и без учета динамики электроприводов. Проведено решение прямой и обратной задач динамики при заданном программном управлении движением опорной ноги экзоскелета. Анимационной визуализацией показано антропоморфное движение звеньев.

3. Проведено численное моделирование мехатронной робототехнической системы с учетом и без учета вращения роторов электродвигателей. Установлено, что влияние динамики ротора электродвигателя на механизм является существенным.

4. В сравнении с представленными в обзоре литературе моделями, созданная в данном исследовании модель опорной ноги экзоскелета является развитием и продвижением вперед, так как используются углы между звеньями и учитывается динамика вращающихся роторов электродвигателей, что отсутствует в имеющихся работах.

Литература

1. Виттенбург Й. Динамика систем твердых тел. М.: Мир, 1980 296 с.
2. Вукобратович М., Христич Д. Управление антропоморфическими системами // Управление в пространстве. М.: Наука, 1976. Т. 2. С. 180–187.
3. Вукобратович М., Стокич Д. Управление манипуляционными роботами: теория и приложения. М.: Наука, 1985. 383 с.
4. Корнев Г.В. Очерки механики целенаправленного движения. – М.: Наука, 1980. – 192 с.
5. Корнев Г. В. Введение в механику человека. М.: Наука, 1977. 264 с.
6. Галиуллин А.С. Обратные задачи динамики и задачи управления движениями материальных систем // Дифференц. уравнения. 1972. Т. 8. № 9. С. 1535–1541
7. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. 232 с.
8. Черноусько Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
9. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н. Локомоция многозвенных систем на плоскости: динамика, управление, оптимизация. М.: Издательство ИПМех РАН (Препринт № 1128), 2016. 154 с.
10. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. О математическом моделировании динамики многозвенных систем и экзоскелетов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2021. № 5. с. 162-176.
11. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Матричный метод построения уравнений динамики сноубордиста // Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики», Москва, 2–4 декабря 2020 г. Материалы конференции. Часть 1. П.М. Шкапов, М.И. Дьяченко, составители. Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. вып. 3. С. 145-148. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-3-2067>
12. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Управление динамикой составной конструкции со звеньями переменной длины // Известия российской академии наук. Механика твердого тела 2021. №2. с. 72–87.

13. Kaspirovich I. E. Application of Constraint Stabilization to Nonholonomic mechanics // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Year: 2016. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7910921. IEEE Conference Publications.
14. Борисов А. В., Розенблат Г. М. Матричный метод составления дифференциальных уравнений движения экзоскелета и управление им // Прикладная математика и механика. – 2017. – Т. 81. – № 5. – С. 511-522.
15. Борисов А. В., Розенблат Г. М., Кончина Л. В., Куликова М. Г., Маслова К. С. Пространственные модели управляемых шарнирных механизмов со звеньями переменной длины для экзоскелетов человека // Известия РАН. Механика твердого тела, 2021, № 6. С. 73-87.
16. Борисов А. В., Розенблат Г. М. Моделирование динамики экзоскелета с управляемыми моментами в суставах и переменной длиной звеньев с использованием рекуррентного метода составления дифференциальных уравнений движения // Известия РАН. Теория системы управления. – 2018. № 2. – С. 148-174.
17. Электронный ресурс. <https://darpa.com/> Ссылка активна на : 27.04.2022.
18. Электронный ресурс. <http://groups.csail.mit.edu/locomotion/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
19. Электронный ресурс. <https://www.bostondynamics.com/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
20. Электронный ресурс. <https://www.bostondynamics.com/atlas> Ссылка активна на: 27.04.2022.
21. Электронный ресурс. <https://habr.com/post/380435/> Ссылка активна на : 27.04.2022.
22. Электронный ресурс. <http://asimo.honda.com/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
23. Электронный ресурс. <http://asimo.honda.com/innovations/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
24. Электронный ресурс. <https://Yandex.ru/video/search?text=Romeo%20Toyota%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82&path=wizard&noreask=1&filmId=2499549739453021993>. Ссылка активна на: 27.04.2022.
25. Электронный ресурс. <https://budushchee.livejournal.com/101539.html> Ссылка активна на: 27.04.2022.
26. Электронный ресурс. <https://www.hocomma.com/solutions/lokomat/> Ссылка активна на 27.04.2022.
27. Электронный ресурс. <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
28. Электронный ресурс. <http://www.eksobionics.com> Ссылка активна на : 27.04.2022.
29. Электронный ресурс. <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/> Ссылка активна на: 27.04.2022.
30. Kazerooni H. Exoskeletons for human power augmentation // in Proceedings of the IEEE IRS/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '05), August 2005. 2005. P. 3120-3125.
31. Электронный ресурс. <http://www.rewalk.com/> Ссылка активна на : 27.04.2022.
32. Электронный ресурс. <http://www.rexbionics.com/> Ссылка активна на : 27.04.2022.
33. Блинов А.О., Борисов А.В., Борисова В.Л., Гончаров М.В., Гончарова И.А., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С., Новикова М.А. Механика экзоскелета. Монография. Смоленск: Универсум, 2021. 220 с.
34. Блинов А.О., Гончарова И.А., Куликова М.Г., Маслова К.С., Новикова М.А. Выбор САПР для решения задач проектирования антропоморфных роботов. // Естественные и технические науки. 2021. № 2 (153). С. 126-128.
35. Лурье А.И. Аналитическая механика.. М.:1961. 824 с.
36. Формальский А. М. Перемещение антропоморфных механизмов. М. : Наука, 1982. 368 с.
37. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота : монография. М.: Спутник +, 2009. 212 с. Ссылка активна на : 27.04.2022.
38. Электронный ресурс. <https://www.tecnotion.com/> Ссылка активна на : 27.04.2022.
39. Electronic resource. <https://www.tecnotion.com/>. Ссылка активна на : 27.04.2022.
40. Electronic resource. <https://innodrive.ru/> Ссылка активна на : 27.04.2022.

Авторы публикации

Блинов Александр Олегович – ассистент, кафедры «Технологические машины и оборудование», филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Борисов Андрей Валерьевич – д-р физ.-мат. наук, доцент, кафедры «Технологические машины и оборудование», филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Кончина Лариса Владимировна – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедры «Технологические машины и оборудование», филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Маслова Ксения Сергеевна – студентка, филиала Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

References

1. Wittenburg J. *Dynamics of systems of solid bodies*. M.: Mir, 1980 296 p.
2. Vukobratovich M., Khristich D. *Management of anthropomorphic systems*. Management in space. M.: Nauka, 1976;2:180–187.
3. Vukobratovich M., Stokich D. *Management of manipulation robots: theory and applications*. M.: Nauka, 1985.383 p.
4. Korenev GV. *Essays on the mechanics of purposeful movement*. M.: Nauka, 1980.192 p.
5. Korenev GV. *Introduction to human mechanics*. M.: Nauka, 1977. 264 p.
6. Galiullin A.S. Inverse problems of dynamics and problems of motion control of material systems. *Differential Equations*.1972;8(9):1535–1541.
7. Formalsky AM. *Movement control of unstable objects*. M. : FIZMATLIT, 2012. 232 p.
8. Chernous'ko FL, Anan'evskii IM, Reshmin SA. *Control methods for nonlinear mechanical systems*. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.
9. Chernousko F.L, Bolotnik N.N. *Locomotion of multilink systems on a plane: dynamics, control, optimization*. M. : IPMech RAS Publishing House (Preprint No. 1128), 2016. 154 p.
10. Borisov A.V., Kaspirovich, I.E., Mukharlyamov, R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons. *Journal of Computer and Systems Sciences International* (2021);60 (5):827-841.
11. Borisov AV, Kaspirovich IE, Mukharlyamov RG. *Matrix method for constructing dynamical equations of snowboarder*. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1191 012004 doi:10.1088/1757-899X/1191/1/012004.
12. Borisov AV, Kaspirovich IE, Mukharlyamov RG. Dynamic control of compound structure with links of variable length. *Mechanics of Solids*. (2021);56 (2):197-210.
13. Kaspirovich IE. *Application of Constraint Stabilization to Nonholonomic mechanics*. 2016. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Year: 2016. doi 10.1109/ICIEAM.2016.7910921. IEEE Conference Publications.
14. Borisov AV, Rozenblat GM. Matrix method of constructing the differential equations of motion of an exoskeleton and its control. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 81 (2017). PP. 351-359.
15. Borisov AV, Rozenblat GM, Konchina LV, et al. 3D Models of Controllable Hinged Mechanisms with Links of Variable Length for Human Exoskeletons. *Mechanics of Solids*. 2021;56(6):947–959. doi: 10.3103/S0025654421060030.
16. Borisov AV, Rozenblat GM. Modeling the Dynamics of an Exoskeleton with Control Torques in the Joints and a Variable Length of the Links Using the Recurrent Method for Constructing Differential Equations of Motion. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2018;57(2):319–347.
17. Electronic resource. <https://darpa.com/>. Accessed to:27.04.2022.
18. Electronic resource. <http://groups.csail.mit.edu/locomotion/> Accessed to:27.04.2022
19. Electronic resource. <https://www.bostondynamics.com/> Accessed to:27.04.2022
20. Electronic resource. <https://www.bostondynamics.com/atlas> Accessed to:27.04.2022.

21. Electronic resource. <https://habr.com/post/380435/> Accessed to:27.04.2022
22. Electronic resource. <http://asimo.honda.com/> Accessed to:27.04.2022.
23. Electronic resource. <http://asimo.honda.com/innovations/> Accessed to:27.04.2022.
24. Electronic resource. <https://Yandex.ru/video/search?text=Romeo%20Toyota%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82&path=wizard&noreask=1&filmId=249954973945302> 1993. Accessed to:27.04.2022.
25. Electronic resource. <https://budushchee.livejournal.com/101539.htm>. Accessed to:27.04.2022.
26. Electronic resource. <https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/> Accessed to:27.04.2022.
- 27.
28. Electronic resource. <http://corporate.honda.com/innovation/walk-assist/> Accessed to:27.04.2022
29. Electronic resource. <http://www.eksobionics.com>. Accessed to:27.04.2022
30. Electronic resource. <http://bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton/> Accessed to:27.04.2022.
31. Kazerooni H. *Exoskeletons for human power augmentation*. in Proceedings of the IEEE IRS/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '05), August 2005. P. 3120-3125.
32. Electronic resource. <http://www.rewalk.com/> Accessed to:27.04.2022
33. Electronic resource. <http://www.rexbionics.com/> Accessed to:27.04.2022
34. Blinov AO, Borisov AV, Borisova VL, et al. *Exoskeleton mechanics*. Monograph. Smolensk: Universum, 2021. 220 p.
35. Blinov AO, Goncharova IA, Kulikova MG, et al. The choice of CAD for solving the problems of designing anthropomorphic robots. *Natural and technical sciences*. 2021;2 (153):126-128.
36. Lurie AI. *Analytical mechanics*. M.:1961. 824 p.
37. Formalsky AM. *Movement of anthropomorphic mechanisms*. M.: Nauka,1982. 368 p.
38. Borisov AV. *Modeling of the human musculoskeletal system and the application of the results obtained for the development of an anthropomorphic robot model: monograph*. M.: Sputnik +, 2009. 212 p.
39. Kolyubin S.A. *Dynamics of robotic systems*. Proc. Allowance. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 117 p.
40. Electronic resource. <https://www.tecnotion.com/> Accessed to:27.04.2022.
41. Electronic resource. <https://innodrive.ru/> Accessed to:27.04.2022.

Authors of the publication

Alexander O. Blinov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Andrey V. Borisov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Larisa V. Konchina – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Ksenia S. Maslova – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Получено 20.04.2022г.

Отредактировано 27.04.2024г.

Принято 27.04.2022г.



АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛИ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, М.Р. Чилиева¹, А.Р. Имамиев²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов», г. Казань, Россия
maleev@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. В современных системах управления различных промышленных агрегатов основой для автоматизации технологических процессов является электрический привод. Высокие требования к качеству процесса управления, надёжности и энергетической эффективности технологических процессов и промышленных агрегатов определяют постановку и решение научно-практических задач по разработке и созданию новых перспективных систем управления электроприводов (СУЭП), позволяющих сохранить требуемое качество функционирования в условиях влияния дестабилизирующих факторов. Данные факторы могут воздействовать на систему управления в виде внешних координатных возмущений и суммироваться с соответствующими сигналами замкнутой СУЭП, а также выражаться в форме параметрических возмущений, приводящих к неустойчивости параметров СУЭП в процессе эксплуатации. Возникает необходимость создания такой системы управления, которая позволит осуществить идентификацию параметров СУЭП за счет введения в структуру системы соответствующих алгоритмов идентификации. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся беспоскоковый градиентный метод адаптивной идентификации, реализованный средствами программной среды MatLab. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе рассматривается задача параметрической идентификации электропривода с двигателем постоянного тока на основе определения функций чувствительности. Показатель качества процесса идентификации выбран из условия обеспечения близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения при вариациях неустойчивых параметров. Для построения алгоритма параметрической идентификации используется инверсная модель исследуемой СУЭП, показателем качества является квадрат невязки, а идентифицируемым параметром – общий коэффициент передачи электропривода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Моделирование в программной среде MatLab показало высокую робастность разработанного алгоритма идентификации к параметрическим возмущениям, которые не оказывают влияния на установившееся значение идентифицируемого параметра. Предложенный в работе способ компенсации статического момента сопротивления электропривода позволил обеспечить также малую чувствительность алгоритма и к внешним возмущениям. Идентификация общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока осуществляется с погрешностью, не превышающей 0,5% в режиме реального времени в условиях влияния возмущений различной физической природы.

Ключевые слова: алгоритм; неустойчивые параметры; электропривод; инверсная модель; модель чувствительности; дополнительное движение; невязка.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Чилиева М.Р., Имамиев А.Р. Алгоритм параметрической идентификации электропривода постоянного тока с применением инверсной модели // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 160-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-160-174.

ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF THE DC ELECTRIC DRIVE USING THE INVERSE MODEL

NA. Malev¹, OV. Pogoditsky¹, MR. Chilyaeva¹, AR. Imamiev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of JSC "Grid Company" - "Directorate of facilities under construction", Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. In modern control systems of various industrial units, the basis for the automation of technological processes is an electric drive. High requirements for the quality of the control process determine the formulation and solution of scientific and practical tasks for the development and creation of new promising control systems for electric drives (EDCS), allowing to maintain the required quality of functioning under the influence of destabilizing factors. These factors can affect the control system in the form of external disturbances and be summed up with the corresponding signals of the closed EDCS, and also be expressed in the form of parametric disturbances. The need arises to create such a control system that will allow for the identification of the parameters of the EDCS by introducing the appropriate identification algorithms into its structure. METHODS. When solving the problem, a search-free gradient method of adaptive identification was used, implemented by means of the MatLab software environment. RESULTS. The paper considers the problem of parametric identification of an electric drive with a DC motor based on the definition of sensitivity functions. Wherein to construct an algorithm for parametric identification, an inverse model of the studied EDCS is used, the quality indicator is the squared discrepancy, and the identifiable parameter is the overall transmission coefficient of the electric drive. CONCLUSION. Modeling in the MatLab software environment showed a high robustness of the developed identification algorithm to parametric disturbances that do not affect the steady-state value of the identified parameter. The proposed method for compensating the moment of resistance electric drive also made it possible to provide a low sensitivity algorithm to external disturbances. The identification of the overall transmission coefficient of a DC electric drive is carried out with an error not exceeding 0.5% in real time under the conditions of the influence of disturbances of various physical nature.

Keywords: algorithm; unstable parameters; electric drive; inverse model; sensitivity model; additional motion; discrepancy.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Chilyaeva MR., Imamiev AR. Algorithm for parametric identification of the DC electric drive using the inverse model. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):160-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-160-174.

Введение

Процесс эксплуатации систем управления электроприводов сопровождается, как правило, влиянием дестабилизирующих факторов, под действием которых изменяются параметры системы и, в свою очередь, показатели качества процесса управления [1, 2, 3, 4]. В этой связи в современных перспективных СУЭП актуальным является применение автоматических систем идентификации, позволяющих вычислять оценки нестабильных параметров на этапе функционирования в режиме реального времени [5, 6, 7]. Способность системы изменять свои свойства при изменении совокупности параметров определяют её параметрическую чувствительность [8, 9].

Условие нормального функционирования СУЭП можно сформулировать следующим образом: множество значений фазовых координат $\mathbf{x}$, зависящих от вектора параметров СУЭП $\boldsymbol{\chi}$ и вектора внешних воздействий $\mathbf{f}$, которые реально могут иметь место в процессе функционирования СУЭП должно быть строго включено в множество значений $\mathbf{x}$, при которых состояние СУЭП удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для выполнения данного условия необходимо предъявить к системе требование нулевой параметрической чувствительности или параметрической инвариантности $|\mathbf{x}_{\boldsymbol{\chi}, \mathbf{f}}| = 0$, что практически неосуществимо [10, 11]. Поэтому требование параметрической инвариантности выражается в форме ϵ -чувствительности $|\mathbf{x}_{\boldsymbol{\chi}, \mathbf{f}}| \leq \epsilon$, которое означает, что принятый показатель качества функционирования СУЭП J находится в заданных пределах $J_{\min} \leq J \leq J_{\max}$. Одним из методов обеспечения ограничений на показатель качества является выбор номинальных значений компонент вектора параметров СУЭП $\boldsymbol{\chi}$ с учётом технологических отклонений в процессе серийного производства [12]. В настоящей работе определение экстремального значения показателя качества J осуществляется аналитическим путем в сочетании с градиентным способом идентификации.

Материалы и Методы

Показатели качества функционирования СУЭП могут быть различными. В инженерной практике широко применяются показатели, основанные на невязке [13]

$$\varepsilon(t) = y_o(t) - y_m(t), \quad (1)$$

формируемой как разность между действительным $y_o(t)$ и эталонным $y_m(t)$ значениями выходной координаты СУЭП. Относительная простота реализации алгоритма идентификации параметров СУЭП обеспечивается при показателе качества функционирования [14, 15]

$$J = \varepsilon^2(t) \quad (2)$$

или в векторно-матричной форме

$$J = (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_m)^T (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_m). \quad (3)$$

Рассмотрим математическую постановку задачи идентификации параметра χ_i на основе выражения (3). Пусть собственное движение электропривода описывается выражением

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \chi_i, t). \quad (4)$$

Тогда дополнительное движение от вариаций вектора параметров СУЭП запишется с помощью соотношения

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{F}(\Delta \chi). \quad (5)$$

Для получения оценки вектора $\hat{\chi}$ решается обратная задача, которой соответствует формальное отношение

$$\Delta \chi = \mathbf{F}^{-1}(\Delta \mathbf{x}). \quad (6)$$

Показатель качества (3) формируется следующим образом. Текущее значение вектора состояния СУЭП

$$\mathbf{x}_o(\chi) = \mathbf{x}_m + \mathbf{x}_\chi \Delta \chi, \quad (7)$$

где $\mathbf{x}_m$ – требуемое значение вектора состояния модели СУЭП.

С учётом (7) показатель качества (3) для вектора промежуточных фазовых координат электропривода принимает вид

$$J = (\Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_\chi \Delta \chi)^T (\Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_\chi \Delta \chi), \quad (8)$$

где $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_o - \mathbf{x}_m$.

Показатель качества (8) характеризует степень близости дополнительного движения, формируемого моделью, и фактического дополнительного движения [16, 17].

Определим оценку вектора $\hat{\chi}$, исходя из условия минимума критерия J . Преобразуем выражение показателя качества (8)

$$J = \Delta \mathbf{x}^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{x}_\chi \Delta \chi + \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi \Delta \chi$$

и продифференцируем полученное выражение по вектору $\Delta \chi$:

$$\frac{\partial J}{\partial (\Delta \chi)} = -\mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{x}_\chi + 2 \Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi. \quad (9)$$

Произведем в (9) матричные преобразования и приравняем данное выражение к нулю:

$$\Delta \chi^T \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi = \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x}. \quad (10)$$

Введём обозначения

$$\mathbf{P}_1 = \mathbf{x}_\chi^T \mathbf{x}_\chi \text{ и } \mathbf{P}_2 = \mathbf{x}_\chi^T \Delta \mathbf{x}. \quad (11)$$

С учётом введённых обозначений, из выражения (10) следует, что

$$\mathbf{P}_1 \Delta \chi = \mathbf{P}_2, \quad (12)$$

откуда вариация вектора параметров χ определяется по формуле

$$\Delta \chi = \mathbf{P}_1^{-1} \mathbf{P}_2. \quad (13)$$

При выполнении условия (13) оценка вектора параметров СУЭП находится из выражения

$$\hat{\chi} = \chi_m + \Delta \chi. \quad (14)$$

Матрицы $\mathbf{P}_1$ и $\mathbf{P}_2$ зависят от матрицы чувствительности $\mathbf{x}_\chi$. Поэтому для реализации выражения (13) в алгоритме идентификации параметров СУЭП необходимо предусмотреть вычислитель функций чувствительности [18, 19].

Объектом настоящего исследования является электропривод постоянного тока, получающий питание от управляемого выпрямителя и охваченный отрицательной обратной

связью по скорости. В качестве идентифицируемого параметра принят общий коэффициент передачи электропривода K .

Закон изменения идентифицируемого параметра

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J, \quad (15)$$

где $\nabla_k = \frac{\partial}{\partial K}$ – символ градиента; λ_k – коэффициент, характеризующий скорость идентификации параметра.

С учетом принятого показателя качества функционирования СУЭП (2) вычислим градиент

$$\nabla_k J = \frac{\partial [\varepsilon(t)]^2}{\partial K} = \frac{\partial [y_o(t) - y_m]^2}{\partial K} = 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K}. \quad (16)$$

Передаточную функцию электропривода в разомкнутой структуре можно представить дробно-рациональным выражением в операторной форме

$$W(s) = \frac{K \sum_{k=0}^m a_k s^k}{\sum_{k=0}^n b_k s^k} = \frac{K(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + a_0)}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}, \quad (17)$$

где K – общий коэффициент передачи электропривода (добротность по скорости).

Передаточная функция замкнутой системы относительно сигнала ошибки

$$\Phi_{\Delta}(s) = \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1+W(s)} = \frac{B(s)}{B(s)+KA(s)}. \quad (18)$$

Принимая за основу выражение (18), запишем передаточную функцию инверсной модели

$$\Phi_{\Delta}^{im}(s) = \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{B(s)+KA(s)}{B(s)} = 1 + \frac{KA(s)}{B(s)}. \quad (19)$$

Дифференцируя (19) по общему коэффициенту передачи системы K , получим соответствующую функцию чувствительности передаточной функции инверсной модели

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{A(s)}{B(s)}, \quad (20)$$

которая не зависит от настраиваемого параметра, то есть функция чувствительности инвариантна к изменению K .

По выражениям (15) и (16) определим алгоритм беспоисковой градиентной идентификации

$$\dot{K}(t) = -\lambda_k \nabla_k J = -\lambda_k 2\varepsilon(t) \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial K(t)}. \quad (21)$$

Переходя к преобразованию Лапласа, получим

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial U_{im}(s)}{\partial K} \right] = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} \Delta U(s) \right] \quad (22)$$

и тогда, с учётом формулы (20), добротность по скорости найдём из выражения

$$K(s) = -\frac{2\lambda_k}{s} [U_{in}(s) - U_{im}(s)] \left[-\frac{A(s)}{B(s)} \Delta U(s) \right], \quad (23)$$

где $U_{in}(s)$ – входное задающее воздействие; $U_{im}(s)$ – выходной сигнал инверсной модели; $\Delta U(s)$ – сигнал рассогласования.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае роль эталонной модели выполняет инверсная модель, коэффициенты полиномов которой зависят от номинальных значений параметров электропривода за исключением добротности по скорости K , а невязка, соответственно, вычисляется по формуле

$$\varepsilon(t) = u_{in}(t) - u_{im}(t). \quad (24)$$

На основании полученных выражений структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода примет вид, показанный на рисунке 1.

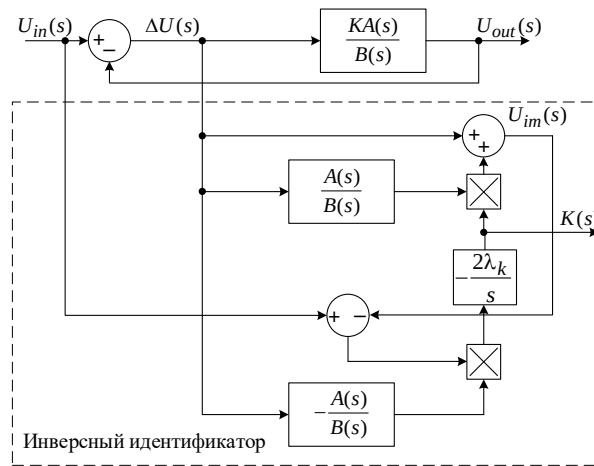


Рис. 1. Структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода

Fig. 1. Diagram of dynamic model inverse common identifier transmission coefficient

Результаты и обсуждение

В качестве электромеханического преобразователя в исследуемом электроприводе применен серводвигатель постоянного тока типа PIVT-6-25/3A с возбуждением от постоянных магнитов и встроенным тахогенератором с крутизной выходного напряжения 0,1 В·мин/об. Технические характеристики машины сведены в таблице 1 [20].

Таблица 1

Технические характеристики двигателя PIVT-6-25/3A.

Номинальное напряжение U_a , В	Коэффициент передачи по моменту K_m , Н·м/А	Электромагнитная постоянная времени T_a , с	Электромеханическая постоянная времени T_m , с	Частота вращения при максимальном моменте n , об/мин	Максимальный момент M_{max} , Н·м
30	0,072	0,002	0,025	3000	0,225

Передаточная функция двигателя постоянного тока

$$W_m(s) = \frac{1/c}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1}, \quad (25)$$

где $c = K_m = 0,072$ В·с/рад – коэффициент противо-ЭДС.

Двигатель получает питание от однофазного двухполупериодного мостового стабилизированного выпрямителя типа ВСА-5К с передаточной функцией

$$W_r(s) = \frac{K_r}{T_r s + 1}, \quad (26)$$

где $K_r = 15$ – коэффициент усиления выпрямителя; $T_r = 0,005$ с – постоянная времени выпрямителя [20].

На выходе тахогенератора установлен RC-фильтр для сглаживания пульсаций выходного напряжения с постоянной времени $T_f = 0,001$ с. Передаточная функция тахогенератора с фильтром

$$W_\omega(s) = \frac{K_\omega}{T_f s + 1}, \quad (27)$$

где $K_\omega = 0,0104$ В·с/рад – коэффициент передачи тахогенератора, численно равный крутизне выходного напряжения [20].

Передаточная функция замкнутого электропривода относительно сигнала рассогласования

$$\begin{aligned} \Phi_\Delta(s) &= \frac{\Delta U(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{1 + W_r(s)W_{em}(s)W_\omega(s)} = \\ &= \frac{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1) + K_r K_{em} K_\omega}, \end{aligned} \quad (28)$$

где $K_{em} = 1/c = 13,89$ рад/В·с – коэффициент передачи двигателя.

Запишем добротность по скорости в виде произведения коэффициентов передачи всех элементов электропривода

$$K = K_r K_{em} K_{\omega} \quad (29)$$

и определим передаточную функцию инверсной модели:

$$\begin{aligned} \Phi_{\Delta}^{im}(s) &= \frac{U_{im}(s)}{\Delta U(s)} = \frac{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1) + K}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)} = \\ &= 1 + \frac{K}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)}. \end{aligned} \quad (30)$$

Продифференцируем выражение (30) по общему коэффициенту передачи электропривода

$$\frac{\partial \Phi_{\Delta}^{im}(s)}{\partial K} = \frac{1}{(T_r s + 1)(T_a T_m s^2 + T_m s + 1)(T_f s + 1)} \quad (31)$$

и убедимся, что результат дифференцирования не зависит от идентифицируемого параметра, т.е. функция чувствительности инвариантна к изменению K (см. выражение (20)).

Структурная схема динамической модели идентификации общего коэффициента передачи исследуемого электропривода постоянного тока показана на рисунке 2.

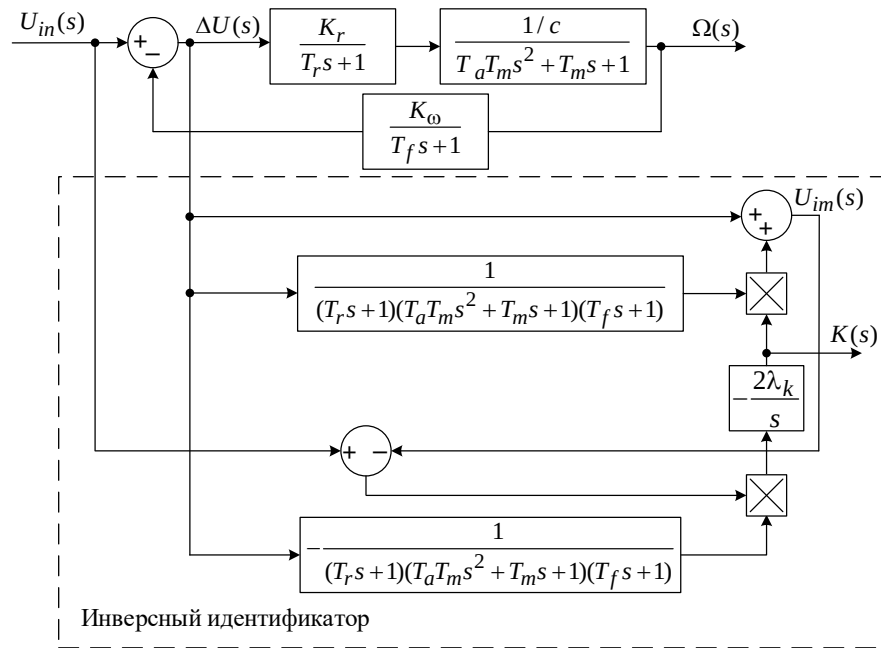


Рис. 2. Структурная схема динамической модели инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

Fig. 2. Structural diagram of dynamic model of inverse identifier of total DC transmission ratio

На основании полученных выше выражений и схемы, показанной на рисунке 2, реализуем *Simulink*-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением программной среды *MatLab*. Соответствующая схема представлена на рисунке 3.

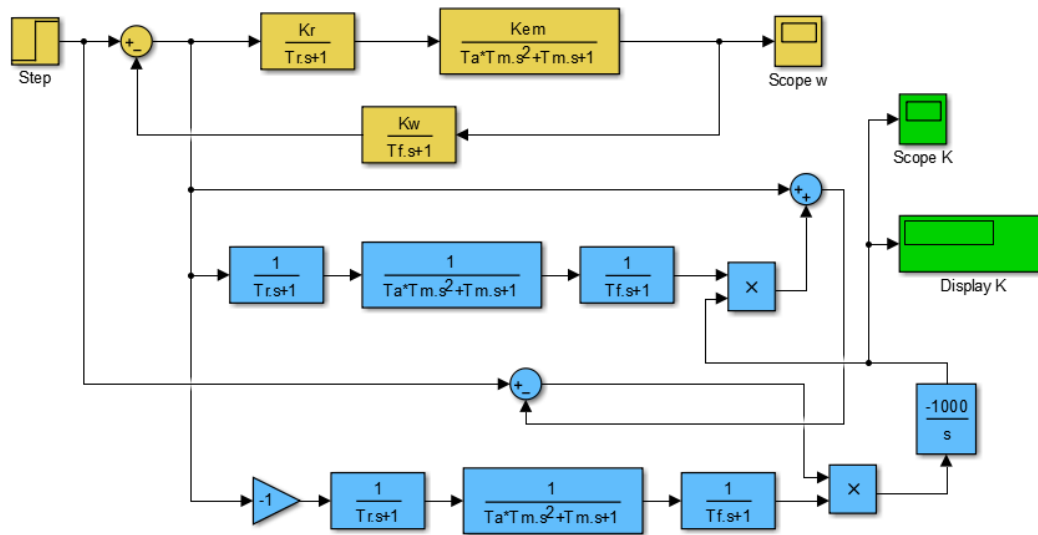


Рис. 3. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока

Fig. 3. Simulink model inverse identifier of total DC transmission ratio

На рисунке 3 блоки, выделенные жёлтым цветом, соответствуют исследуемой системе, блоки, выделенные голубым цветом, реализуют алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода согласно выражению (23), а блоки Scope K и Display K регистрируют и отображают идентифицируемый параметр.

В командное окно *MatLab* вводим значения параметров электропривода, соответствующие выражениям (25) – (27), характеризующие номинальный режим работы системы. Коэффициент, характеризующий скорость идентификации, принимаем $\lambda_k = 500$. Результаты моделирования при номинальных значениях параметров представлены на рисунке 4.

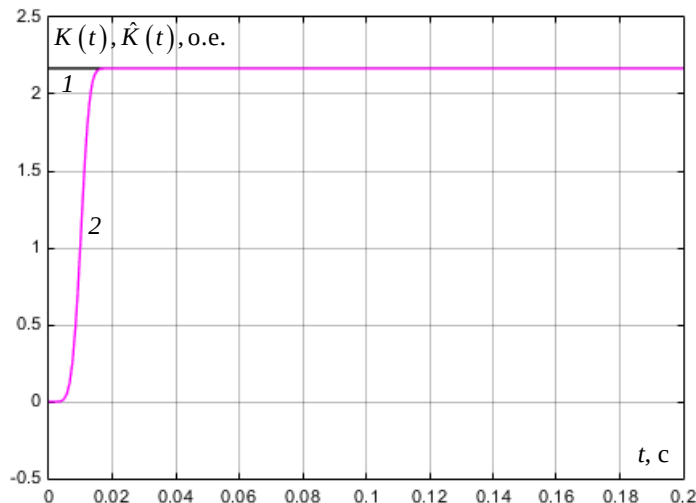


Рис. 4. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K: 1 – номинальное значение K(t); 2 – оценка $\hat{K}(t)$

Fig. 4. Simulation of the process of identification of the total transmission coefficient of electric drive K: 1 - nominal value K(t); 2 - estimation

В соответствии с выражением (29) номинальное значение общего коэффициента передачи электропривода $K_{nom} = K_r K_{em} K_{\omega} = 15 \cdot 13,89 \cdot 0,0104 \approx 2,167$, при этом полученная оценка практически не отличается от номинального значения.

Дальнейшие исследования проведем при детерминированном изменении коэффициента K, а также при вариациях постоянных времени элементов электропривода. Результаты моделирования показаны на рисунках 5, 6.

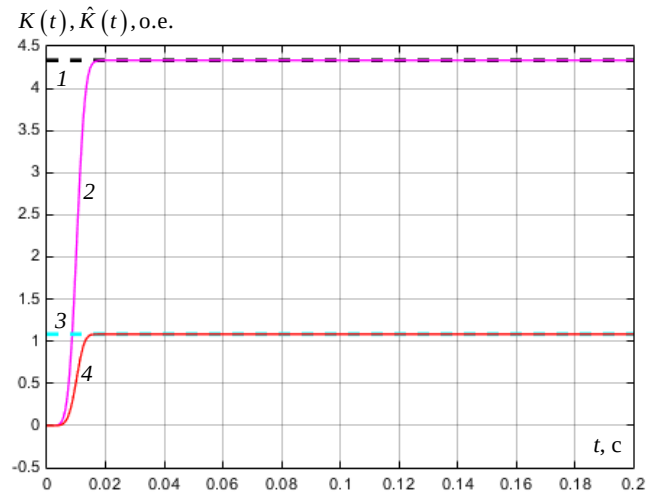


Рис. 5. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – значение $K = 2K_{nom}$; 2 – оценка $\hat{K}(t) = 2K_{nom}$; 3 – значение $K = 0,5K_{nom}$; 4 – оценка $\hat{K}(t) = 0,5K_{nom}$

Fig. 5. Simulation of the process of identification of the overall transmission coefficient of the electric drive K : 1 – the value ; 2 – the estimate ; 3 – the value ; 4 – the estimate

Из анализа графиков, приведенных на рис. 5 следует, что вычисление оценок общего коэффициента передачи электропривода при заданных изменениях K осуществляется с минимальным значением погрешности, т.е. $\hat{K} \approx K$. При этом время, затрачиваемое на идентификацию, не превышает 0,02 с.

Произведем подобное исследование при изменении электромеханической постоянной времени машины постоянного тока T_m и постоянной времени фильтра T_f и $K = K_{nom}$ (см. рис. 6).

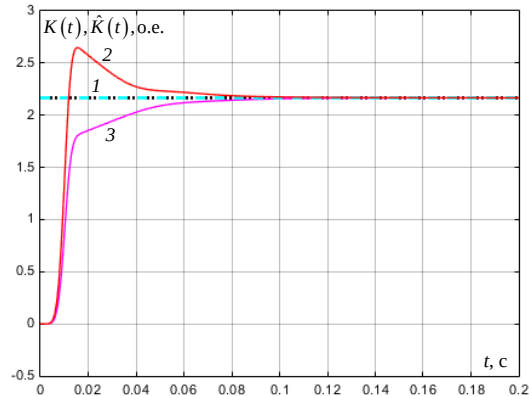


Рис. 6. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при уменьшении T_m и T_f на 20%; 3 – оценка $\hat{K}(t)$ при увеличении T_m и T_f на 20%

Fig. 6. Simulation of the process of identification of the total transmission ratio of the electric drive K : 1 – the nominal value $K(t)$; 2 – the decrease and 20% estimate; 3 – the increase and 20%

Вариации указанных постоянных времени в заданных пределах приводят к изменениям переходных процессов вычисления оценок общего коэффициента передачи электропривода, которые характеризуются снижением быстродействия и временем установления около 0,1 с как для случая с наличием перерегулирования (график 2), так и при монотонном процессе (график 3). При этом установившиеся значения вычисляемых оценок для обоих случаев соответствует номинальному значению коэффициента передачи.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемый в работе алгоритм идентификации является инвариантным к параметрическим возмущениям, обеспечивая высокую точность процесса вычисления оценок общего коэффициента передачи исследуемого электропривода при сравнительно малых временных затратах.

Следует отметить, что функционирование электропривода в реальных условиях сопровождается внешними координатными возмущениями, к которым можно отнести момент сопротивления нагрузки M_c , а также шумы и наводки в цепях управления f . Структурная схема динамической модели исследуемого электропривода с учётом внешних возмущений представлена на рис. 7 [21, 22].

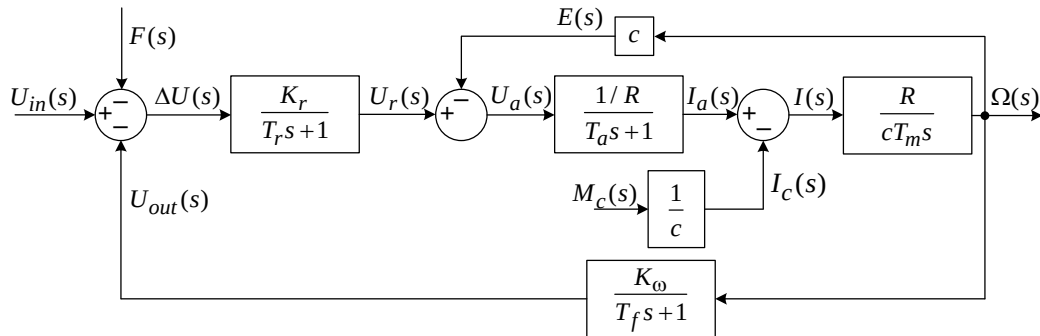


Рис. 7. Структурная схема динамической модели электропривода постоянного тока с учетом возмущающих воздействий Fig. 7. Schematic diagram of dynamic DC electric drive with regard to perturbations

На основании показанной, на рисунке 7 схемы сформируем *Simulink*-модель электропривода. Неизвестное сопротивление якорной цепи R было измерено с помощью измерительного моста постоянного тока типа ММВ с погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$ [20Чичков]. Результаты измерения составили $R = 5,15$ Ом. Полученная *Simulink*-модель представлена на рис. 8. Устанавливаем значение момента нагрузки $M_c = 0,8 M_{\max} = 0,8 \cdot 0,225 = 0,18$ Н·м, а сигнал шума зададим с помощью блока Signal Generator, выбирая во вкладке Wave form наименование сигнала Random и устанавливая амплитуду сигнала 0,3 В, частоту – 1 кГц.

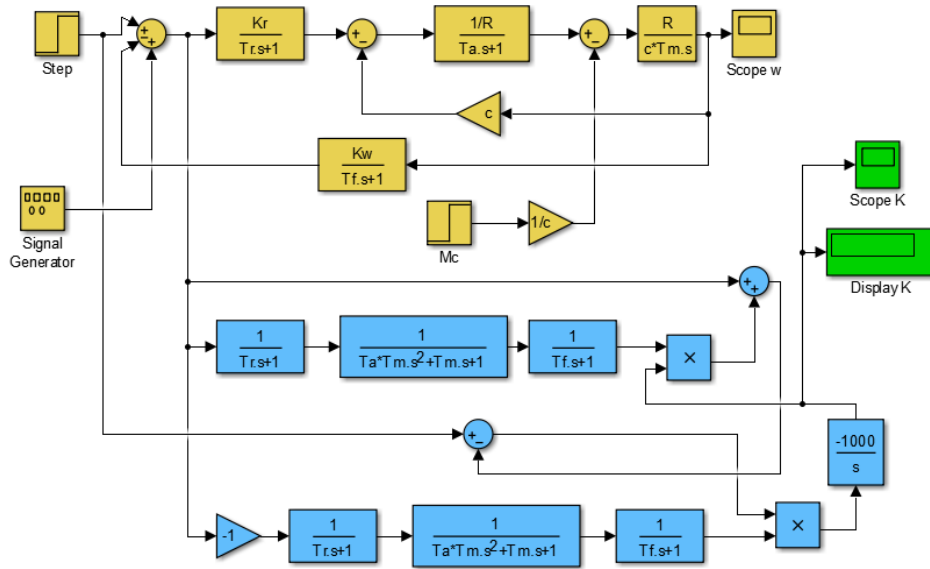


Рис. 8. *Simulink*-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с учётом внешних возмущений Fig. 8. *Simulink* model of inverse identifier of total DC transmission ratio taking into account external disturbances

Моделирование производим при набросе нагрузки через 0,1 с после пуска. Результаты вычисления оценки K представлены на рисунке 9.

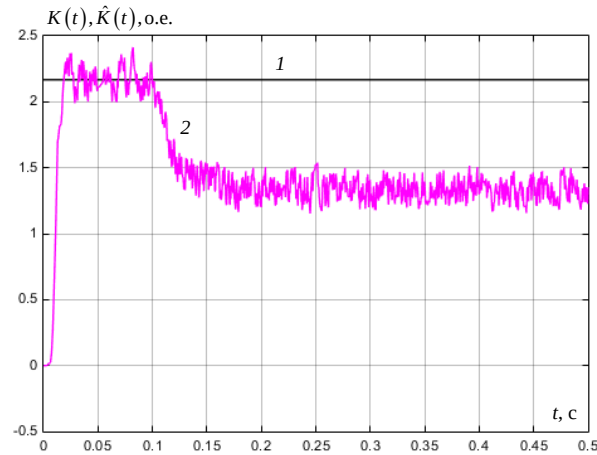


Рис. 9. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K : 1 – номинальное значение $K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_C и f

Fig. 9. Results of modeling the process of identification of the total transmission coefficient of the electric drive K : 1 – nominal value $K(t)$; 2 – evaluation under the influence of external disturbances and f

Показанные на рисунке 9 зависимости иллюстрируют существенное влияние внешних возмущений на результат идентификации. Полученное в процессе вычисления значение $\hat{K}(t)$ сопровождается флуктуациями с амплитудой и частотой наведенной помехи f , что затрудняет определение установившегося значения K .

Влияние момента сопротивления M_C проявляется в значительном отклонении установившегося значения оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ от заданной величины K , вызванном перепадом скорости вращения электропривода под действием нагрузки. Данное влияние приводит к изменению сигнала рассогласования $\Delta U(s)$ и, в свою очередь, невязки $E(s)$ (24), в результате чего возникает погрешность результата идентификации общего коэффициента передачи K согласно формулы (23). Из рисунка 9 следует, что относительная погрешность вычисления $K = K_{nom} = 2,167$ при полученном значении оценки $\hat{K}_{уст}(t) = 1,352$ составляет около 37%, что говорит о неудовлетворительном решении. Максимальная погрешность идентификации обусловлена именно моментной составляющей ошибки, поскольку возмущающее воздействие f несущественно влияет на $\hat{K}_{уст}(t)$, а к ошибке по управлению рассматриваемая система инвариантна.

В целях снижения чувствительности алгоритма параметрической идентификации с применением инверсной модели к статическому моменту сопротивления нагрузки необходимо разработать способ определения M_C с последующим формированием корректирующего воздействия, компенсирующего влияние M_C и сводящего ошибку идентификации $\hat{K}(t)$ к минимуму. Запишем уравнение механического равновесия электропривода, выразив моменты через токи (см. схему на рис. 7):

$$i_a(t) - i_c(t) = i(t), \quad (32)$$

где $i_a(t)$ – ток якоря; $i_c(t)$ – ток, соответствующий моменту сопротивления;

$i(t) = \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}$ – ток, соответствующий динамическому моменту.

Из выражения (32) найдём

$$i_c(t) = i_a(t) - \frac{cT_m}{R} \frac{d\omega(t)}{dt}, \quad (33)$$

т.е. на основании информации о токе $i_a(t)$ с использованием датчика тока и об ускорении $\frac{d\omega(t)}{dt}$ с использованием датчика скорости получим искомый сигнал, пропорциональный моменту сопротивления M_C .

Корректирующее воздействие, компенсирующее влияние M_C , формируется в виде сигнала напряжения

$$u_C(t) = k_C i_C(t), \quad (34)$$

где $k_C = 0,744$ Ом – коэффициент пропорциональности, подобранный путем компьютерного эксперимента. Невязка (24) становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_C)$. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_C представлена на рисунке 10.

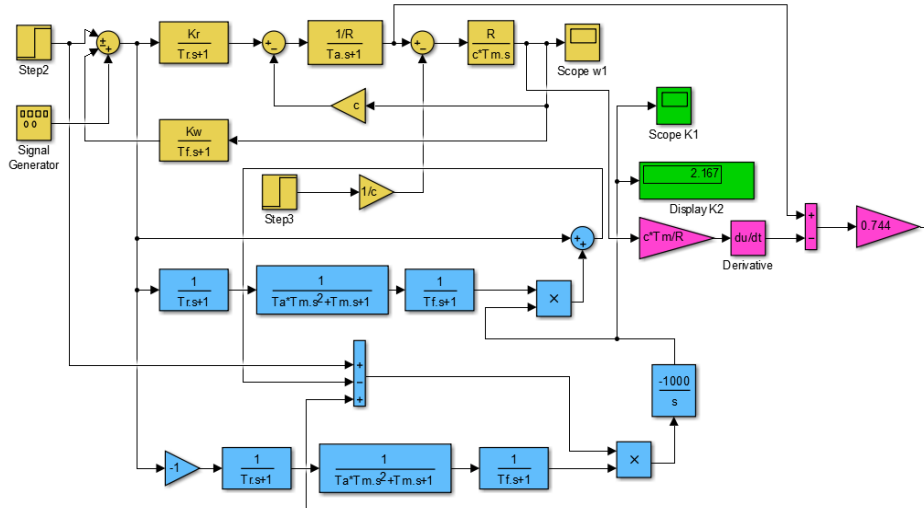


Рис. 10. Simulink-модель инверсного идентификатора общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с компенсацией M_C

Fig. 10. Simulink model of inverse identifier of total DC transmission ratio with compensation

На рисунке 10 блоки, выделенные сиреневым цветом, иллюстрируют процедуру формирования компенсирующего воздействия $u_C(t)$.

Компенсацию возмущающего воздействия f осуществим с помощью фильтра нижних частот первого порядка с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени, равной 0,012 с. Фильтрация осуществляется по отношению к сигналу рассогласования $\Delta U(s)$. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода показаны на рисунке 11.

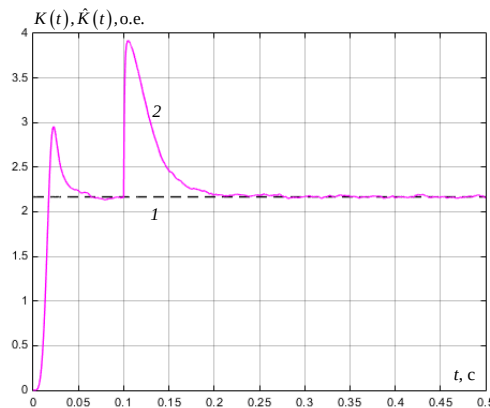


Рис. 11. Результаты моделирования процесса идентификации общего коэффициента передачи электропривода K с компенсацией возмущений M_C и f : 1 – номинальное значение

Fig.11. Simulation of the process of identification of the total electric drive transmission coefficient K with perturbation compensation and f : 1 - nominal

$K(t)$; 2 – оценка $\hat{K}(t)$ при влиянии внешних возмущений M_C и f

График 2 на рисунке 11 характеризуют динамические выбросы вначале процесса идентификации с перерегулированием 36% на 0,0225 с, а также при набросе нагрузки через 0,1 с от начала моделирования с амплитудой $\hat{K}_{\max}$ около 4 о.е. Процесс идентификации устанавливается примерно через 0,2 с и установившееся значение общего коэффициента

передачи электропривода $\hat{K}_{уст} \approx K_{nom} = 2,167$. Флуктуации от возмущающего воздействия f благодаря фильтрации становятся незначительными и вносят пренебрежимо малую погрешность около 0,5 %. В этой связи можно считать, что предложенные выше решения позволили получить инвариантный как к параметрическим, так и к координатным возмущениям алгоритм идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока.

Выводы

В настоящей статье проведены разработка и исследование алгоритма идентификации общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока с применением инверсной модели, не зависящей от идентифицируемого параметра. Алгоритм реализован с применением градиентного метода вычисления интеграла от квадрата невязки с использованием в качестве эталонной модели объекта исследования инверсной модели, а также модели чувствительности по общему коэффициенту передачи электропривода K . Имитационное моделирование в программной среде *MatLab* показало, что разработанный алгоритм инвариантен к параметрическим возмущениям и изменение параметров исследуемого объекта, выраженных через постоянные времени элементов электропривода, не оказывает влияния на результат идентификации K , тогда как вариации коэффициентов передачи элементов электропривода, являющихся сомножителями K , идентифицируются в виде оценки $\hat{K}_{уст}(t)$ с высокой точностью. При исследовании влияния координатных возмущений была выявлена высокая чувствительность алгоритма идентификации к данному виду возмущающих воздействий, причем максимальная погрешность вычисления оценки $\hat{K}(t)$ обусловлена моментной составляющей ошибки, которая алгебраически суммируется с сигналом рассогласования $\Delta u(t)$ и, соответственно, приводит к неконтролируемому изменению невязки $\varepsilon(t)$ и, в итоге, вычисляемой оценки $\hat{K}_{уст}(t)$. Для минимизации негативного влияния момента сопротивления M_c предложен способ формирования компенсирующего воздействия $u_c(t)$, полученного с применением датчиков тока якоря $i_a(t)$ и скорости вращения двигателя $\omega(t)$. В результате невязка становится функцией трех переменных $\varepsilon(t) = f(u_{in}, u_{im}, u_c)$ и сигнальная компенсация момента сопротивления обеспечивает определение установившегося значения общего коэффициента передачи электропривода $\hat{K}_{уст}(t)$ с погрешностью, не превышающей 0,5%. Влияние шумов и наводок не вносит существенной ошибки в результат идентификации и при необходимости может быть снижено путем фильтрации сигнала рассогласования $\Delta u(t)$ за счет применения фильтра нижних частот. Таким образом, разработанный алгоритм идентификации позволяет с высокой точностью за малые промежутки времени произвести оценку общего коэффициента передачи электропривода постоянного тока в условиях текущей эксплуатации. Алгоритм не требует сложного измерительного оборудования и больших вычислительных мощностей и реализуется на основе стандартно применяемых в электроприводе датчиков. Процедура идентификации может быть автоматизирована путем получения соответствующего цифрового алгоритма и его реализации в виде рабочей программы микропроцессора. Результаты идентификации могут быть использованы как для анализа и контроля функционирования электропривода, так и для построения адаптивных параметрически инвариантных систем управления электроприводами с применением беспоисковых градиентных алгоритмов.

Литература

1. J. Calliess S.J. Roberts, C.E. Rasmussen, J. Maciejowski. Lazily Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V. and Mwaku W.M. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*, vol. 124. Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes. In *American Control Conference (ACC)*, 2013.

4. Saushev A.V. Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. №5. Vol.327.
5. M.P. Deisenroth, D. Fox, and C. E. Rasmussen. Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.
6. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования Q-таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020, № 22(2). С. 86-97.
7. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. -2014. - Vol. 24, No. 17. - P. 2774-2784.
8. Ostroverkhov M., Pyzhov V., Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017.
9. Кучер Е.С., Комазенко М.А., Ромащенко А.И. Синтез систем векторного управления малочувствительных к изменениям параметров асинхронного электропривода // Доклады академии наук высшей школы российской федерации. 2017. № 2(35). С.61-72.
10. Kovela I., Ivaniuk O., Vlach-Vyhrnovska G., Stakhiv R. Параметрический синтез комбинированных автоматических систем регулирования с цифровыми пид-регуляторами // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2017. № 2(90). С.37-34.
11. Томчина О.П., Кондратова М.Е., Горохов М.М., Журов К.В. Адаптивный регулятор с нелинейной эталонной моделью – в сборнике: Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации: Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во «КультИнформПресс», 2017. – С. 206-208.
12. Анисимов А. А. Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 2. С. 21–26.
13. Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. Автомат. и телемех. 2017. №4. 92–105.
14. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers // Journal of Computer and System Sciences International. 2011. V. 50. 5. P. 698–719.
15. Сольнищев Р.И., Каримов А.И., Каримов Т.И. Синтез цифровых регуляторов гироскопических командных приборов // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 1 (96).
16. Саушев А.В., Бова Е.В. Показатели качества и критерии оптимальности при структурно-параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т.11. №2. С. 380-395.
17. Pshikhov V., Medvedev M., Kupovikh G., Shibanov V. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarasc), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018, 54–59.
18. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Загирова В.Н. Идентификация параметров и частоты вращения ротора асинхронного двигателя на основе функций чувствительности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020.Т.6. С.128-131.
19. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(6):101-110.
20. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(5):142-154.
21. Сташинов Ю.П. К вопросу о настройке системы управления электропривода постоянного тока на модульный оптимум. Ч. 1 // Электротехника. 2016. № 1. С. 2–7.
22. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – ст. преп. кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Чилыева Маргарита Романовна – студент, Казанского государственного энергетического университета.

Имамиев Айрат Рустемович – инженер группы сопровождения проектов КРиС ФЛ АО «Сетевая компания» - «Дирекция строящихся объектов».

References

1. J. Calliess, S.J. Roberts C.E. Rasmussen, J. Maciejowski. Lazily Adapted Constant Kinky Inference for nonparametric regression and model-reference adaptive control. *Automatica*, 2020.
2. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV. and Mwaku W.M. *Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models*. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019). V. 124. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Girish Chowdhary, Hassan A. Kingravi, Jonathan How, and Patricio A. Vela. *Nonparametric adaptive control of time-varying systems using Gaussian processes*. In American Control Conference (ACC), 2013.
4. Saushev AV. *Solution of problems of parametric optimization and control of electric drives state based on information about operability area boundary*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;5:327.
5. Deisenroth MP, Fox D, and Rasmussen C.E. *Gaussian processes for data-efficient learning in robotics and control*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015.
6. Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):86-97.
7. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*. 2014;24(17):2774-2784.
8. Ostroverkhov M, Pyzhov V, Korol S. Control of the Electric Drive under Conditions of Parametric Uncertainty and Coordinates' Interrelation. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017.
9. Kucher ES, Komazenko MA, Romashchenko AI. *Synthesis of systems of vector control of induction motor drive parameters low-sensitive to changes*. Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation. 2017;2(35):61-72.
10. Kovela I, Ivaniuk O, Vlach-Vyhrnovska G, Stakhiv R. Parametric synthesis of combined automatic regulating systems with digital pid-controllers. *Eastern european journal of advanced technologies*. 2017;2(90):37-34.
11. Tomchina OP, Kondratova ME, Gorokhov MM, et al. *An adaptive controller with a nonlinear reference model – in the collection: Scientific achievements of modern science: novation, history, reality, prospects and implementation practice: Collection of scientific articles based on the results of an international scientific and practical conference*. – St. Petersburg: Publishing House «KultInform-Press», 2017. P. 206–208.
12. Anisimov A.A. Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems. *Vestnik IGEU*. 2016;2:21–26.
13. Rutkovskii, VYu. Glumov VM. Dynamics peculiarities of an adaptive control system with nonlinear reference model. *Autom. Remote Control*. 2017;8(4):654–665.
14. Anisimov AA, Kotov DG, Tararykin SV. Analysis of Parametric Sensitivity and Structural Optimization of Modal Control Systems with State Controllers. *Journal of Computer and System Sciences International*. 2011;50(5):698 – 719.
15. Solnitsev RI, Karimov A.I., Karimov T.I. Synthesis of digital regulators of gyroscopic command appliance. *Gyroscopy and navigation*. 2017;25(1):96.
16. Saushev AV, Bova EV. The quality indicators and optimality criterion at the structural-parametric synthesis of automated electric drives. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov*. 2019;2:380-395.

17. Pshikhopov V, Medvedev M, Kupovikh G, et al. Position Control of Mobile Robots With Multi-Contour Adaptation, 2018 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (Icarasc), eds. Costelha H., Calado J., Bento L., Lopes N., Oliveira P., IEEE, 2018, 54–59.

18. Afanasiev AY, Makarov VG, Zagirova VN. Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions. *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*. 2020;6:128-131.

19. Malev NA, Pogoditsky OV, Cvetkovich AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):101-110.

20. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):142-154.

21. Stashinov YP. On the issue of control system adjustment of a direct current drive on the modular optimum. Part 1. *Russian Electrical Engineering*. 2016;1:2-7.

22. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov .E. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1(1):88.

Authors of the publication

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

Oleg V. Pogoditsky – cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Margarita R. Chilyaeva – student, Department «Automation of technological processes and production», Kazan State Power Engineering University.

Ayrat R. Imamiev – engineer of the projects support group for KRiS branch JSC «Grid Company»– «Directorate of facilities under construction».

Получено 20.03.2022г.

Отредактировано 25.03.2022г.

Принято 30.03.2022г.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ



УДК 639.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-2-175-185

ВОДНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ В СТРУКТУРЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

М.Л. Калайда., А.Р. Саетов

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

kalayda4@mail.ru

Резюме. ЦЕЛЬ. Исследование рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы как пример экологического решения проблемы сохранения водных биологических ресурсов на энергетическом объекте. МЕТОДЫ. Проведен сравнительный анализ собственных исследований и литературных данных по применению и оценке эффективности рыбозащитных сооружений (РЗС). Для отбора ихтиологических проб применялись сети ячеей 10, 18, 22, 30 и 70 мм, установленные перед водоподводящими каналами к береговым насосным станциям (БНС). При анализе эффективности работы РЗС рассмотрены методы учета рыбы: способ отлова рыб и порядок проведения наблюдений на объекте. Оценка попадания рыб на БНС (после РЗС) осуществлялась по круглосуточным наблюдениям за проникающими в водоподводящий канал рыбами в сравнении с попаданием их на сороудерживающие вращающиеся сетки водоочистных машин на БНС. Коэффициент эффективности определяли по разности концентрации рыбы перед РЗС (на водохранилище) и после РЗС (на БНС). РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что коэффициент эффективности РЗС по типу водовоздушной завесы в среднем составил 86,9%, что превышает нормативную эффективность. Выявлено, что рыбозащитное сооружение (РЗС) по типу водовоздушной завесы является наиболее экологичным техническим решением при заборе воды на энергообъектах. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Отмечено улучшение экологической ситуации в районе расположения РЗС по типу водовоздушной завесы по концентрации кислорода в воде и снижению трофии за счет окисления органических веществ.

Ключевые слова: аквакультура; объекты энергетики; ихтиоценоз; рыбозащитное сооружение; водовоздушная завеса; эффективность рыбозащиты.

Для цитирования: Калайда М.Л., Саетов А.Р. Водные биологические ресурсы в структуре экологических проблем энергетических объектов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 175-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-175-185.

WATER BIOLOGICAL RESOURCES IN THE STRUCTURE OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF ENERGY FACILITIES

ML. Kalaida., AR. Saetov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

kalayda4@mail.ru

Abstract. THE PURPOSE. The study of a fish protection structure such as a water-air curtain as an example of an ecological solution to the problem of conservation of aquatic biological resources at an energy facility. METHODS. A comparative analysis of our own research and literature data on the use and evaluation of the effectiveness of fish protection structures (FPS) has been carried out. For the selection of ichthyological samples, mesh networks of 10, 18, 22, 30 and 70 mm were used, installed in front of the water supply channels to the shore pumping stations (SPS). When analyzing the efficiency of the FPS, the methods of fish accounting are considered:

the method of catching fish and the procedure for conducting observations at the facility. The assessment of fish ingress to the SPS (after the FPS) was carried out by round-the-clock observations of fish penetrating into the water supply channel in comparison with their ingress to the water-retaining rotating nets of water treatment machines on the SPS. The efficiency coefficient was determined by the difference in the concentration of fish before the FPS (at the reservoir) and after the FPS (at the SPS). RESULTS. It is shown that the efficiency coefficient of the FPS by the type of water-air curtain averaged 86.9%, which exceeds the regulatory efficiency. It has been revealed that a fish protection structure (FPS) by the type of a water-air curtain is the most environmentally friendly technical solution for water intake at power facilities. CONCLUSION. The improvement of the ecological situation in the area of the location of the RSL by the type of water-air curtain in terms of the concentration of oxygen in the water and the reduction of trophies due to the oxidation of organic substances was noted. concentration in water and of decrease in trophy due to the oxidation of organic substances.

Keywords: aquaculture; energy facilities; ichthyocenosis; fish protection structure; water-air curtain; fish protection efficiency.

For citation: Kalaida ML, Saetov AR. Water biological resources in the structure of environmental problems of energy facilities. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):175-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-175-185.

Введение

Современный уровень производства тепловой и электрической энергии сопровождается использованием большого количества природной воды. Опыт многолетней эксплуатации мощных энергоблоков свидетельствует о том, что необходимым условием длительной, надежной и экономичной эксплуатации ТЭС является рациональная организация водоподготовки и водного режима [1].

В разработанной «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» определено, что целью энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укреплению ее внешнеэкономических позиций [2]. Достижение этой цели намечено путём перехода на путь инновационного и энергоэффективного развития, изменения структуры и масштабов производства энергоресурсов, создания конкурентной рыночной среды и интеграции в мировую энергетическую систему.

Электропотребление в 2021 году увеличилось на 6% по сравнению с 2020 годом, и на 2,6% – от уровня доковидного 2019 года. Выработка электроэнергии за 2021 год выросла на 6,6%, в том числе: выработка ТЭС выросла на 10%, ГЭС на 1,3%, АЭС около 2% [3]. Следует заметить, что энергия в пригодной к употреблению форме является ресурсом ограниченным, поэтому её относительная доступность влияет как на развитие отдельных стран, так и в целом на развитие мировой экономики.

Тепловые электростанции являются наиболее крупными потребителями воды с наибольшим расходом ее для охлаждения технологического оборудования. Основное потребление технической воды на ТЭС вызвано необходимостью отвода теплоты от отработавшего пара в конденсаторах турбин – 85-95 %. Для конденсации 1 т пара необходимо в среднем 60-100 м³ воды [4]. Остальные 5-15 % объема воды расходуются на нужды различных технологических циклов: охлаждение масла и воздуха, подшипников различных механизмов – 3-8 %; восполнение потерь пара и конденсата в рабочем пароводяном цикле – 0,2-0,8 %; удаление золы и шлака при работе на твердом топливе – 2-5 %; подготовка подпиточной воды теплосети на ТЭС и др. [4].

Тепловые электростанции используют при своей работе большие объёмы водных ресурсов для охлаждения оборудования. Законодательно определено, что все водозаборные сооружения должны быть оснащены эффективно функционирующими рыбозащитными сооружениями (РЗС). Одним из наиболее часто используемых на энергетических объектах и наиболее эффективных технических решений по установке рыбозащитных сооружений является РЗС по типу водовоздушной завесы. Актуальность нашего исследования заключается в том, что результаты данного исследования могут быть использованы многочисленными эксплуатантами РЗС типа водовоздушная завеса, как предприятий энергетики, так и во многих других областях промышленности.

Научная значимость работы заключается в том, что РЗС исследуется не только по основному назначению как средство защиты рыб (особенно личинок и молоди) от попадания в водозаборы, в результате чего рыба погибает и рыбному хозяйству наносится ущерб, но и как эффективный аэратор воды, который повышает концентрацию кислорода в воде, что, в свою очередь, приводит к снижению трофии за счет окисления органических веществ. Результаты исследований позволяют прийти к интересному выводу: рыбозащитное сооружение (РЗС) по типу водовоздушной завесы является многофункциональным техническим решением, которое в процессе работы позволяет значительно улучшить экологическую ситуацию в районе расположения РЗС.

Практическая значимость исследования рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы заключается в том, что результаты исследования опробованы в условиях реально функционирующего РЗС предприятия энергетики. Результаты данной работы можно использовать при разработке, модернизации и внедрении РЗС, что будет полезно как для владельцев функционирующих РЗС, так и для разработчиков РЗС.

Исторически производство энергии в регионе Среднего Поволжья было связано с водными объектами – мельничными запрудами на малых реках. В конце 19 – начале 20 столетия развитие рыбного хозяйства было связано с практически первыми энергетическими установками – мельничными запрудами. М.Д.Рузский первый описывает своеобразную категорию рыбохозяйственных водоемов, существовавших в тот период, – мельничные пруды. Он писал, что мельничные пруды настолько характерны для реки, что заслуживают особого изучения. Он писал, что: "эти пруды, находящиеся всегда ...около водяных мельниц, представляют особый тип речных образований и являются продуктом деятельности человека". Пруды образуются при преграждении реки мельничными плотинами и очень удобны для жизни рыб. Многие виды рыб использовали мельничные пруды не только для нагула, но и для размножения и нагула молоди. Для Казанской губернии на реке Свияге были характерны мельничные пруды, у которых плотины были не высокими, не сплошными, с широким отверстием в середине, через которое вода протекала постоянно быстрой струей с шумом и волнами "до некоторой степени напоминали горные речки: текли быстро по песчаному и каменистому ложу и имели прозрачную воду с низкой температурой воды». В р. Свияге обитало 33 вида рыб, среди которых была форель (*Salmo fario*, L.). Форель обитала исключительно в самых мелких притоках с холодной ключевой водой, быстрым течением и песчано-каменистым дном. Среди обитателей р. Свияги и ее притоков приводятся стерлядь и минога (*Petromyzon sp.*). Берега мельничных прудов были часто очень крутыми, поэтому почти совершенно отсутствовали заросли жесткой растительности. А благодаря высокому подпору (2-4 м), мельничные пруды имели значительную протяженность. Так, на р. Свияге Киятский пруд имел протяженность 19,5 км, а Ивановский -14,8 км [5]. Для этого периода характерно экстенсивное рыбоводство, ориентированное на выращивание рыбной продукции на естественной кормовой базе в водоемах разной трофности с рыбопродуктивностью от нескольких кг/га в олиготрофных форелевых хозяйствах до 200 кг/га в эвтрофных прудовых хозяйствах. Эти первые «энергетические» водоемы выполняли очень важные экологические функции: они обеспечивали подпор грунтовых вод и, тем самым, делали территорию комфортной для земледелия. Сохранились сведения о необходимом количестве рыбы для ее потребления городским населением в Казанской губернии. Эти данные собирались Управлением делами Особого Совещания по продовольствию в 22 губерниях России. Из Казанской губернии были поданы сведения о том, что в декабре 1915 и январе 1916 года, города Казанской губернии нуждаются в 135 тыс. пудов рыбы (около 2200 тонн) [5].

Река Волга являлась своеобразным центром, связывающим старые промышленные районы России - Московский, Нижне-Новгородский, Северный и Средний Урал - обладающие богатейшими земельными, водными, минеральными ресурсами. Эти ресурсы могли быть использованы лишь при наличии энергетической базы. Еще в конце 19 и начале 20 столетий выдвигались различные проекты сооружения ГЭС, однако среди них не было проектов, учитывающих весь комплекс проблем. Отсутствовали необходимые топографические, геологические, гидрологические и экономические обоснования. В связи с этим в 1931 году Госплан СССР поручил Всесоюзному научно-исследовательскому институту энергетики и электрификации разработать рабочую гипотезу комплексной схемы использования Волги в энергетических и транспортных целях. Эта схема была рассмотрена на ноябрьской сессии Академии наук СССР в 1933 году, посвященной проблеме "Большой Волги". Проблема трактовалась как ирригационная, транспортная и энергетическая. Мнение крупнейших ученых географов, ихтиологов, биологов Л.С. Берга, Н.М. Книповича, Н.И. Вавилова, А.А. Рихтера и других, указывавших на недопустимость строительства

гидроузлов на нижней Волге, поскольку они существенно нарушают условия воспроизводства ценнейших осетровых рыб, не было принято во внимание [5]. Уловы в р. Волге до ее зарегулирования в пределах будущего Куйбышевского водохранилища колебались от 1350 до 1910 тонн [5]. Максимальные уловы в водоемах Татарстана в период до образования Куйбышевского водохранилища приходятся на начало 30-ых годов. Товарная рыбная продукция всех водоемов Татарстана составила в 1932 г. – 2020 тонн, в 1933 г. – 2300 тонн [5].

Гидроэнергетика в мире обуславливает 6,7% от производимой энергии (рис.1), это составляет 71% от возобновляемой электроэнергии [6]. В период формирования волжских водохранилищ закладывается целый комплекс экологических проблем, связанных с изменением речного режима на озерный. Смена экологических факторов среды для гидробиологических объектов привела к изменениям в структуре ихтиоценоза и, одновременно, вызвала необходимость совершенствования биотехнологий воспроизводства ценных видов рыб [7, 8].

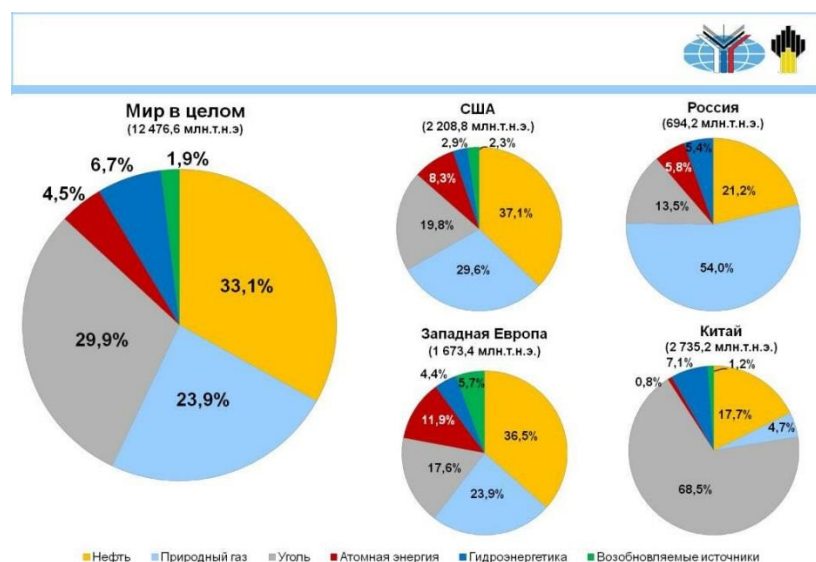


Рис. 1. Структура энергетики в мире в %-ном соотношении по источникам энергии по [2, 3]

Fig. 1. The structure of energy in the world in % ratio by energy sources according to [2, 3].

В развитии аквакультуры для этого периода характерно интенсивное рыбоводство на базе прудов и водохранилищ, включая увеличение плотности посадки рыбы в хозяйствах, кормление искусственными кормами, поликультуру, различные приемы мелиорации, позволяющие повысить рыбопродуктивность до 30 ц/га.

При современном уровне развития науки и техники тепловые электростанции имеют очень высокий потенциал в плане улучшения экологических показателей. К примеру, эти станции используют при своей работе большие объёмы водных ресурсов, необходимые для охлаждения оборудования. В соответствии с Водным Кодексом РФ, Постановлением правительства Российской Федерации № 380 от 29.04.2013 г. «Об утверждении Положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания» – запрещена эксплуатация водозаборных сооружений, не оборудованных рыбозащитными устройствами (РЗУ) или сооружениями (РЗС). Водозаборы должны не только надежно подавать воду, но и функционировать как средство рыбозащиты [9]. Эффективность предотвращения попадания рыб и иных водных биологических ресурсов в водозаборы должна составлять не менее 70% [10, 11].

К концу XX столетия сформировалось интенсивное индустриальное рыбоводство на базе установок с замкнутым циклом водоснабжения с адаптированными методами интенсификации для круглогодичной эксплуатации водных экосистем с возможностью увеличения рыбопродуктивности до 300 и более кг/м³. Круглогодичное выращивание аквакультур в замкнутом цикле водооборота позволяет вовлекать в производство теплые отработанные воды объектов энергетики [12].

В сентябре 2015 года Организация Объединенных Наций обозначила среди главных направлений деятельности обеспечение устойчивого развития на период до 2030 года [13, 14]. Отмечено, что 17 целей в области устойчивого развития (ЦУР) пока не достигли необходимых темпов и масштабов. В связи с этим основными задачами сегодняшнего

времени стало рассмотрение состояния мирового рыболовства и аквакультуры с позиций выбора мер по повышению устойчивости. Подчеркивается все более важная роль рыболовства и аквакультуры в обеспечении продовольствия, питания и занятости населения.

В материалах ФАО (2020) отмечаются стратегии включения рыбы в продовольственные системы в интересах обеспечения продовольственной безопасности и питания, среди которых подчеркивается значимость переосмысления подходов к промышленному рыболовству в XXI веке, повышению качества оценки рыболовства во внутренних водоемах в мировом масштабе [13].

По данным доклада в 2020 г. Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций [13] отмечаются две основные тенденции в изменении вылова рыбы по основным водосборным речным бассейнам. Первая тенденция – рост вылова рыбы во внутренних водоемах – отмечается в 37 странах, на долю которых приходилось 58,7 % мирового вылова рыбы во внутренних водоемах: самый значительный рост был отмечен в Китае, Индии, Камбодже, Индонезии, Нигерии, Российской Федерации и Мексике. В 28 странах, на которые приходилось 5,9 % мирового вылова во внутренних водоемах, вылов сокращался, а объем продукции аквакультуры значительно рос – в Бразилии, Таиланде, Вьетнаме и Турции. Доля реки Волги в глобальном вылове рыбы по основным водосборным речным бассейнам в мире от общего вылова – 0,28 %, а Каспийского моря – 0,76 %.

Переосмысление освоения ресурсов внутренних водоемов включает такие задачи как направленное формирование ихтиофауны, пастбищную аквакультуру, увеличение компенсационных выпусков молоди рыб от искусственного воспроизводства. Не менее значимым мероприятием в этих условиях становится повышение эффективности рыбозащитных сооружений на водозаборах энергетических предприятий.

Постановка задачи

Цель данного исследования - рассмотрение рыбозащитной водовоздушной завесы как современного экологического решения проблемы сохранения водных биологических ресурсов.

Материал и методика исследования

В ходе работы был проведен анализ собственных исследований и литературных данных по применению и оценке эффективности рыбозащитных сооружений. Для отбора ихтиологических проб применялись сети ячеей 10, 18, 22, 30 и 70 мм перед водоподводящими каналами к БНС-3 (перед РЗУ на Заинском водохранилище). При анализе эффективности рыбозащитных сооружений рассмотрены методы учета рыбы: способ отлова рыб и порядок проведения наблюдений на объекте. Оценка попадания рыб на БНС-3 (после РЗУ) осуществлялась по круглосуточным наблюдениям (в течение 4 суток) за проникающими в водоподводящий к БНС-3 канал рыбами и попаданием их на сороудерживающие вращающиеся сетки водоочистных машин на БНС по [15, 16]. Рассмотрены и изучены основные технологические параметры РЗУ, учитываемые при их эксплуатации.

Результаты исследования и их обсуждение

В связи с гидростроительством с 50-х лет XX столетия РЗУ являются обязательным компонентом водозаборных сооружений. Организация эксплуатации РЗУ включает контроль за оборудованием и водными параметрами (расход, уровни, скорость потока и др.).

Современные РЗУ являются составной, технически сложной, частью водозаборных сооружений, работа которых совершенствуется в направлении улучшения технических характеристик, обеспечивающих более высокую эффективность рыбозащиты.

Большинство водозаборных сооружений оказывают отрицательное влияние на ихтиофауну водного бассейна. Водные экосистемы испытывают высокую нагрузку, а отдельные ценные виды рыб находятся на грани исчезновения.

Внедрение РЗУ на водозаборах направлено на решение двух проблем – экологической и технологической. Экологический аспект определяется требованием минимизации числа молоди рыб, погибающей при изъятии из открытых водоемов значительных объемов воды для технических и бытовых нужд. Технологический аспект связан с необходимостью защиты оборудования береговых насосных станций от посторонних включений (рыбы, ветки, водоросли, песок, ил и т.д.), которые при интенсивном потреблении воды снижают срок службы и надежность функционирования технологического оборудования.

Различают три основных принципа предотвращения попадания молоди рыб в водозаборные сооружения с использованием РЗУ: экологический, поведенческий и физический. На основании этих принципов разработаны способы защиты, определяющие характер воздействия на объект защиты. Основной причиной попадания рыбы в водозаборные сооружения является пассивный снос ее потоком воды. Попадание рыб в водозаборные сооружения связано с одной стороны с физической невозможностью сопротивляться течению, а с другой стороны, с отсутствием условий для ориентации рыб в потоке, в первую очередь, с отсутствием условий для зрительной ориентации.

Анализ патентных материалов показал, что, начиная с 2000-х годов и по настоящее время, практика использования РЗУ направлена в основном на защиту молоди лососевых видов рыб. В сооружения рыбозащиты, кроме РЗУ входит рыбосборник, рыбонасос, сепаратор рыб, бассейн для сбора рыб, станции мечения и профилактики рыбы от болезнетворных инфекций, система охлаждения воды, система подачи рыбы в транспортные средства, автоцистерны или баржи с системой жизнеобеспечения рыб [17, 18, 19].

Одним из наиболее эффективных и в то же время наиболее экологичных типов рыбозащитных устройств являются конструкции воздушно-пузырькового типа - водовоздушная завеса [20]. Данное РЗУ работает по принципу восходящей водовоздушной завесы, сформированной системой придонных модулей РЗУ с аэрирующими соплами. Принцип работы данного типа сооружений состоит в подаче насосами воды на модули РЗУ с одновременным забором воздуха по отдельному трубопроводу-воздуховоду (Рис.1). Эффект водовоздушной завесы, создается подачей в перфорированный трубопровод мелкодисперсной водовоздушной суспензии. Опыт применения гидрокавитационных технологий позволил создать гидрокавитационный аэратор для получения водовоздушной суспензии с эжекцией воздуха из атмосферы.

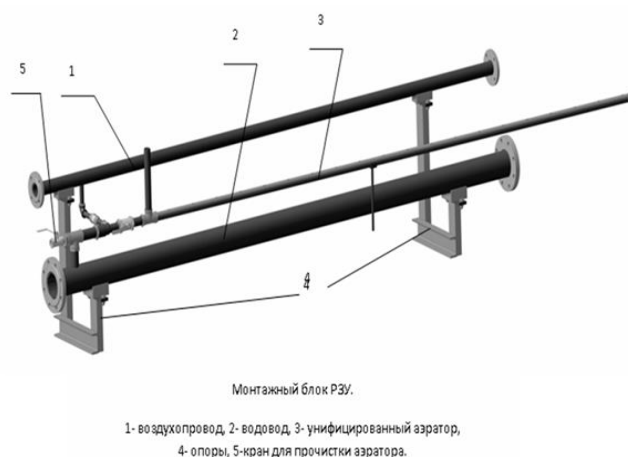


Рис. 2. Монтажный блок РЗУ

Fig. 2. The mounting block of the FPS

Отточные потоки вальцов водовоздушных завес создают устойчивый поверхностный рыбоотводящий поток, обеспечивающий отвод молоди рыбы в зону действия транзитного потока реки. В результате на выбранном участке водоёма от дна до поверхности воды образуется рыбозащитный фронт, не позволяющий рыбе попадать в водоприёмные устройства. Использование V-образного луча заградительного фронта РЗУ типа «Водовоздушная завеса» повышает эффективность работы не только за счет наличия двойного заградительного фронта, но и за счет появляющегося отточного течения между расходящимися лучами на поверхности водоема, этим обеспечивается отвод молоди рыб на край заградительного фронта (рис. 2, 3). Проект РЗУ на основе водовоздушной завесы реализован на водозаборных сооружениях береговых насосных станций филиала ОАО «Татэнерго» Заинская ГРЭС, где в 2015-2019 годы были смонтированы РЗУ типа водовоздушная завеса.

Проведенное исследование выявило, что основными видами воздействия на молодь рыб в районе РЗУ на основе водовоздушной завесы являются: тактильное, визуальное, акустическое и механическое. Особенностью данного типа РЗУ является создание условий для избегания рыб из зоны восходящих водо-воздушных потоков, издающих низкочастотные колебания.

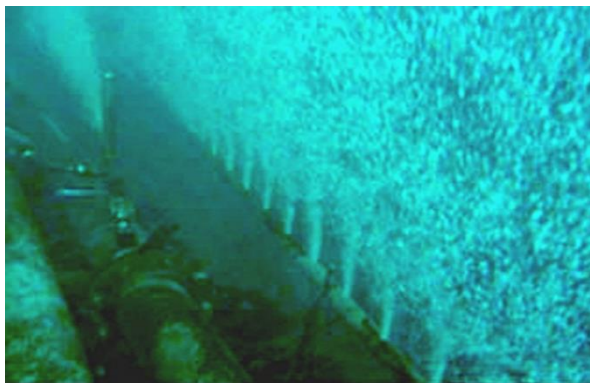


Рис. 3. Работа РЗУ типа «водовоздушная завеса» в действии

Fig.3. The work of the FPS type "water-air curtain" in action

РЗУ на основе водовоздушной завесы характеризует высокая надежность, простота конструкции, отсутствие загрязнения окружающей среды. Дополнительным преимуществом водовоздушной завесы является защита водозабора от взвешенного и плавающего мусора, который поднимается восходящим потоком на поверхность и отводится из зоны водозабора поверхностным течением. Кроме того, в зимний период в зоне действия водовоздушной завесы образуется полынья, что благодаря поверхностным течениям защищает водозабор от попадания плавающего льда и шуги.

Для современного этапа эксплуатации водохранилищ характерны изменения климатических характеристик – повышение в летний период температуры воды, снижение содержания растворенного кислорода, цветение за счет развития цианобактерий, приводящие к «заморным» условиям – массовой гибели рыбы [21, 22, 23].

РЗУ на основе водовоздушной завесы с пузырьками воздуха диаметром 1...3 мм за счет использования гидродинамического кавитационного аэратора оказывает значительное положительное воздействие на гидрохимическое состояние, увеличивая содержание кислорода, как в летний период, так и зимой за счет аэрации и образования полыньи зимой. Аэрация способствует окислению органических веществ в воде, тем самым способствуя снижению уровня эвтрофирования водной экосистемы. Восходящие потоки улучшают условия перемешивания вод, способствуя снижению температуры летом в поверхностных слоях [24, 25, 26].

На основании исследований, проведенных на водозаборных сооружениях Заинской ГРЭС в течение четырех сезонов (весна, лето, осень, зима), выявлено, что наибольшее количество рыб попадает на береговую насосную станцию №3 Заинской ГРЭС в летний период, а наименьшее – в ранневесенний (преднерестовый), зимний и осенний периоды [25, 26]. Так как РЗС на Заинской ГРЭС уже установлено, то коэффициент его эффективности определяли по разности концентрации рыбы перед РЗС (Заинское водохранилище) и после РЗС (БНС-3). На основании проведенных расчетов с учетом всех факторов внешней среды средний показатель рыбозащитной эффективности (Кэф) РЗС составил: в весной – 83,7%; летом – 83,4%; осенью – 83,3%; зимой – 97,2%. Таким образом, на основании проведенных сезонных исследований и расчетов с учетом факторов внешней среды показатель рыбозащитной эффективности РЗУ на основе водовоздушной завесы, установленного на БНС №3 филиала АО «Татэнерго» – Заинская ГРЭС, в среднем составил 86,9%, что намного превышает нормативную эффективность (не менее 70%) [26, 27].

Средняя суммарная эффективность всех РЗУ типа водовоздушная завеса, установленных на Заинской ГРЭС составила 80%, что на 14,3% выше нормативной эффективности предотвращения попадания рыб в водозаборы [26, 27]. Кроме того, определилась задача совершенствования методов контроля эффективности РЗУ - проведения мониторинга в режиме постоянной работы.

Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы выявили улучшение экологической ситуации, снижение цветения воды в зоне РЗУ.

Заключение

При повышении эффективности рыбохозяйственных работ на водохранилищах, организации мероприятий по направленному формированию ихтиоценозов, пастбищной аквакультуре повышается роль рыбозащитных устройств при заборе воды. [24, 27].

Модернизация основного элемента РЗУ типа «водовоздушная завеса» обеспечила формирование водо-воздушную смеси с пузырьками воздуха диаметром 1...3 мм за счет

использования гидродинамического кавитационного аэратора, устанавливаемого на берегу на линии обратного сброса воды. [27, 28]. Получен положительный эффект: коэффициент эффективности РЗУ в среднем составил 86,9%, что превышает нормативную эффективность. Отмечен позитивный факт значительного улучшения экологической ситуации в районе расположения РЗУ по содержанию растворенного кислорода в воде и снижению трофии за счет окисления органических веществ [28].

В работе исследована эффективность работы РЗС в условиях реально функционирующего РЗС по типу водовоздушной завесы, функционирующего на предприятии энергетики. Коэффициент эффективности РЗС в среднем составил 86,9%. Сравнительный анализ проведенных исследований и литературных данных по применению и оценке эффективности рыбозащитных сооружений (РЗС) показал, что РЗС по типу водовоздушной завесы эффективно защищает рыб (особенно личинок и молоди) от попадания в водозаборы. Нормативная эффективность составляет 70% [27, 28].

Известные из литературы исследования работы рыбозащитных сооружений (РЗС) типа водовоздушной завесы посвящены, в основном, определению эффективности рыбозащитных сооружений (РЗС) [28]. В работе авторы исследовали влияние рыбозащитного сооружения (РЗС) типа водовоздушной завесы на концентрацию кислорода в воде в районе расположения РЗС. Авторы пришли к выводу, что установка и функционирование РЗС типа водовоздушной завесы приводит к снижению трофии за счет выявленного результата в виде окисления органических веществ. Таким образом, в известной литературе вопрос влияния рыбозащитного сооружения (РЗС) типа водовоздушной завесы на экологическую составляющую изучен недостаточно всесторонне. Научное приращение результатов данного исследования заключается в обнаружении эффекта положительного воздействия РЗС типа водовоздушной завесы на улучшение экологической ситуации в районе расположения РЗС.

Литература

1. Энергетика и охрана окружающей среды / Под ред. Н.Г. Залогина, Л.И. Кроппа, Ю.М. Кострикова. М.: Энергия, 1979. 352 с.
2. Электронный ресурс. <https://minenergo.gov.ru/node/15357>
3. Электронный ресурс. <https://www.m.eprussia.ru/epr/articles/elektroenergetika-v-2021-godu-itogi-i-perspektivy>
4. Экология энергетики / Под ред. В.Я. Путилова. М.: МЭИ. 2003. 715 с.
5. Калайда М.Л. История и перспективы развития рыбного хозяйства Татарстана. Казань: Изд-во «Матбугат йорты», 2001. 96 с.
6. Афанасьева Е. А., Кислякова М. Д. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Молодой ученый. 2017. № 40 (174). С. 1-4.
7. Хамитова М.Ф., Калайда М.Л. Исследование изменений гидробиологических характеристик в условиях локальных загрязнений в регионе Средней Волги. LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Германия. 2018, 310 с.
8. Калайда М.Л., Муганцева Т.П. Повышение эффективности работы системы технического водоснабжения ТЭС // Известия ВУЗов: Проблемы энергетики 2012. № 7/8. С. 128
9. Электронный ресурс https://i-a.d-cd.net/VASC5L9CrrNd_3puOqYsjZv8qFs-1920.jpg
10. Методические рекомендации по определению эффективности рыбозащитных сооружений на водозаборах. М.: ЦУРЭН, 2016.
11. Беспалов А.Г., Сальников А.Л., Беспалова О.Н., Давыдова С.А. 2016 Гидротехнические сооружения (Москва: КНОРУС) С. 94-95.
12. Калайда М.Л. Задачи развития аквакультуры в Республике Татарстан на современном этапе. Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2017. №8 (139)/2017. С.7-16
13. ФАО. 2020. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры-2020. Меры по повышению устойчивости. Рим, ФАО. 223 с.
14. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры: достижение целей устойчивого развития 2018 // Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/Состояние202018.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
15. Малеванчик Б.С., Никоноров И.В. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения // Москва. Легкая и пищевая промышленность, 1984. С. 256

16. Кузьмин Ю.И. Методические рекомендации по Проектированию рыбозащитных устройств водозаборных сооружений // Ленинград. ГосНИОРХ. 1972. С. 57.
17. Чистяков А.А., Шкура В.Н., Михеев П.А. Способ защиты молоди рыб от попадания в водозаборное сооружение и рыбозащитное устройство, его осуществляющее // Патент России №2326209. 2008.
18. Чистяков А.А., Шкура В.Н., Михеев П.А. Способ промывки сетного полотна рыбозащитного сооружения и устройство, его осуществляющее // Патент России №2326206. 2008.
19. Иванов А.В., Филиппов Г.Г. Способ обеспечения безопасности рыб на ГАЭС // Патент России №2346108. 2009.
20. Калайда М. Л, Саетов А Р Рыбозащитные сооружения на водоемах объектов энергетики как важное мероприятие по сохранению стада рыб. Международный водно-энергетический форум-2018: сборник материалов докладов. 2 т. Т.1.-Казань: Казанский государственный энергетический университет 2018. С.108-113.
21. Калайда М.Л. Процессы самоочищения водных экосистем и их регуляция в условиях эвтрофирования // Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения. Материалы международной научно-практической конференции. Казань, 2017. С.4-12.
22. Калайда М.Л., Гордеева М.Э. Особенности физико-химического состояния вод водоемов объектов энергетики. - Международный водно-энергетический форум -2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1. Казань:Казанский государственный энергетический университет 2018. С.284-290.
23. Говоркова Л. К., Калайда М. Л. Проблемы и перспективы использования теплых вод ГРЭС в решении обеспечения населения рыбой. - Международный водно-энергетический форум 2018: сборник материалов докладов / в 2 т. Т.1. Казань: : Казанский государственный энергетический университет, 2018. С.113-119.
24. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. // Состояние мирового рыболовства и аквакультуры, 2018. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/Состояние202018.pdf> (дата обращения: 20.02.2020).
25. Калайда М.Л. Современное состояние и задачи развития аквакультуры в Республике Татарстан. Состояние и пути развития аквакультуры в Российской Федерации в свете импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности страны: материалы национальной научно-практической конференции (Саратов, 4-5 октября 2016 г.) Саратов: изд. «Научная книга», 2016. С.38-45.
26. Калайда М.Л. Обеспечение качества вод в Республике Татарстан – глобальный гражданский долг каждого современного человека / Хартия земли – практический инструмент решения фундаментальных проблем устойчивого развития: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию реализации принципов Хартии Земли в Республике Татарстан. Казань: Татар. кн. изд-во, 2016. С. 148-152.
27. Калайда М.Л., Абдрахманов И.К., Хамитова М.Ф., и др. Выпуск стерляди в Куйбышевское водохранилище – важная задача развития аквакультуры // Международный водно-энергетический форум – 2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1. –Казань: Казан.гос.энерг.унт, 2018. С.68–74.
28. Хамитова М.Ф., Калайда М.Л. Исследование изменений гидробиологических характеристик в условиях локальных загрязнений в регионе Средней Волги / LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Германия, 2018. 310 с

Авторы публикации

Марина Львовна Калайда – д-р биол. наук, профессор; заведующий кафедрой «Водных биоресурсов и аквакультуры», Казанский государственный энергетический университет. kalayda4@mail.ru.

Айнура Расихович Саетов – аспирант, Казанского государственного энергетического университета; sayetov67@mail.ru.

References

1. *Energy and environmental protection*. Edited by N.G. Zalogin, L.I. Kropp, Yu.M. Kostrikova. M.: Energiya, 1979. 352 p.
2. Electronic resource <https://minenergo.gov.ru/node/15357>
3. Electronic resource <https://www.m.eprussia.ru/epr/articles/elektroenergetika-v-2021-godu-itogi-i-perspektivy>
4. *Ecology of energy* / Edited by V.Ya. Putilova. M.: MEI. 2003. 715 p.
5. Kalaida ML. *The history and prospects of the development of the fishing industry of Tatarstan*. Kazan: Publishing house «Matbugat yorty», 2001. 96 p.
6. Afanasyeva E.A, Kislyakova M.D. The main problems of energy and possible ways to solve them. *Young scientist*. 2017;40 (174):1-4.
7. Khamitova MF, Kalaida ML. *Investigation of changes in hydrobiological characteristics under conditions of local pollution in the Middle Volga region*. LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Germany. 2018, 310 p.
8. Kalaida ML, Mugantseva TP. Improving the efficiency of the TPP technical water supply system. *Izvestiya VUZov: Problems of Energy*. 2012;7/8:128
9. Electronic resource https://i-a.d-cd.net/VASC5L9CrrNd_3puOqYsjZv8qFs-1920.jpg
10. *Methodological recommendations for determining the effectiveness of fish protection structures at water intakes*. Moscow: TSUREN, 2016.
11. Bespalov AG, Salnikov AL., Bespalova ON, et al. 2016 *Hydraulic structures* (Moscow: KNORUS) pp. 94-95.
12. Kalaida ML. Problems of aquaculture development in the Republic of Tatarstan at the present stage. *Fish farming and fisheries*. 2017;8 (139):7-16
13. FAO. 2020. The state of world fisheries and aquaculture – 2020. *Measures to increase sustainability*. Rome, FAO. 223 p.
14. The state of world fisheries and aquaculture: achieving the Sustainable Development Goals 2018. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/State202018.pdf> (accessed: 02/20/2020).
15. Malevanchik BS, Nikonorov IV. Fish-passing and fish-protection structures. *Moscow. Light and food industry*. 1984. p. 256
16. Kuzmin YuI. Methodological recommendations for the design of fish protection devices of water intake structures. *Leningrad. GosNIORH*. 1972. p. 57.
17. Chistyakov AA, Shkura VN, Mikheev PA. *A method for protecting juvenile fish from entering a water intake structure and a fish protection device that implements it*. Patent of Russia No. 2326209. 2008.
18. Chistyakov AA, Shkura VN, Mikheev PA. *Method of washing the netting of a fish protection structure and the device that implements it*. Russian Patent No. 2326206. 2008.
19. Ivanov AV, Filippov GG. *Method of ensuring the safety of fish at the PSPP*. Russian Patent No. 2346108. 2009.
20. Kalaida ML, Saetov AR. *Fish protection structures on reservoirs of energy facilities as an important event for the conservation of fish herds*. International Water and Energy Forum-2018: collection of materials of reports/ in 2-vols. t.1.-Kazan: Kazan.state.energy.unt, 2018. 373 pp.108-113.
21. Kalaida ML. Processes of self-purification of aquatic ecosystems and their regulation in conditions of eutrophication. *Global spread of anthropogenic eutrophication of water bodies: problems and solutions*. Materials of the international scientific and practical conference. Kazan, 2017. pp.4-12.
22. Kalaida ML, Gordeeva ME. *Features of the physico-chemical state of waters of reservoirs of energy facilities*. International Water and Energy Forum -2018: collection of materials of reports/ in 2 vols. Vol.1. -Kazan: Kazan.state.energy.unt, 2018. 373 p. p.284-290.
23. Govorkova LK, Kalaida ML. *Problems and prospects of using warm waters of GRES in the solution of providing the population with fish*. International Water and Energy Forum 2018: collection of materials of reports/ in 2 vols. V.1. Kazan: Kazan. state. energy. cnt, 2018;373:113-119.
24. *Background information on the development and support of aquaculture (fish farming) in the Russian Federation*. Moscow: FSBI «Rosinformagrotech», 2017. 64 p. Food and Agriculture Organization of the United Nations. // The state of world fisheries and aquaculture, 2018. URL: <http://aquacultura.org/upload/files/pdf/library/fao/State202018.pdf> (accessed: 02/20/2020).
25. Kalaida ML. *The current state and tasks of aquaculture development in the Republic of Tatarstan*. The state and ways of aquaculture development in the Russian Federation in the light of import substitution and ensuring the country's food security: Proceedings of the National Scientific

and Practical conference (Saratov, October 4-5, 2016) Saratov: ed. «Scientific Book», 2016. - pp.38-45.

26. Kalaida ML. *Ensuring water quality in the Republic of Tatarstan is a global civic duty of every modern person*. The Earth Charter is a practical tool for solving fundamental problems of sustainable development: a collection of materials of the International scientific and Practical Conference dedicated to the 15th anniversary of the implementation of the principles of the Earth Charter in the Republic of Tatarstan. Kazan: Tatar. publishing House, 2016. pp. 148-152.

27. Kalaida ML, Abdrakhmanov IK, Khamitova MF, et al. The release of sterlet into the Kuibyshev reservoir is an important task for the development of aquaculture. International Water and Energy Forum -2018: collection of materials of reports/ in 2 vols. V.1. Kazan: Kazan.state.energy.cnt, 2018;373(1):68-74.

28. Khamitova MF, Kalaida ML. Investigation of changes in hydrobiological characteristics under conditions of local pollution in the Middle Volga. LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Germany, 2018. 310 p.

Authors of the publication

Marina L. Kalaida –Kazan State Power Engineering University. Email kalayda4@mail.ru.

Aynur R. Saetov – Kazan State Power Engineering University; Russia. Email: saetov67@mail.ru.

Получено 25.03.2022г.

Отредактировано 30.03.2022г.

Принято 01.04.2022г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕССОЛИВАНИЯ КОНЦЕНТРАТА УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА ОТХОДОМ ЭНЕРГЕТИКИ

Л.А. Николаева, Э.Р. Зайнуллина

Казанский государственный энергетический университет»,
Казань, Россия
larisanik16@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. исследовать процесс очистки концентрата установок обратного осмоса (УОО) отходом энергетики. Получить и определить его показатели качества. Изучить механизм адсорбции сульфат и хлорид-ионов сорбционным материалом, изготовленным на основе отхода энергетики. Рассмотреть процесс адсорбции сульфат- и хлорид-ионов этим сорбционным материалом в статических и динамических условиях. МЕТОДЫ. Для определения адсорбционной емкости материала использовался метод переменных навесок. При определении показателей качества воды применяли методы титриметрического, фотоколориметрического анализа. РЕЗУЛЬТАТЫ. В работе изучена технология обессоливания концентрата УОО методом адсорбции. Построена изотерма адсорбции в статических условиях. На основе мелкодисперсного шлама разработан гранулированный сорбционный материал. Представлена выходная кривая для процесса адсорбции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработан сорбционный материал для очистки концентрата УОО на основе отхода энергетики. Построены изотермы адсорбции сульфат и хлорид-ионов. Получен гранулированный сорбционный материал для изучения очистки концентрата в динамических условиях. Представлена адсорбционная технология очистки концентрата УОО от сульфат- и хлорид-ионов отходом энергетики. Проведена сравнительная характеристика технологических показателей и адсорбционной емкости гранулированного сорбционного материала по сульфат- и хлорид-ионам с применением промышленно-выпускаемыми адсорбентами.

Ключевые слова: адсорбционная технология; концентрат установки обратного осмоса; шлам химводоподготовки; сульфат-ионы; хлорид-ионы; сорбционный материал.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>

Для цитирования: Николаева Л.А., Зайнуллина Э.Р. Исследование процесса обессоливания концентрата установок обратного осмоса отходом энергетики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 186-195. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-186-195.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF DESALINATION OF THE CONCENTRATE OF REVERSE OSMOSIS PLANTS BY ENERGY WASTE

LA. Nikolaeva, ER. Zainullina

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
larisanik16@mail.ru

Abstract: PURPOSE. To investigate the cleaning process of the reverse osmosis water filtration system (ROWFS) concentrate with energy waste, to obtain and determine its quality indicators, to study the mechanism of sulfate and chloride ions adsorption by sorption material on the basis of energy waste, to consider the process of sulfate and chloride ion adsorption by this sorption material under static and dynamic conditions. METHODS. The method of variable weights was used to determine the adsorption capacity of the sorption material. Methods of titrimetric and photocolorimetric analysis were used during determining of water quality indicators. RESULTS. In this paper the technology of desalination of the ROP concentrate by the adsorption method was studied. Under static conditions the adsorption isotherm has been constructed. On the basis of

ground sludge the granular sorption material has been developed. The possibility of using ion-exchange filters with granular loading has been considered, the adsorption curve under dynamic conditions has been constructed. CONCLUSION. The sorption based on energy waste - carbonate sludge material for the purification of ROWFS concentrate has been developed. Adsorption isotherms of sulfate and chloride ions were constructed on the basis of experimental data. For investigation the purification of the ROWFS concentrate under dynamic conditions the granular sorption material was obtained. The adsorption technology of ROWFS concentrate purification from sulfate and chloride ions by energy waste is presented.

Keywords: adsorption technology; reverse osmosis plant concentrate; concentrate of the reverse osmosis plant for chemical water treatment; chemical water treatment sludge; сульфат-ионы; chloride ions; sorption material.

Acknowledgments: The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation №18-79-10136 <https://rscf.ru/project/18-79-10136/>

For citation: Nikolaeva LA, Zainullina ER. Investigation of the process of desalination of the concentrate of reverse osmosis plants by energy waste. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(2):187-195. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-186-195.

Введение

На долю теплоэнергетики приходится 65 % выработки электроэнергии в России. Принцип работы ТЭС основан на использовании химической энергии органического топлива, которая путем его сжигания превращается в тепловую энергию, а затем преобразуется в механическую (вращение вала турбины, а за ним и вала электрогенератора).

В энергетике РФ масштабно реализуются проекты по внедрению парогазовых установок (ПГУ), в которых пар, образующийся за счёт нагрева воды в пароводяном тракте, является основным рабочим телом процесса получения электроэнергии. Во избежание повреждения оборудования, а также его быстрого износа, важно соблюдать нормы качества питательной воды, которая подается в пароводяной тракт. Для этого на тепловых электростанциях используются водоподготовительные установки (ВПУ).

Существует ряд схем ВПУ, выбор которых зависит от водоисточника и требований к качеству подаваемой воды в пароводяной тракт. Так как часть основного оборудования на многих ТЭС в России устарело, стали проводиться реконструкции, модернизации и ввод нового оборудования в рамках стратегической программы развития электроэнергетики России. Предпочтение отдавалось установкам, работающим на сверхкритических параметрах, а значит и требования к качеству питательной воды стали строже. Поэтому замена основного оборудования предполагает реконструкцию водоподготовительных установок с применением современных и перспективных методов очистки [1].

Выбор метода подготовки воды зависит от химического состава исходной воды, а также от конечной цели – качества обессоленной воды. Самыми распространенными технологиями обессоливания добавочной воды являются: ионитовое химическое обессоливание; электродиализ; обратный осмос.

Одной из наиболее широко используемых технологий является ионитовое химическое обессоливание. Данная технология является наиболее надежной для вод малой и средней минерализации и применяется уже много лет. [2].

Ионитовое химическое обессоливание включает в себя обработку воды на Н-катионитовых и ОН-анионитовых фильтрах. Принцип работы таких фильтров основан на методе ионного обмена. Метод заключается в ионном обмене функциональных групп ионитов на катионные и анионные примеси в воде.

На Н-катионитовых фильтрах происходит очистка воды от основных солей жесткости. На ОН-анионитовых фильтрах вода очищается от анионов сильных (SO_4^{2-} ; NO_3^- Cl^-) и анионов слабых кислот (HCO_3^- ; CO_3^{2-} ; HSiO_3^- ; SiO_3^{2-}). Основным недостатком этой технологии является большой расход растворов кислоты и щелочи, применяемых для регенерации катионитов и анионитов соответственно.

Электродиализ – это процесс, который происходит в многокамерном аппарате, исходный раствор поступает во все камеры. Под действием постоянного электрического поля катионы перемещаются к катоду, а анионы солей к аноду через мембраны. При этом в нечетных камерах, происходит концентрирование, а в четных деминерализация водного

раствора. В катодной камере раствор подщелачивается, а в анодной – подкисляется. В результате образуется концентрат и пермеат [3].

Одними из основных методов современной водоподготовки ТЭС являются технологии мембранного осмоса. Мембрана представляет собой перегородку, которая имеет свойство пропускать через себя компоненты жидких сред [4].

На этапе обессоливания применяют блок обратноосмотической установки. Обратный осмос (ОО) широко используется для обессоливания воды в системах водоподготовки ТЭС и предприятий различных отраслей промышленности. Установка ОО включает последовательно соединенные модули, эксплуатирующиеся под высоким давлением. Преимущества очистки сточных вод обратным осмосом:

- отсутствие перехода вещества из одной термодинамической фазы в другую при небольшом расходе энергии;

- отсутствие химических реагентов;

- невысокая температура процесса;

- простая конструкция установки обратного осмоса.

Наряду с преимуществами, метод ОО имеет недостатки:

- возрастание солевого содержания у поверхности мембраны;

- невысокий срок службы мембран в установках ОО;

- уменьшение степени ионитного разделения. [5]

Качество мембран применяемых в баке обратного осмоса выявляют не эффективность обессоленной воды. Поэтому мембраны должны иметь высокую селективность, проницаемость, быть устойчивыми к химическим реагентам, обладать достаточной механической прочностью, иметь невысокую стоимость.

Для современных обратноосмотических мембранных элементов степень извлечения растворенных в воде солей (селективность) составляет – 99,8%.

При обратноосмотическом обессоливании образуется пермеат высокого качества, преимуществами мембранных установок является простота в эксплуатации, отсутствие применения реагентов. Серьезную проблему ОО составляет наличие сбросных расходов концентрата, который имеет высокое содержание, что делает невозможным его возврат в оборотный цикл, и сброс в городской коллектор.

В зарубежной литературе описаны и рассмотрены существующие методы обработки концентратов обратного осмоса, такие как сброс, минимизация отходов, переработка, проанализирована перспектива утилизации. Так в Австралии осуществлялся прямой сброс в поверхностные воды или море, так как, этот метод считался наиболее простым, удобным и экономически выгодным. Однако, сброс представлял опасность для водных организмов из-за высокой концентрации в нем ионов металлов и солей. Прямой сброс в глубокую скважину является еще одним эффективным методом утилизации концентратов, если позволяют местные географические условия. Также рассматривался метод возврата концентрата обратно в поток сырья, что может увеличить извлечение воды, а также уменьшить объем концентратов. Тем не менее, если скорость обратного потока слишком высока, соответственно увеличивается соленость поступающего потока, что приводит к сокращению срока службы мембраны. Процесс испарения применим к местности малым годовым количеством осадков [6].

Одной из актуальных проблем является поиск путей утилизации многотоннажных производственных отходов в качестве адсорбционных материалов для очистки обратноосмотического концентрата от различных видов загрязнителей. Такими отходами являются отходы энергетики, агропромышленного комплекса, коксохимического производства, строительства.

В статье впервые научно обоснованы технологические решения обессоливания концентрата установок обратного осмоса, гранулированным карбонатным шламом, образующимся на стадии предварительной очистки воды на объектах теплоэнергетики, до значений нормативно-допустимого сброса, для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Изучен механизм адсорбции сульфат- и хлорид ионов в статических и динамических условиях, построены изотермы адсорбции, установлены закономерности этих процессов.

Практическая значимость экспериментального исследования заключается в предложенном комплексном ресурсосберегающем решении проблемы на топливно-энергетическом комплексе: очистка концентрата после установок обратного осмоса и утилизация отхода энергетики – шлама ХВО.

Материалы и методы

Материалы, используемые для лабораторного исследования, являются: отход энергетики – шлам химводоподготовки, концентрат установки обратного осмоса. Для проведения лабораторных исследований были применены следующие методы исследования: метод переменных навесок для определения адсорбционной емкости сорбционного материала; турбидиметрический метод для определения количественного содержания сульфат-анионов в модельных растворах, меркуриметрический метод для определения количественного содержания хлорид-анионов в модельных растворах.

Экспериментальные данные обработаны методами математической статистики. Выводы подкреплены убедительными экспериментальными и литературными данными, все это подтверждает достоверность и обоснованность полученных результатов.

Основные результаты

Изучен процесс обессоливания обратноосмотического концентрата отходом энергетики методом адсорбции [7].

Экспериментальные исследования по получению обратноосмотического концентрата проводились на лабораторной установке компании «Медиана-фильтр».

Лабораторная установка представлена в виде стенда, которая включает в себя механический и угольные фильтры. Мембранный блок состоит из одного или нескольких мембранных модулей, соединенных между собой. Исходная вода разделяется на два потока, концентрат (с высоким содержанием) и пермеат (частично обессоленная вода). Объем сливаемого в канализацию концентрата регулируется с помощью крана.

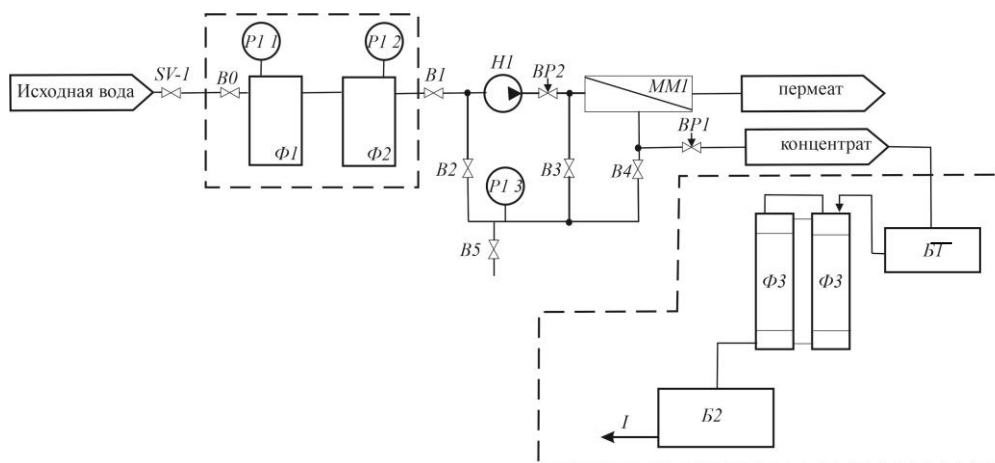


Рис. 1 Гидравлическая схема одноступенчатой установки Φ1 – микрофильтр; Φ2 – угольный фильтр; Φ3 – адсорбционный фильтр; H1 – насос; B1 – бак сбора концентрата; B2 – бак сбора стоков; I – сток в канализацию.

Fig. 1 Hydraulic scheme of a one-stage plant Φ1 - microfilter; Φ2 - carbon filter; Φ3 - adsorption filter; H1 - pump; B1 - concentrate collection tank; B2 - waste collection tank; I - drain into the sewer.

В настоящей работе предлагается проводить очистку обратноосмотического концентрата сорбционным материалом, изготовленным на основе отхода энергетики, шламом химводоподготовки. [8].

Для эксперимента использовался шлам Казанской ТЭЦ-1. Карбонатный шлам представляет собой порошок от светло-желтого до бурого цвета. В процессе исследований использовали фракцию с размером зерен от 0,09 до 0,5 мм. Рентгенографический качественный фазовый анализ шлама на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker показал следующий химический состав: кальцит CaCO_3 – 73%, брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – 8%, портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ < 1%, кварц SiO_2 – 0.4%, остальные прочие вещества – 17.6%.

В ранних работах [9] представлен полный химический состав шлама и показатели качества водной вытяжки. Экспериментально определена адсорбционная емкость шлама по отношению к сульфат- и хлорид анионам.

Исследования проводилась на исходной водопроводной воде, которая удовлетворяет требованиям для мембранных модулей. Показатели качества исходной воды, пермеата, концентрата приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества воды обратноосмотической установки			
Показатели	Исходная вода	Пермеат	Концентрат
pH	7,91	6,4	6,58
Cl^- мг/дм ³	5,23	1,77	10,64
Mg^{2+} мг-экв/дм ³	5,85	2,5	7,2
SO_4^{2-} мг/дм ³	68,32	0,95	324,24
Ca^{2+} мг-экв/дм ³	2,8	1,9	8,5

Для определения адсорбционной емкости карбонатного шлама по отношению к сульфат- и хлорид-ионам построены изотермы адсорбции методом переменных навесок [10].

Исходная концентрация модельных водных растворов по сульфат-анионам – 324,24 мг/дм³; по хлорид-анионам – 10,64 мг/дм³.

Изотермы адсорбции представлены на рисунке 2 (а, б)

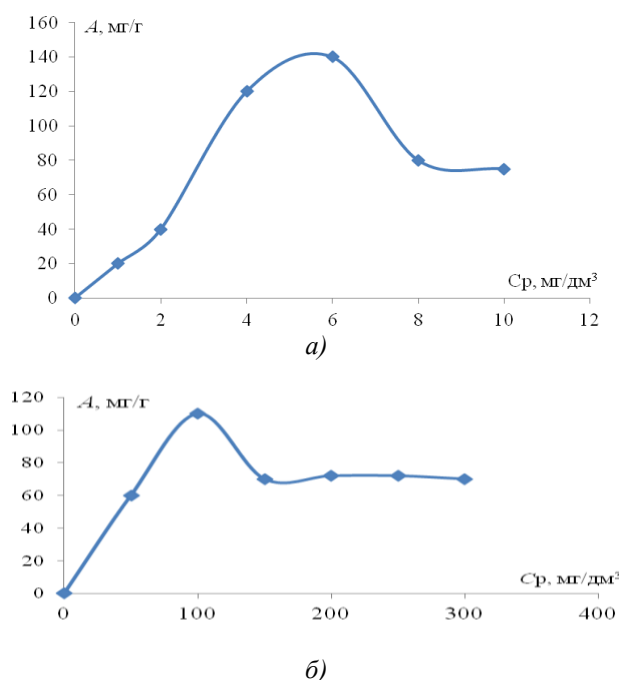
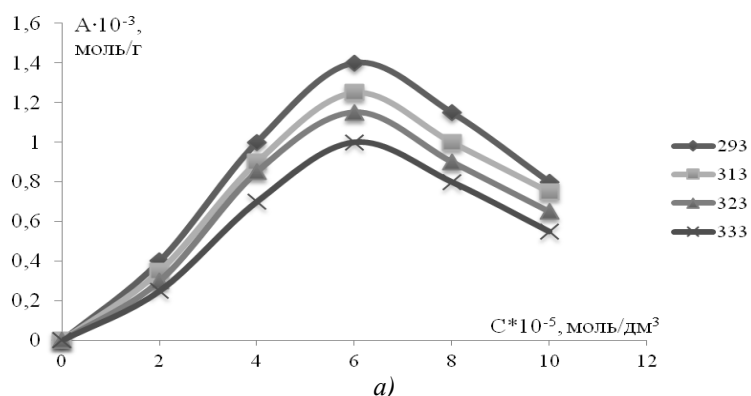


Рис. 2. Изотермы адсорбции сульфат- (а) и хлорид-ионов (б) карбонатным шламом Казанской ТЭЦ-1

1

По классификации Смита изотермы адсорбции относятся к Н-типу и описывают протекание процесса хемосорбции. Построены изотермы адсорбции при разных температурах, рассчитаны энтальпия, энергия Гиббса процесса адсорбции [11].

Изучен механизм процесса адсорбции. Проведен эксперимент в статических условиях при следующих температурах: 293, 313, 323, 333 К, построены изотермы сульфат- и хлорид-ионов карбонатным шламом (рис. 3 а, б)



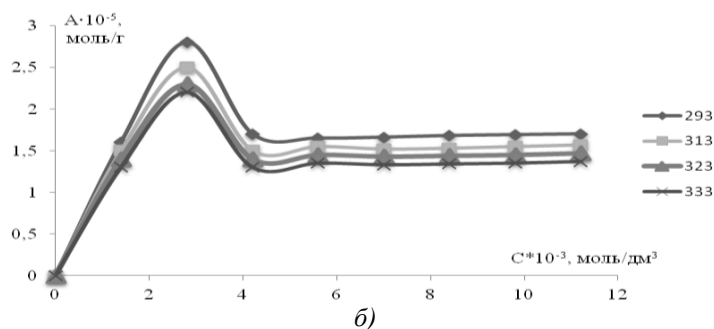


Рис. 3 Изотермы адсорбции при разных температурах а) сульфат- ионы; б) хлорид-ионы карбонатным шламом Fig. 3 Adsorption isotherms at different temperatures a) sulfate ions; b) chloride ions by carbonate sludge

Дифференциальная теплота адсорбции рассчитывается по уравнению:

$$\Delta H = -R \frac{\Delta \ln C}{\Delta(1/T)}$$

Определена энергия Гиббса адсорбции по уравнению

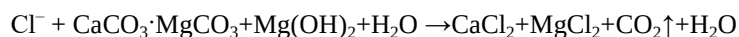
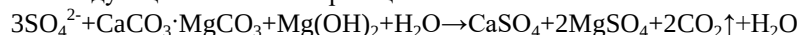
$$\Delta G = -RT \ln K_d,$$

где ΔG – энергия Гиббса, Дж/моль; T – температура, К; K_d – константа адсорбционного равновесия. Результаты по расчетам, кДж/моль, и энергии Гиббса ΔG , кДж/моль представлены в таблице 2 [12].

Таблица 2

Значения энтальпии и энергии Гиббса			
Сульфат-анионы		Хлорид-анионы	
ΔH , кДж/моль	+62.3	ΔH , кДж/моль	+65.4
ΔG , кДж/моль	-21.5	ΔG , кДж/моль	-20.08

Высокие значения энтальпии адсорбции свидетельствуют об образовании связи между SO_4^{2-} и Cl^- ионами и функциональными группами шлама, в результате чего протекает следующая химическая реакция:



Одним из наиболее эффективных методов очистки обратного осмотического концентрата является адсорбционная очистка в динамических условиях, где применяется гранулированный сорбционный материал. Для получения гранул мелкодисперсный шлам с размерами частиц 0,01...0,09 мм смешивается с жидким натриевым стеклом при массовом и объёмном соотношении 2:1 соответственно. Смесь доводится до однородной массы, окатывание смеси осуществляется вручную с получением гранул, гранулы в течение 3 ч выдерживают в печи при температуре 400°C [13]. Далее проводится охлаждение гранул до комнатной температуры в эксикаторе. Характеристики гранул при средней гидрофильности следующая: размер 0,5...2,5 мм; прочность на истирание – 78% [14].

В лабораторных условиях проведен эксперимент определения адсорбционной емкости карбонатного шлама по отношению к сульфат- и хлорид-ионам в динамических условиях.

Предложено обессоливание обратного осмотического концентрата с помощью ионообменного фильтра с гранулированной загрузкой. Предлагается лабораторная установка в виде стеклянной колонки диаметром 2,5 см, загрузка осуществляется полученным гранулированным сорбционным материалом (рис. 4).

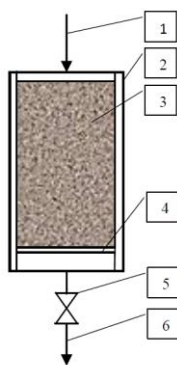


Рис. 4 Лабораторная установка: 1 – подвод модельной смеси, 2 – стеклянная колонка, 3 – сорбционный материал, 4 – перфорированное дно, 5 – кран регулирования расхода жидкости, 6 – патрубок отвода фильтрата.

Fig. 4 Laboratory installation: 1 – model mixture supply, 2 – glass column, 3 – sorption material, 4 – perforated bottom, 5 – liquid flow control valve, 6 – filtrate outlet pipe.

По экспериментальным данным адсорбционная емкость гранулированного сорбционного материала: по сульфат-ионам – 130 мг/г; по хлорид-ионам – 116 мг/г; суммарный объем пор – 0,592 см³/г; удельная поверхность – 46,2 м²/г.

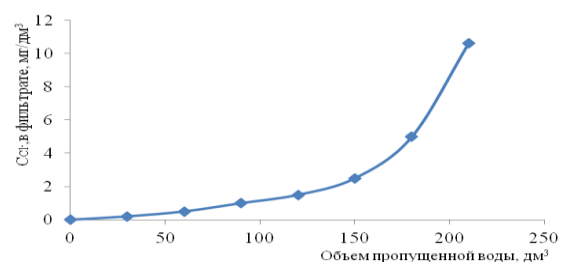
На лабораторном адсорбционном фильтре с диаметром 2,5 см, высота загрузки слоя – 20 см, масса гранул – 52,24 г, скорость фильтрования – 3 м/ч. «Проскок» Cl⁻ и SO₄²⁻ ионов фиксируется при 0,1 мг/дм³. Рассчитаны значения динамической и полной объемная емкости гранул (ДОЕ, ПОЕ, мг/г) представлены в таблице 3.

Таблица 3

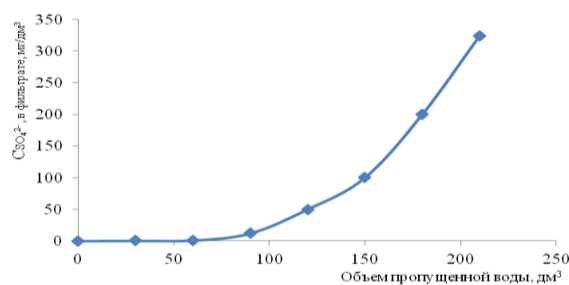
Динамическая и полная обменная емкость гранул по Cl⁻ и SO₄²⁻ ионам

Показатель	Cl ⁻ , мг/г	SO ₄ ²⁻ , мг/г
ДОЕ	1328,7	648,5
ПОЕ	1615,7	879,2

На основе полученных результатов можно сделать выводы, что ДОЕ гранул сорбционного материала по отношению к хлорид-ионам составляет 96 %, по сульфат-ионам 97 % от полной обменной емкости. Построены кривые адсорбции хлорид- и сульфат- ионов гранулированным сорбционным материалом в динамических условиях рисунок 5.



а)



б)

Рис. 5 Кривая адсорбции гранулированным сорбционным материалом в динамических условиях: а) сульфат-ионов; б) хлорид-ионов

Fig. 5 Curve of adsorption by granulated sorption material under dynamic conditions: а) sulfate ions; б) chloride ions

Результаты

Рассчитано время и коэффициент защитного действия слоя загрузки гранулированным сорбционным материалом при адсорбционной очистке от SO_4^{2-} , Cl^- ионов по уравнению Шилова [15] (табл. 4).

$$\tau = KL - \tau_0,$$

где τ – время защитного действия слоя загрузки, ч; K – коэффициент защитного действия слоя загрузки, ч/м; L – высота слоя загрузки, м; τ_0 – потеря внешнего защитного действия слоя загрузки, ч.

Таблица 4

Результаты расчета по уравнению Шилова

	Cl^-	SO_4^{2-}
τ , ч	130,4	69,2
K , ч/м	707,3	354,8

В динамических условиях при пропускании различных объемов концентрата обратноосмотической установки определены показатели качества фильтрата [16]. Показатели сульфат- и хлорид-ионов соответствуют ПДК нормам веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, что свидетельствует о том, что вторичное загрязнение водных объектов сорбционным материалом не происходит.

Показатели качества фильтрата в зависимости от пропущенного обратноосмотического концентрата 02–06 дм³:

- $J_{\text{общ}}$, мг-экв/дм³15,7–14,7
- $\Sigma_{\text{общ}}$, мг-экв/дм³10,8–9,9
- Железо общее, мг/дм³0,58–0,5
- Кремний, мг/дм³0,043–0,04

Рассмотрены сравнительные характеристики разработанного гранулированного сорбционного материала с используемыми в промышленности адсорбентами (табл. 5).

Таблица 5

Сравнительная характеристика гранулированного сорбционного материала с промышленными адсорбентами

Характеристика	АН-31	Вифатит	Варион	Амберлайт	Гранулированный сорбционный материал
Удельная поверхность, м ² /г					46,2
Размер гранул, мм	0,35-1,25	0,63-2,0	0,5-1,2	0,3-085	1,0-2,5
Насыпная плотность, кг/м ³	750-680	730-500	620-560	570-400	560
Адсорбционная емкость по сульфат-ионам, кг/кг	0,3	0,34	0,28	0,35	0,13
Адсорбционная емкость по хлорид-ионам, кг/кг	0,5	0,52	0,47	0,46	0,116
Эффективность адсорбции по сульфат-ионам, %	до 99,7	до 98,8	до 99,4	до 99,5	до 97
Эффективность адсорбции по хлорид-ионам, %	до 99,8	до 98,4	до 99,2	до 99,3	до 96
Прочность на истирание, %	92	85	82	85	78
Стоимость 1 кг сорбента, руб.	251	421	378	356	12,1

Выводы

Предложена адсорбционная технология очистки концентрата от сульфат- и хлорид-ионов твердым отходом энергетики, шламом химводоподготовки. Впервые исследован процесс обессоливания обратноосмотического концентрата отходом энергетики, в литературных данных в настоящее время такие технологии не изучались.

По экспериментальным данным построены изотермы адсорбции, сульфат- и хлорид-ионов карбонатным шламом, которые по классификации Смитта относятся к Н-типу, что свидетельствует о протекании хемосорбции.

Получены гранулы на основе карбонатного шлама для очистки концентрата установок обратного осмоса от сульфат- и хлорид-ионов. Определены оптимальные условия получения этих гранул.

Рассмотрен метод обессоливания обратноосмотического концентрата в динамических условиях с помощью лабораторного фильтра загруженного гранулированным сорбционным материалом.

Определены значения ДОЕ и ПОЕ гранулированного сорбционного материала по отношению к сульфат-ионам составили: ДОЕ= 648,5 мг/г; ПОЕ =897,2 мг/г; к хлорид-ионам ДОЕ= 1328,7 мг/г; ПОЕ =1615,7 мг/г.

В литературном обзоре рассмотрены методы получения обратноосмотического концентрата, теоретические и экспериментальные исследования ученых адсорбционной очистки сточных вод производственными и растительными отходами.

Литература

1. Zakiya Tabassum, Rajalakshmi Mudbidre Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse // Nature Environment and Pollution Technology. 2021, V. 20, No.4, pp. 1403-1414.
2. Reverse Osmosis Concentrate Physicochemical Characteristics Environmental Impact and Technologies // Membranes 2021. V 11, pp. 3-21.
3. Khan Q., Maraqa M.A., Mohamed A.M.O. Inland desalination: Techniques, brine management, and environmental concerns // Pollut. Assess. Sustain. Pract. Appl. Sci. Eng. 2021, 871–918.
4. Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Хоружий О.В., Громов С.Л., Сидоров А.Р. Технологии мембранного разделения в промышленной водоподготовке. М.: ДеЛи плюс, 2012. 429 с.
5. Kim S., Joo H., Moon T., Kim S.H., Yoon J. Rapid and selective lithium recovery from desalination brine using an electrochemical system. Environ. Sci. Process Impacts 2019, 21, 667–676.
6. Xinyang Li, Liwei Zhang, Chengwen wang review of disposal of concentrate streams from nanofiltration (NF) or reverse Osmosis (RO) membrane process // Advanced Materials Research. 2017, V. 518-523, pp 3470-3475.
7. Geethakarthis A., Phanikumar B. R. Industrial sludge based adsorbents/ industrial byproducts in the removal of reactive dyes // Global Science Research Journals. 2014. V. 1 (1), pp. 1-9.
8. Жилинский В.В., Слесаренко О.А.. Электрохимическая очистка сточных вод и водоподготовка: Минск : БГТУ, 2014. 85 с.
9. Николаева Л.А., Хамитова ЭГ. Использование отхода энергетики в качестве сорбционного материала при очистке обратноосмотического концентрата // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. Т. 55. № 5-6. С. 427-432.
10. Кучкарова А.Р. Улучшение качества обессоленной воды для котлов-утилизаторов парогазовой установки в связи с модернизацией казанской ТЭЦ-1 // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 3 (27). С. 83-93.
11. Николаева Л.А., Бородай Е.Н., Голубчиков М.А. Сорбционные свойства шлама осветлителей при очистке сточных вод электростанций от нефтепродуктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. № 1-2. С. 132-136.
12. Николаева Л.А., Хамзина Д.А. Замазученный шлам химводоочистки – вторичный энергетический ресурс на объектах малой энергетики // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2016. № 5–6. С. 50–54.
13. Николаева Л.А., Миннеярова А.Р. Адсорбционная очистка обратноосмотического концентрата водоподготовительных установок ТЭС // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 95-100.
14. Sulyman M., Namiesnik J., Gierak A. Low-cost Adsorbents Derived from Agricultura By-products/Wastes for Enhancing Contaminant Uptakes from Wastewater: A Review. Pol. J. Environ. Stud. 2017. V. 26, No. 2, 479-510.
15. Олькова А.С. Условия культивирования и многообразие тестфункций *Daphnia magna straus* при биотестировании // Вода и экология 2017. №1. С. 63-82.

Авторы публикации

Николаева Лариса Андреевна – профессор, д.т.н., профессор кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке», Казанский государственный энергетический университет.

Зайнуллина Элеонора Райнуровна – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Zakiya Tabassum, Rajalakshmi Mudbidre. Treatment and Disposal Methods of Concentrate Stream of Seawater Reverse. *Nature Environment and Pollution Technology*. 2021;20(4):1403-1414.
2. Reverse Osmosis Concentrate: Physicochemical Characteristics, Environmental Impact, and Technologies. *Membranes*. 2021;11:3-21.
3. Khan Q, Maraqa MA, Mohamed AMO. Inland desalination: Techniques, brine management, and environmental concerns. *Pollut. Assess. Sustain. Pract. Appl. Sci. Eng.* 2021, pp. 871–918.
4. Panteleev AA, Ryabchikov BE, Khoruzhiy OV. *Membrane separation technologies in industrial water treatment*. M.: DeLi plus, 2012. 429 p.
5. Kim S, Joo H, Moon T, et al. Rapid and selective lithium recovery from desalination brine using an electrochemical system. *Environ. Sci. Process Impacts* 2019;21:667–676.
6. Xinyang Li, Liwei Zhang, Chengwen wang review of disposal of concentrate streams from nanofiltration (NF) or reverse Osmosis (RO) membrane process. *Advanced Materials Research*. 2017;518-523:3470-3475.
7. Geethakarathi A, Phanikumar BR. Industrial sludge based adsorbents. Industrial byproducts in the removal of reactive dyes. *Global Science Research Journals*. 2014;1 (1):1-9
8. Zhilinskiy. VV, Slesarenko OA. *Electrochemical wastewater treatment and water treatment: textbook.-method*. Allowance. Minsk: BSTU, 2014. 85 p.
9. Nikolaeva LA, Khamitova EG. The use of energy waste as a sorption material in the purification of reverse osmosis concentrate. *Chemical and oil and gas engineering*. 2019;55(5-6):427-432.
10. Kuchkarova AR. Improving the quality of demineralized water for waste heat boilers of a steam-gas plant in connection with the modernization of the Kazan CHPP-1. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2015;3 (27):83-93.
11. Nikolaeva LA, Borodai EN, Golubchikov MA. Sorption properties of clarifier sludge in the treatment of wastewater from power plants from oil products. *Energy problems*. 2011;1-2:132-136.
12. Nikolaeva LA, Khamzina DA. Oil-contaminated sludge of chemical water treatment - a secondary energy resource at small power facilities. *Izvestiya VUZov. Energy problems*. 2016;5-6:50-54.
13. Nikolaeva LA, Minneyarova AR. Adsorption treatment of reverse osmosis concentrate of TPP water treatment plants. *Teploenergetika*. 2019;5:95-100.
14. Sulyman M, Namiesnik J, Gierak A. Low-cost Adsorbents Derived from Agricultura By-products. *Wastes for Enhancing Contaminant Uptakes from Wastewater: A Review*. *Pol. J. Environ. Stud.* 2017;26(2):479-510.
15. Olkova AS. Cultivation conditions and variety of test functions of *Daphnia magna* straus during biotesting. *Water and ecology*. 2017;1:63-82.

Author of the publication

Larisa A. Nikolaeva – Kazan State Power Engineering University.

Eleonora R. Zainullina – Kazan State Power Engineering University.

Получено 26. 03.2022г.

Отредактировано 28.03.2022г.

Принято 28.03.2022г.

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