

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	ВАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 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:	ООО «45», г. Казань,
Адрес типографии:	420015, г. Казань, ул. Жуковского, 28а, помещ.1

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2019
Т.21, № 6
Ноябрь-Декабрь

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

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Министерство образования и науки РФ
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

АМИНОВ Р.З.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	КОРОВКИН Н.В.
АРАКЕЛЯН Э.К.	МИНУЛЛИН Р.Г.	KURTH STEFFEN
БАРТОЛОМЕЙ П.И.	ОЛЬХОВСКИЙ Г.Г.	KOLCUN MICHAIL
БРОДОВ Ю.М.	ПОПОВ И.А.	BIANCHINI ALESSANDRO
БУХМИРОВ В.В.	СЕРГЕЕВ В.В.	FERRARA GIOVANNI
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ТЮТИКОВ В.В.	SIMONI DANIELE
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ В.А.	ФЕДОТОВ А.И.	SKODA RADEK
ГУМЕРОВ Ф.Х.	ФРОЛОВ В.Я.	TOMAN PETR
ВАНЬКОВ Ю.В.	ЧИЧИРОВА Н.Д.	DESHPANDE PRAVIN
ИВШИН И.В.	ШАРАПОВ В.И.	VAKKILAINEN ESA
КОЗЛОВ В.К.	ЩИННИКОВ П.А.	RASSÖLKIN ANTON
ЛАПТЕВ А.Г.	ЩУКИН А.В.	BOYADJIEV CHRISTO
ЛЕУХИН А.Н.	ЯКИМОВ Н.Д.	BURGANOV BULAT

Свидетельство о регистрации СМИ:

журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – ПИ № 77-7322 от 19.02.2001 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2019
Vol. 21, № 6
November-December

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

Editorial board:

RASHID Z. AMINOV	VITALIY V. SERGEEV	BIANCHINI ALESSANDRO
EDIK K. ARAKELYAN	VLADIMIR V. TYUTIKOV	FERRARA GIOVANNI
PETR I. BARTOLOMEI	ALEXANDER I. FEDOTOV	SIMONI DANIELE
YURY M. BRODOV	NATALIA D. CHICHIROVA	SKODA RADEK
VYACHESLAV V. BUKHMIROV	VLADIMIR I. SHARAPOV	TOMAN PETR
ALEXANDER V. GOLENISHCHEV-KUTUZOV	GUZEL R. MINGALEEVA	DESHPANDE PRAVIN
VADIM A. GOLENISHCHEV-KUTUZOV	RENAT G. MINULLIN	VAKKILAINEN ESA
FARID M. GUMEROV	GURGEN G. OLKHOVSKY	RASSÖLKIN ANTON
LEUKHIN A.N.	IGOR AI. POPOV	BOYADJIEV CHRISTO
YURY V. VANKOV	PAVEL A. SHCHINNIKOV	BULAT BURGANOVA
IGOR V. IVSHIN	ANDREY V. SHCHUKIN	NIKOLAI V. KOROVKIN
VLADIMIR K. KOZLOV	EMIL V. SHAMSUTDINOV	CHRISTO B. BOYADJIEV
	NIKOLAI D. YAKIMOV	STEFFEN KURTH
	ANATOLY G. LAPTEV	MICHAIL KOLCUN

Address

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

Tel./fax:

+7 (843) 527-92-76

Email:

problems_ener@mail.ru

Site:

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВА Л.М., ИГНАТОВ А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии	3
ЯХЬЯ А.А., ЛЕВИН В.М. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах	11
МИРОНОВА Н.А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик плодовых косточек	19
ЗИГАНШИН М.Г. Методика оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса загрязнителей	29
НАСЫРОВА Е.В., ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., ЛЕУХИНА О.В., МАЗАРОВ И.Ю. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан	39
СЕЛИВАНОВ А.А., БАТРАКОВ П.А. МРАКИН А.Н., ВДОВЕНКО И.А., АФАНАСЬЕВА О.В. Математическое описание процесса теплообмена частиц горючего сланца и зольным теплоносителем в условиях полукоксования во вращающемся барабанном реакторе УТТ	51
СОСНОВСКИЙ А.Ю., МУРМАНСКИЙ Б.Е., БРОДОВ Ю.М. Исследование универсальных условий устойчивости систем тепловых расширений паровых турбин к внешнему воздействию	61
ЗАРЯНКИН А.Е., ПАДАШМОГАНЛО Т., ПОСТНИКОВА М.С. Исследование способов выравнивания параметров потока во входных патрубках осевых компрессоров	72
МИХИН А.А., СЕРГЕЕВ В.В. Моделирование конденсационной установки в среде ASPEN PLUS	84

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПОЛИЩУК В.И., КРИЦКИЙ М.В., БАННОВ Д.М., МАЛЫШЕВ С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин	93
МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ЦВЕТКОВИЧ А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей	101
НГУЕН ТЪИ КИЕН, КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В. Импульсный блок питания для портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра	111

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

SMOLENTSEV NI, CHETOSHNIKOVA LM. Electromechanical drive management energy.....	3
YAHYA AA, LEVIN VM. Bayesian classifier is the tool of increasing the efficiency of defects recognition in power transformers.	11
MIRONOVA NA. Research of the heat of physical characteristics of fruitosicles.	19
ZIGANSHIN MG. Method of assessment generation efficiency at thermal power plants taking into account emissions of pollutants.	29
NASYROVA EV, TIMERBAYEV NF, LEUKHINA OV, MAZAROV IYU. Data analysis wind monitoring in the REPUBLIC OF TATARSTAN	39
SELIVANOV AA, BATRAKOV PA., MARKIN AN, VDOVENKO IA, AFANASEVA OV. The mathematical description of process of heat exchange particles of oil shale and ash the coolant in the semi-coking conditions in a rotating drum reactor installation with solid heat carrier.....	51
SOSNOVSKIY AYU, MURMANSKII BE, BRODOV YU. M. Investigation of universal conditions of stability of thermal expansion system of steam turbines to external actions	61
ZARYANKIN AE, PADASHMOGHANLO T, POSTNIKOVA MS. Investigation of methods for equalizing the flow parameters in the axial compressor intake flare.	72
MIKHIN AA, SERGEEV VV. Simulation of condensation unit in ASPEN PLUS	84

ELECTRICAL ENGINEERING

POLISHCHUK VI, KRITSKY MV, BANNOV DM, MALYSHEV SV. Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics.	93
MALEV NA, POGODITSKY OV, CVETKOVICH AM. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters	101
NGUYEN CHI KIEN, KASHAEV RS, KOZELKOV OV. The impulse power unit for a portable proton magnet resonance relaxometer.	111



УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Н.И. Смоленцев^{1*}, Л.М. Четошникова², А.Н. Игнатов²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Россия

²Филиал Южно-Уральского государственного университета (НИУ) в
г. Миассе, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>, smolenzev@rambler.ru

Резюме: Разработка системы интеллектуального управления накопителем энергии является актуальной научно-технической задачей. Эта система должна обеспечить максимальную эффективность применения накопителя энергии в силовых сетях различного назначения. Электромеханический накопитель энергии является преобразователем электрической энергии в механическую и содержит в своем составе электрическую машину. Например, в основу конструкции сверхпроводящего электромеханического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) положена обращенная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами и с бесконтактным подвесом ротора-маховика. Основными функциональными блоками системы управления скоростью вращения ротора-маховика являются: датчик нагрузки силовой сети, система передачи и обработки информации, устройство управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного обращенного двигателя СПЭНЭ-1. Для обоснования необходимости управления накопителем энергии в статье рассмотрены графики нагрузки предприятия. Определены требования к системе управления. Оптимальным методом является векторное управление накопителем энергии. Векторное управление применяют, как правило, в синхронных двигателях узкоспециального назначения. В принципе, этот метод применим ко всем типам трехфазных двигателей переменного тока. Он представляет большой интерес и для применения в системе управления накопителем энергии. В статье рассмотрены вопросы применения накопителя энергии в распределительных сетях промышленного предприятия и обоснования векторного метода управления обращенным синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1, приведена блок-схема системы векторного управления двигателем накопителя энергии и результаты ее моделирования в среде MatLab (Simulink).

Ключевые слова: накопитель энергии, СПЭНЭ-1, векторное управление, ШИМ-регулятор.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», идентификационный номер проекта RFMEFI57818X0265 (соглашение от 27.11.2018 г. № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). Заказчик - Министерство образования и науки Российской Федерации.

Для цитирования: Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М., Игнатов А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №6. С.3-10. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-3-10.

ELECTROMECHANICAL DRIVE MANAGEMENT ENERGY

NI Smolentsev^{1*}, LM Chetoshnikova², AN Ignatov²

¹Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia,

²Branch of the South Ural State University (NRU) in Miass, Russia.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5775-2903>

Abstract: The development of an intelligent energy storage management system is an up-to-date scientific and technical challenge. This system should ensure maximum efficiency of energy storage in power networks for various purposes. The article discusses the use of energy storage in distribution networks of an industrial enterprise and substantiation of the vector control method of the inverted synchronous motor of the energy storage SPENE-1, shows a block diagram of the vector system for controlling the energy accumulator motor and the results of its simulation in MatLab.

Keywords: energy storage, SPENE-1, vector control, PWM controller.

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the implementation of the Federal Targeted Program “Research and Development in Priority Directions for the Development of the Scientific and Technological Complex of Russia for 2014–2020”, the project identification number is RFMEFI57818X0265 (agreement of 11.27.2018 № 075-02-2018-209 (14.578.21.0265)). The customer is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Smolentsev NI, Chetoshnikova LM, Ignatov AN. Electromechanical drive management energy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):3-10. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-3-10.

Введение

Электромеханический накопитель энергии является преобразователем электрической энергии в механическую и содержит в своем составе электрическую машину. Например, в основу конструкции сверхпроводящего электромеханического накопителя энергии (СПЭНЭ-1) положена обращенная синхронная электрическая машина с постоянными магнитами и с бесконтактным подвесом ротора-маховика [1-5]. Важным моментом практического применения накопителя энергии является разработка интеллектуальной системы управления режимами его работы и прежде всего частотой вращения ротора-маховика. С точки зрения уменьшения габаритов накопителя и увеличения его удельных параметров целесообразно управлять скоростью вращения, поскольку запасенная в накопителе механическая энергия пропорциональна моменту инерции ротора-маховика и квадрату скорости его вращения

$$W = \frac{J\Omega}{2}, \quad (1)$$

где $\Omega = 2\pi n$ – круговая скорость вращения ротора-маховика [рад/сек], n – скорость вращения ротора-маховика [об/сек], $J = \int r^2 dm$ – момент инерции ротора-маховика, r – расстояние от элемента массы dm – до оси вращения.

Основными функциональными блоками системы управления скоростью вращения ротора-маховика являются: датчик нагрузки силовой сети, система передачи и обработки информации, устройство управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного обращенного двигателя СПЭНЭ-1.

Поскольку эффективность применения накопителя энергии во многом зависит от оптимального управления синхронным двигателем, то выбор и обоснование метода, позволяющего оптимизировать рабочие параметры накопителя энергии, является актуальной научно-технической задачей.

Известны различные методы управления частотой вращения синхронного двигателя [6-10]. Применительно к синхронному двигателю накопителя энергии метод управления и его аппаратная реализация должны удовлетворять специфическим

требованиям: это широкий диапазон регулирования частоты вращения, позволяющий расширить эффективность работы накопителя энергии, устойчивость системы управления, недопустимость выхода двигателя из синхронизма, иначе может произойти сбой в работе бесконтактного подвеса ротора-маховика и переход накопителя энергии в аварийный режим. Поскольку ротор-маховик СПЭНЭ - 1 находится в вакуумированной полости статора синхронной машины, должно быть минимальное количество соединительных элементов и выводов. Важны и такие требования, как простота, надежность, ценовая доступность, что будет способствовать массовому применению накопителей.

Целью работы является разработка системы управления электромеханическим накопителем энергии в распределительных сетях различного назначения.

Материалы и методы

Для обоснования необходимости управления накопителем энергии в силовой сети, рассмотрим графики нагрузки предприятия. На рисунках приведены суточные графики нагрузки предприятия без накопителя энергии (рис. 1), график работы накопителя энергии в управляемом режиме (рис. 2) и график нагрузки предприятия с накопителем энергии (рис. 3) [11-13].

Как следует из анализа графиков, накопитель энергии позволяет значительно выровнять неравномерный график нагрузки и снизить величину максимальной нагрузки, что позволит предприятию перейти на более дешевый тариф, обеспечить работу оборудования в режиме, близком к номинальному, снизить пиковые перегрузки оборудования. Кроме снижения прямых затрат на электроэнергию уменьшаются косвенные затраты, например, на ликвидацию последствий аварий, вызванных работой оборудования в режиме перегрузки. Расчеты показывают, что таким образом можно повысить энергосбережение на предприятии до 40 % .

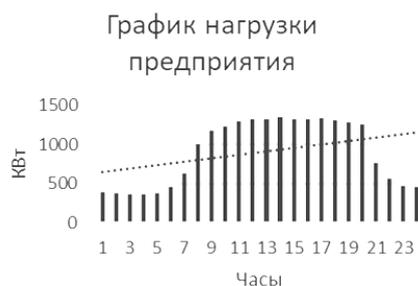


Рис. 2. Суточный график нагрузки предприятия без накопителя энергии



Рис. 3. График работы накопителя энергии



Рис.4. График нагрузки предприятия с накопителем энергии в распределительной сети

Приведенные экспериментальные данные показывают, что необходима система интеллектуального управления, позволяющая по графику нагрузки потребителя электрической энергии автономно управлять режимами работы накопителя энергии, обеспечивая при этом максимальный режим энергосбережения и энергоэффективности.

Исходя из этих требований к методу управления накопителя энергии, проанализируем известные методы управления двигателями переменного тока. Наиболее распространен метод управления синхронным двигателем с датчиком углового положения ротора. Однако, реализация данного способа применительно к накопителю будет достаточно сложной и дорогой. Бездатчиковый режим управления реализуется в скалярном способе управления, когда положение ротора двигателя определяют по величине противо-ЭДС в одной из трех фаз переменного тока статорной обмотки, однако в этом случае уменьшается момент двигателя и устойчивость его работы, уменьшаются удельные характеристики накопителя энергии.

Метод векторного управления лишен выше указанных недостатков, его широко применяют в асинхронных двигателях. Векторное управление применяют, как правило, в синхронных двигателях узкоспециального назначения. В принципе, этот метод применим ко всем типам трехфазных двигателей переменного тока. Он представляет большой интерес и для применения в системе управления накопителем энергии СПЭНЭ-1 [14].

Векторная система управления синхронным двигателем строится во вращающейся системе координат, в которой управляемый параметр момент двигателя M является неподвижным и его величина определяется выражением

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_{sq} \Psi_f \quad (2)$$

где Z_p – число пар полюсов неявнополюсной синхронной машины, I_{sq} – статорный ток, Ψ_f – потокосцепление, создаваемое магнитным полем постоянных магнитов.

Как следует из выражения (2), величина момента двигателя зависит только от q – составляющей статорного тока, d – составляющая статорного тока является паразитной, приводящей к дополнительным потерям и ее поддерживают равной нулю. Схема векторного управления синхронным двигателем СПЭНЭ-1 приведена на рис. 5.

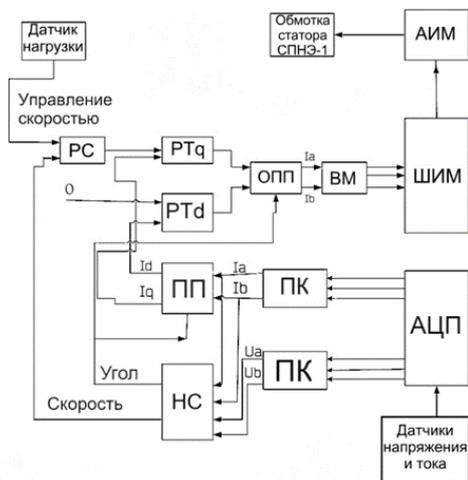


Рис. 5. Схема векторного управления синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1

На рис. 5 приняты следующие сокращенные обозначения: РС – регулятор скорости, НС – наблюдатель состояния, ОПП – обратное преобразование Парка, ПП – преобразование Парка, ВМ – пространственно-векторный преобразователь, PTq и PTd – пропорционально-интегральные регуляторы токов во вращающейся системе координат, АЦП – аналого-цифровые преобразователи, ШИМ – широтно-импульсный модулятор, АИИ – автономный инвертор напряжения. Сигналы с датчиков тока и напряжения статорной обмотки СПЭНЭ-1 поступают на блок АЦП, затем выполняется преобразование системы координат – из трехфазной системы координат в декартову систему координат (преобразование Кларка, на схеме ПК), затем из декартовой системы координат во вращающуюся систему координат (преобразование Парка, на схеме ПП).

В результате получают два сигнала тока (на схеме обозначены I_d и I_q). Для обоих сигналов устанавливаются пропорционально-интегральные регуляторы (на схеме обозначены PTq и PTd). Сигналы с выхода регуляторов преобразуются обратно в декартову систему координат (на схеме обратное преобразование Парка, ОПП). Пространственно-векторный модулятор (на схеме ВМ) осуществляет расчет необходимых параметров силовых ключей и последовательность коммутации для управления с помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) автономным инвертором (АИМ).

Регулятор скорости – это внешний сигнал, поступающий с датчика нагрузки силовых шин распределительной сети предприятия по необходимым параметрам с помощью накопителя энергии. При уменьшении нагрузки накопитель энергии должен забирать неиспользованную энергию из сети, для чего на регулятор скорости РС поступает сигнал на увеличение скорости вращения ротора-маховика СПЭНЭ-1 и переводе накопителя энергии в режим двигателя. Затем накопитель энергии определенное время, зависящее от типа потребителя, сохраняет накопленную энергию. При возрастании нагрузки в сети, на регулятор скорости поступает сигнал о снижении скорости вращения ротора-маховика и переходе накопителя в режим генератора. В этом режиме скорость вращения ротора-маховика падает до минимальной, накопитель переходит в режим генератора и отдает накопленную энергию в силовую сеть.

Для реализации векторного способа используется наблюдатель состояния (на рис. 5 обозначен НС). Он рассчитывает текущий угол поворота ротора-маховика, выполняет расчет скорости и момента двигателя, а также управляет переходами накопителя в режим двигателя и генератора, выполняя функции интеллектуального управления. Его устройство и функции применительно к накопителю энергии являются предметом последующих исследований и разработок.

Результаты исследования

Важным элементом векторного способа управления накопителем энергии является ШИМ-регулятор [15]. Для управления двигателем необходимо сформировать пакет сигналов, чтобы средний (интегральный) ток имел необходимое значение, а время интеграции пакета должно быть в 5–10 раз меньше одного оборота двигателя. Скорость вращения двигателя составляет ($10^3 - 10^4$) оборотов в секунду и, соответственно, один оборот двигателя выполняется за время $(1-0,1)10^{-3}$ секунды. Интерфейс RS-485, по которому предполагается передавать данные управления, работает на частотах до 2 мегагерц (500 наносекунд). Следовательно, такие сигналы можно сформировать для непрерывного управления двигателем накопителя энергии.

Для примера рассмотрим формирование пакета сигналов из 8 байт. Период для учета среднего тока состоит из 8 байт, это равно $10 \times 8 = 80$ тактовых интервалов. Скважность сигнала управления изменяется в диапазоне от 8/80 до 72/80 на интервале в 8 байт.

На рис. 6 приведена зависимость управляемого тока при разных сериях сигналов. Из анализа графиков, приведенных на рис. 6, следует, что ШИМ – регулятор обеспечивает линейность управления в необходимом частотном интервале управления синхронным двигателем.

Исследование работы векторного управления в соответствии со схемой, приведенной на рис. 5, было проведено способом моделирования в среде *MatLab* (*Simulink*). Опытные параметры синхронного двигателя СПЭНЭ-1, используемые при моделировании, приведены в таблице.

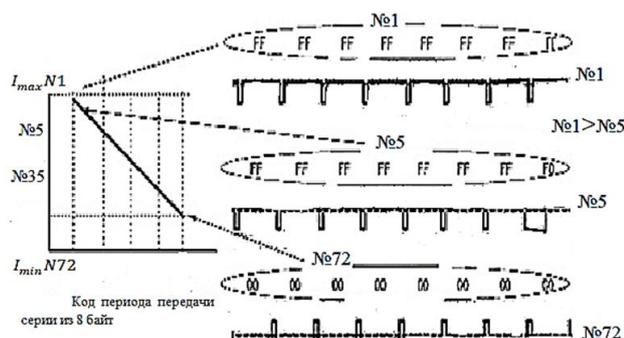


Рис. 6. Средний интегральный ток при разных сериях сигналов

Опытные параметры синхронного двигателя СПЭНЭ-1									
U , В	P , кВт	M , Нм	R_s , Ом	L_{sd} , мГн	L_{sq} , мГн	Ψ_f , Вб	J , кг·м ²	P_n	β
200	7,5	66	0,96	2,25	5,25	0,183	0,013	4	0

На рис. 7 приведен график управления скоростью вращения ротор-маховика в диапазоне от 0 до 15000 об/мин., полученный в результате моделирования векторного управления синхронным двигателем СПЭНЭ-1 в среде *MatLab (Simulink)* при разных значениях напряжения на статорных обмотках обращенного синхронного двигателя СПЭНЭ-1. ($U_{ст} = 380$ В, 1500 В, 3000 В, 3800 В).

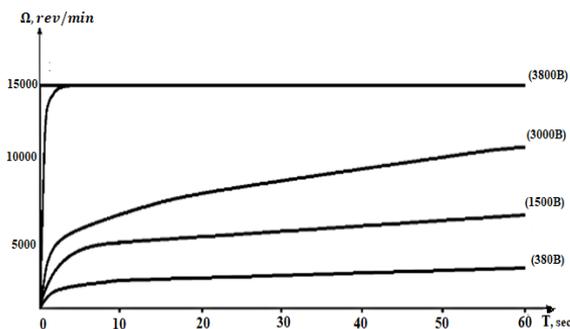


Рис. 7. Моделирование в среде *Matlab (Simulink)* управления скоростью вращения ротора-маховика синхронного двигателя СПЭНЭ-1

Как следует из графиков, приведенных на рис. 7, время разгона двигателя накопителя энергии до необходимой скорости вращения зависит не только от сигнала управления, но и также от напряжения статорных обмоток, что необходимо учитывать при выборе параметров накопителя энергии.

Выводы

В работе [16] отмечалось, что гармонический анализ Фурье графика нагрузки позволяет рассчитать параметры накопителя энергии в зависимости от амплитуды и частоты выбранной гармоники спектра мощности. При дальнейшем развитии данного метода можно предположить, что интеллектуальная система управления режимами работы накопителя также может быть построена на спектральном разложении графика нагрузки потребителя энергии. Для этого необходимо использовать сигнал с датчика нагрузки в схеме векторного управления синхронным двигателем накопителя энергии СПЭНЭ-1 на частоте необходимой гармоники спектра нагрузки. В следующей работе предполагается детальная разработка схемы управления, определение требований к блокам и элементам схемы управления и проведение следующих этапов моделирования в среде *MatLab (Simulink)*.

Заключение

В работе рассмотрена возможность применения для управления накопителем энергии СПЭНЭ-1 векторного метода, который по ряду причин является предпочтительным. На примере графиков нагрузки промышленного предприятия указан способ оптимизации энергосбережения и энергоэффективности путем векторного управления накопителем энергии. Приводится блок-схема векторного управления для накопителя энергии, обсуждены требования к ШИМ – регулятору. В среде *MatLab (Simulink)* проведено моделирование системы векторного управления накопителем энергии и получены графики зависимости скорости вращения ротора-маховика СПЭНЭ-1 от времени. Предложено использование гармонического анализа Фурье для применения в системе управления электромеханическим накопителем энергии.

Литература

1. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017, Т.19. № 3-4. С.53-60.
2. Смоленцев Н.И. Электромеханический сверхпроводящий накопитель энергии. Пат. 2601590 Российская Федерация, МПК7 H02K 7/02, H02K 7/09. № 2015115350/07, опубл. 10.11.2016.

Бюл. № 31.

3. Матвеев В.А. Сверхпроводящий магнитный подвес для кинетического накопителя энергии: пат. 2551864 Российская Федерация: МПК7 F 16 C 32/04. заявл. 04.04.2014.
4. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilyeva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. // Radio electronics. Computer science. Control. 2001;2:155-159.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Т. 27. №4. С.360-1105.
6. Superconductive and energy-storage magnetic suspension flywheel with high energy density: пат. CN102664567 Китай: МПК7 H 02 K 7/02. заявл. 11.05.2012.
7. Pieronek T.J., Decker D.K., Spector V.A. Spacecraft Flywheel Systems -Benefits and Issues. IEEE, 1997. Иосифьяновские чтения. 2016.
8. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // «Радиоэлектроника. Информатика. Управление». 2001. № 2. С. 155-159.
9. Коробко Г.И., Хватов О.С., Коробко И.Г. Разработка и моделирование дизель - генератора с изменяемой частотой вращения в судовой единой электроэнергетической установке системе // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. №1. С. 55-61.
10. Шевченко В.П., Бабийчук О.Б. Синхронный двигатель при частотном регулировании // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. №14 (90). С.39-42.
11. Ali Emadi. Energy-efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded. (2005), New York, Marsel Dekker Inc., 400 p.
12. Латочкин И.В., Смоленцев Н.И. Выбор параметров накопителя энергии и оптимизация системы электроснабжения предприятия // Ползуновский вестник. 2016, № 4-2. С.65-69.
13. Балув Д.Ю., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 5(136). С. 105.
14. Songa. Z., Lib J, Hou. J., et al. He Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Stud // Energy. N.154. 2018. pp. 433-441.
15. Ковальчук Д.А., Мазур А.В. Векторное управление синхронным электродвигателем // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. 2014. № 17. С. 71-75.
16. Игнатов А.Н., Кувардин К.В., Шабронов А.А. Метод формирования сигнала широтно-импульсной модуляции для управления двигателем постоянного тока: пат. 2665671 РФ, СибГУТИ. № 2015121006; опубл. 03.09.2018, Бюл. № 25.
17. Горте О.И., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Пранкевич Г.А. Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 10 ч. Под ред. доц. Боруш О.В. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. Ч. 4. С. 421.

Авторы публикации

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники, Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

Четошникова Лариса Михайловна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации электротехнического факультета, Южно-Уральского государственного университета.

Игнатов Александр Николаевич – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической электроники, Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

References

1. Smolentsev NI, Kondrin SA. Superconducting electrokinetic energy storage for local electrical networks. News of higher educational institutions. *Energy problems*. 2017;19(3-4):53-60.
2. Smolentsev NI. *Electromechanical superconducting energy storage*. Pat. 2601590 Russian Federation, IPC7 NC 7/02, NC 7/09. /№ 2015115350/07; Claims 04/23/2015; publ. 10.11.2016. Bul N. 31.
3. Matveev VA. *Superconducting magnetic suspension for kinetic energy storage*: Pat. 2551864 RF: МПК7 F 16 C 32/04. claimed 04.04.2014
4. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilyeva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. *Radio electronics. Computer science. Control*. 2001;2:155-159.
5. Experimental Setup and Efficiency Evaluation of Zero-Field-Cooled ZFCYBCO Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2017; 27(4). pp. 360-1105.
6. Tang J. *Superconducting and energy storage magnetic suspension flywheel with high energy*

density: Pat. CN102664567 China: Ipc7 H 02 K 7/02.

7. Pieronek TJ, Decker DK, Spector VA. Spacecraft Flywheel Systems -Benefits and Issues. IEEE, 1997. *Iosifyanovskie chteniya*. 2016.

8. Korelsky DV, Potapenko EM, Vasilieva. Review of modern methods of control of synchronous motors with permanent magnets. *Radio electronics. Computer science. Control*. 2001;2:155-159.

9. Korobko GI, Khvatov OS, Korobko IG. Development and simulation of a diesel generator with a variable rotation frequency in the ship's unified electric power installation system. *Vestnik of Ivanovo State Energy University*. 2017;1:55-61.

10. Shevchenko VP, Babiychuk OB. Synchronous motor with frequency regulation. *Electrical and computer systems*. 2014;4 (90):39-42.

11. Ali Emadi. *Energy-efficient Electric Motors*. 3ed revised and expanded. (2005), New York, Mar-sel Dekker Inc., 400 p.

12. Lyatochkin IV, Smolentsev NI. The choice of parameters of the energy storage and optimization of the enterprise's power supply system. *PolzunovskyVestnik*. 2016;4(2):65-69.

13. Baluev DYU, Zyryanov VM, Kiryanova NG, Prankevich GA. The method of calculating the main parameters of the energy storage on the experimental load diagrams. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2018;22:5(136):105.

14. Songa Z, Lib J, Hou J, et al. He Battery-Super capacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicle Applications: A Case Study. *Energy*. 2018;154:433-441. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.148.

15. Kovalchuk DA, Mazur AV. Vector control of a synchronous motor. *Automation of technological and business processes*. 2014;17:71-75.

16. Ignatov AN, Kuvardin KV, Shabronov AA. *Method of forming a pulse-width modulation signal for direct current motor control*. Pat. 2665671 RF / SibSUTI. N. 2015121006; declare 06/02/2015; publ. 03.09.2018. Bull. N. 25 .

17. Gorte OI, Zyryanov VM, Kiryanova NG; Baruch OV editors. Method of choosing parameters of energy storage under alternating load. *Nauka. Technologies. Innovations*. Collection of scientific papers. Novosibirsk: Publishing house NGTU, 2017. pp.135-138.

Authors of the publication

Nikolay I. Smolentsev – Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia. E-mail: smolentzev@rambler.ru.

Larisa M. Chetoshnikova – Branch of the South Ural State University in Miass, Russia.

Alexander N. Ignatov – Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Russia.

Поступила в редакцию

13 июля 2019г.



БАЙЕСОВСКИЙ КЛАССИФИКАТОР КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

А.А. Яхья, *В.М. Левин

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, vlevin@corp.nstu.ru

Резюме: В статье рассмотрен метод формирования статистического Байесовского классификатора применительно к задачам эксплуатационной диагностики и оперативной оценки технического состояния трансформаторного оборудования. Предложено использование классификатора в качестве регулярного средства для повышения достоверности распознавания дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах по результатам анализа растворенных в масле газов. Разработан стохастический подход к формированию классификатора в условиях линейно реализуемой дихотомии классов технического состояния. В качестве разграничительного признака применена нелинейная функция от первичных контролируемых параметров состояния. Этим одновременно достигается как снижение размерности признакового пространства, так и улучшение характеристик случайного распределения. Предложенный подход позволяет сформировать решающее правило, минимизирующее суммарную ошибку принятия решений не зависимо от воздействия на объект случайных эксплуатационных факторов. Получены результаты исследования стохастических свойств распределений разграничительного признака для каждого из выделенных классов состояний. Разработан алгоритм, предназначенный для выполнения статистических вычислений и процедуры распознавания текущего состояния трансформатора с применением сформированного решающего правила. Представленные результаты исследования иллюстрируют возможность практического применения разработанного подхода в условиях реальной эксплуатации силовых трансформаторов.

Ключевые слова: силовой трансформатор, достоверность распознавания дефектов, Байесовский классификатор, решающее правило, статистические вычисления.

Для цитирования: Яхья А.А., Левин В.М. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. № 6. С. 11-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

BAYESIAN CLASSIFIER IS THE TOOL OF INCREASING THE EFFICIENCY OF DEFECTS RECOGNITION IN POWER TRANSFORMERS

AA Yahya, *VM Levin

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, vlevin@corp.nstu.ru

Abstract: The article considers the method of forming a statistical Bayesian classifier in relation to the problems of operational diagnostics and rapid evaluation of the technical condition of transformer equipment. It is proposed to use the classifier as a regular means to improve the reliability of defect recognition in power oil-filled transformers based on the analysis of dissolved gases in oil. A stochastic approach to the formation of the classifier in a conditions linearly realized dichotomy of technical status classes is developed. As a distinguishing feature, a nonlinear function of the primary parameters of state is used. This simultaneously achieves both a reduction in the dimension of the feature space and an improvement in the characteristics of the random distribution. The proposed approach allows to form a decisive rule that minimizes the

total error of decision-making regardless of the impact on the object of random operational factors. The results of the study of stochastic properties of the distributions of the distinguishing feature for each of the selected classes of states are obtained. The algorithm to perform statistical calculations and procedures for recognizing the current state of the transformer using the generated decision rule is designed. The results of the study illustrate the possibility of practical application of the developed approach in the real exploitation of power transformers.

Keywords: *power transformer, accuracy of defect recognition, Bayesian classifier, decision rule, statistical calculations.*

For citation: Yahya AA, Levin VM. Bayesian classifier is the tool of increasing the efficiency of defects recognition in power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019; 21(6):11-18. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-11-18.

Введение

Повышение достоверности (уменьшение погрешности) оценки состояния оборудования представляет собой одну из ключевых задач технической диагностики не зависимо от сферы применения, применяемых методов и средств диагностирования. Актуальность задачи сопряжена с тяжестью последствий (затраты, ущерб), возникающих в результате ошибок при постановке диагноза, на основе которого принимаются несвоевременные и необоснованные решения о выводе оборудования в ремонт или отказе от ремонта. Решению указанной задачи посвящены многочисленные исследования, результаты которых в частности отражены в следующих публикациях [1-5].

Под достоверностью диагностирования принято понимать числовую характеристику соответствия результатов диагностики фактическому техническому состоянию объекта [1]. Различают инструментальную и методическую достоверность диагностирования. Инструментальная достоверность определяется составом и стабильностью диагностируемых параметров объекта, заданными допусками, а также точностью, чувствительностью и состоянием средств измерений [1, 2]. Методическая достоверность, как правило, связана с обработкой результатов измерений, выбором диагностических признаков и критериев для оценки технического состояния оборудования [3-5].

Одним из перспективных направлений повышения методической достоверности диагностирования маслонаполненных силовых трансформаторов с использованием результатов различных методов контроля является применение статистических решений, базирующихся на обработке данных многопараметрических измерений [6, 7, 9]. В статье рассмотрено развитие статистического подхода в направлении применения Байесовского классификатора, в качестве эффективного средства для повышения достоверности распознавания дефектов в маслонаполненных силовых трансформаторах по результатам анализа растворенных газов (АРГ).

Основные теоретические положения

Статистический подход в задачах технической диагностики электрооборудования (ЭО) базируется на наличии представительной выборки опытных данных из некоторой генеральной совокупности, которые соответствуют определенному закону распределения со статистическими моментами этого распределения. Данное положение позволило применить известные методы статистического анализа к решению многих принципиально важных задач диагностики, например, таких как формирование достоверного образа дефектов, определение допустимых и предельно-допустимых значений контролируемых параметров [8, 10], выявление и формализация практически значимых статистических зависимостей [11, 12].

Как правило, в эксплуатации ЭО, формированию выборок опытных данных предшествует определение совокупности информативных контролируемых параметров (признаков дефектов), которым предстоит выступить в роли случайных величин (СВ). Размерность исходного вектора признаков $X = x_1, x_2, \dots, x_N$ является тем параметром, от которого в критической степени зависит достоверность получаемых диагностических оценок. Дело в том, что каждая СВ x_i – компонента вектора X зачастую имеет собственное статистическое распределение со своими числовыми характеристиками, что существенно затрудняет интегральную оценку вектора признаков для формирования и разделения классов состояний ЭО. Сокращение размерности N пространства признаков упрощает преобразования и облегчает решение задачи статистической классификации. Для редукции

пространства признаков применимы методы, основанные на исключении зависимых и малозначимых компонент x_i (метод факторного анализа, метод главных компонент), которые вместе с тем не позволяют полностью исключить потери полезной диагностической информации [13].

Один из методов, использующих редукцию исходного пространства контролируемых признаков с применением специального преобразования в виде нелинейной функции от первичных диагностических параметров (1) предложен в [14]. Метод, применительно к анализу растворенных в масле силовых трансформаторов (СТ) газов (АРГ), вводит в рассмотрение обобщенный признак Φ , с помощью которого многомерное пространство X (концентраций диагностических газов A_i , ppm; $i = \overline{1,7}$ трансформируется на числовую ось в интервале $0 \div \infty$.

$$\Phi = \sum_{i=1}^7 \left[\left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right)^2 / \sum_{i=1}^7 \left(\frac{A_i}{A_{igr}} \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь A_{igr} , ppm – заданные предельные нормы концентраций диагностических газов.

Адекватная замена случайного вектора концентраций газов A_i скалярной дискретной СВ Φ позволяет от многомерной задачи перейти к исследованию свойств одномерного случайного распределения. При этом на положительной полуоси $\Phi \in 0 \div \infty$ выделяется дихотомия классов состояний трансформатора:

$$\begin{aligned} \text{класс } \Pi_1 &\in \text{состояние «норма»}; \\ \text{класс } \Pi_2 &\in \text{состояние «отклонение от нормы»} \end{aligned} \quad (2)$$

Решающее правило, устанавливающее взаимно однозначное соответствие между наличием в СТ развивающегося дефекта, значением обобщенного диагностического признака Φ и множеством классов технического состояния оборудования, может быть сформировано только после определения границы раздела дихотомии классов (2).

В условиях эксплуатации группы однотипных СТ случайная реализация Φ получается на основе единичного протокола АРГ. С учетом состава группы СТ и продолжительности периода их эксплуатации (в среднем 5 лет) может быть сформирована представительная выборка СВ, которая подвергается статистическому анализу с целью проверки закона распределения и вычисления статистических моментов в каждом из классов состояния. Для выполнения стартового разграничения дихотомии классов состояний применяется критерий «граничных концентраций»¹, согласно которому:

$$A_i \leq A_{igr} \in \Pi_1; \quad A_i > A_{igr} \in \Pi_2. \quad (3)$$

Благодаря возможности стартовой классификации по критерию (3), могут быть сформированы две обучающие выборки СВ Φ для выделенной дихотомии.

Статистический анализ распределений Φ для каждого из классов состояний производится с определением их числовых и интегральных характеристик, а также с проверкой гипотезы о принадлежности некоторому закону распределения. Многочисленные исследования статистики АРГ на разных контрольных группах СТ 110-220 кВ позволили выявить и обосновать ряд характерных особенностей распределений СВ Φ :

1) в большинстве практических случаев статистические распределения СВ Φ в классах состояний Π_1 и Π_2 представляют собой смеси нескольких однородных распределений, при возможности разделения которых появляется дополнительная диагностическая информация, ценная для обоснования правил принятия решений по дальнейшей эксплуатации СТ;

2) ширина диапазона изменения СВ Φ в классе Π_1 обусловлена:

- отличием сроков службы СТ контрольной группы: старение конструктивных элементов постепенно увеличивает концентрации характерных газов и, как следствие, значение Φ ;
- периодическим выполнением корректирующих мероприятий у длительно эксплуатируемых СТ: корректирующее воздействие с дегазацией масла уменьшает концентрации газов, а вместе с ними и значения Φ , делая их сопоставимыми со значениями, характерными для новых СТ;

¹ РД 153-34.0-46.302-00 Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2000. 25 с.

3) ширина диапазона изменения СВ Φ в классе Π_2 прежде всего обусловлена различной степенью критичности (стадией развития) выявленных в СТ дефектов;

4) как правило распределения СВ Φ в каждом из классов являются двухпараметрическими и подчиняются одному из законов: нормальному, логарифмически-нормальному, гамма, что открывает возможности для применения существенных преимуществ Байесовского классификатора при формировании границы раздела дихотомии классов состояний СТ [15]. Одним из неопределимых для повышения достоверности диагностических оценок достоинств статистического Байесовского классификатора, основанного на отношении правдоподобия, является возможность минимизации суммарной ошибки распознавания дефектов в ЭО [16]. При этом наряду с оценкой принадлежности текущего состояния ЭО одному из выделенных классов состояний может быть определена и вероятность этой оценки.

Байесовский классификатор, сформированный для заданной дихотомии классов Π_1 и Π_2 , удовлетворяющий всем указанным требованиям, представлен выражением (4):

$$\ln[p \Phi / \Pi_2] - \ln[p \Phi / \Pi_1] = \ln[P \Pi_1 / P \Pi_2]. \quad (4)$$

Здесь: $p \Phi / \Pi_j$ – условные плотности вероятности признака Φ , $j=1,2$; $P \Pi_j$ – априорные вероятности принадлежности состояния СТ к j -му классу; $P \Pi_1 / P \Pi_2$ – отношение правдоподобия. Для случайной величины Φ , распределенной по нормальному или близкому к нему закону, выражение (4) преобразуется в квадратичную форму со строгим аналитическим решением (5):

$$\Phi_{гр} = M_1 \sigma_2^2 - M_2 \sigma_1^2 + \sqrt{D} / \sigma_2^2 - \sigma_1^2, \quad (5)$$

где: $\Phi_{гр}$ – математическая модель границы раздела дихотомии классов состояний; \sqrt{D} – функция числовых характеристик случайного признака Φ в каждом j -м классе состояний (M_j – математические ожидания; σ_j – среднеквадратические отклонения). В подавляющем большинстве случаев точной модели (5) может быть противопоставлена приближенная модель (6):

$$\Phi_{гр} \approx M_1 + k \cdot \sigma_1, \quad (6)$$

удовлетворяющая «правилу 3-х сигм» для нормального статистического распределения Φ в классе состояний Π_1 . Исследованиями установлено достаточно хорошее совпадение результатов расчета $\Phi_{гр}$ по точной (5) и приближенной (6) моделям. Кроме того модель (6) позволяет корректировать значение $\Phi_{гр}$ путем подбора вычислительной константы $k = 2 \div 3$ по критерию $\min \varepsilon k$, где εk – оценка суммарной ошибки распознавания дефекта в СТ, включающая оценки ошибок 1 и 2 рода: ε_1 – «ложная тревога» и ε_2 – «пропуск дефекта». С учетом сказанного можно сформулировать следующие правила принятия решений по распознаванию классов эксплуатационного состояния СТ:

$$\Phi \leq \Phi_{гр}, \text{ класс состояния } \Pi_1; \quad \Phi > \Phi_{гр}, \text{ класс состояния } \Pi_2; \quad (7)$$

Результаты расчетов. Анализ и обсуждение

В расчетной части исследований рассмотрена ситуация с одним из блочных СТ НТЭЦ (ТДЦ-250000/220) 1992 года выпуска, у которого в августе 2006 года по данным диагностики был выявлен развивающийся термический дефект в диапазоне высоких температур $\theta > 700^\circ \text{C}$. Дальнейшая эксплуатация СТ сопровождалась повышенными концентрациями углеводородных газов: C_2H_4 – этилена, CH_4 – метана, C_2H_6 – этана, а также оксида С и диоксида C_2 углерода. Очаг дефекта предположительно располагался в нижней части ярма магнитопровода, куда доступ был исключен без полной разборки конструкции активной части (то есть выполнения дорогостоящего капремонта). Эксплуатацией было принято решение продолжить работу СТ под нагрузкой с учащенным отбором проб масла для АРГ и периодической его дегазацией. В таком состоянии СТ эксплуатировался до марта 2013 года. За это время развитие дефекта перешло в критическую фазу с угрозой термического повреждения целлюлозной изоляции. В результате ретроспектива АРГ составляла 146 протоколов, из которых 57 (согласно критерию «границных концентраций») принадлежали классу состояний Π_1 , а 89 – классу Π_2 . На рис. 1 приведены гистограммы относительных частот Φ для выделенной

дихотомии классов состояний. Область пересечения гистограмм в классах Π_1 и Π_2 определяет суммарную ошибку распознавания состояния СТ, оценка которой составляет $\varepsilon = 2,57\%$. Числовые характеристики распределений Φ для дихотомии классов показаны в таблице. Вычисления $\Phi_{гр}$ по моделям (5) и (6) показали достаточно близкие результаты – 0,7351 и 0,7347 соответственно.

При значении вычислительной константы в выражении (6) $k = 2$ определяются следующие оценки ошибок $\varepsilon_1 = 1,75\%$ и $\varepsilon_2 = 0,82\%$, что вполне согласуется с требованиями реальной эксплуатационной практики.

Статистический анализ двухпараметрических распределений СВ Φ в каждом из классов состояний СТ с проверкой начальной гипотезы о принадлежности одному из выше перечисленных законов выполнялся по критерию Колмогорова-Смирнова. Расчеты с приемлемой доверительной вероятностью подтвердили состоятельность выдвигаемой начальной гипотезы. Иллюстративная часть расчетов в виде эмпирических и теоретических частот распределений Φ представлена на рис. 2.

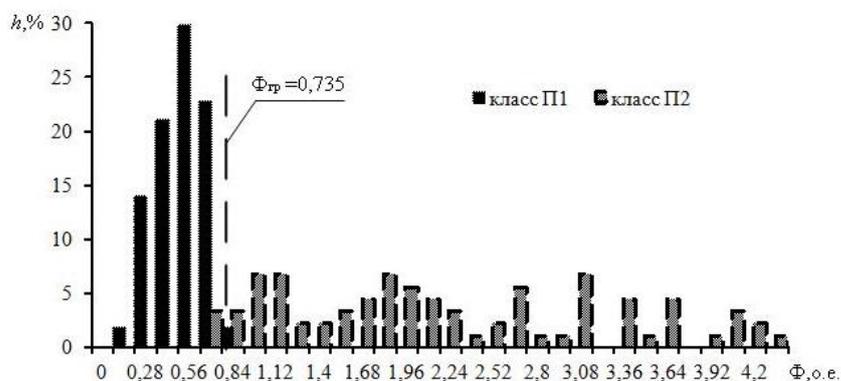
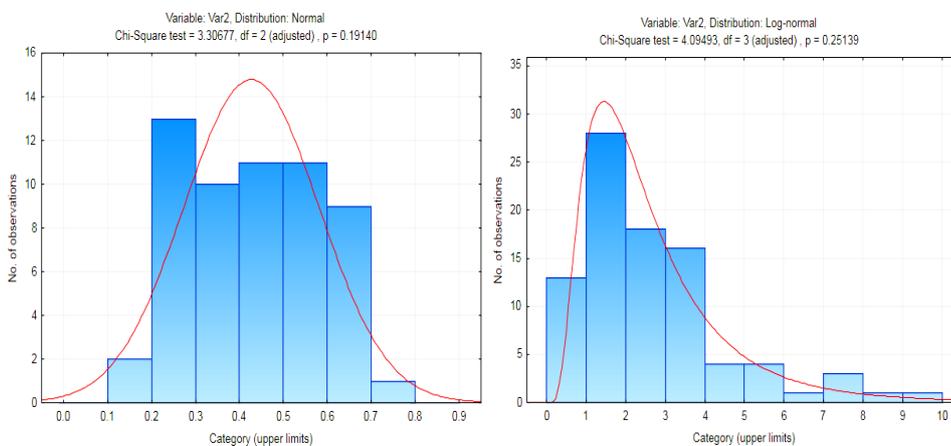


Рис. 1. Гистограммы относительных частот СВ Φ для дихотомии классов СТ

Таблица

Числовые характеристики распределений СВ Φ для каждого из классов состояний		
Класс состояния СТ	Значения числовых характеристик распределения Φ	
Π_1 «норма»	$M_1 = 0,4273$	$\sigma_1 = 0,1537$
Π_2 «отклонение от нормы»	$M_2 = 2,0622$	$\sigma_2 = 1,0689$

Результатами исследования установлено, что с доверительной вероятностью 0,95 исследуемое распределение случайного признака Φ в классе Π_1 удовлетворяет нормальному закону, в классе Π_2 – логарифмически-нормальному закону.



а – нормальное распределение в классе Π_1

б – логнормальное распределение в классе Π_2

Рис. 2. Результаты проверки гипотез о статистическом законе распределения СВ Φ

Для автоматизации статистических вычислений и последующей диагностической оценки состояния СТ по критериям (7) разработан алгоритм, представленный на рис. 3, и его программная реализация.



Рис. 3. Алгоритм статистических вычислений и оценки состояния ОД (ВК – вибрационный контроль; ИК – инфракрасный контроль; ВВИ – высоковольтные испытания; АРГ – анализ растворенных газов)

Выводы

Актуальность повышения достоверности диагностических оценок ЭО, на основании которых принимаются решения о продлении его эксплуатации или выводе в ремонт, чрезвычайно высока, поскольку определяет надежность функционирования ЭО и электроэнергетической системы в целом. Применение Байесовского классификатора в качестве регулярного средства повышения методической достоверности диагностических оценок, не смотря на некоторые ограничения, открывает практически неограниченные возможности для формирования адаптивных решающих правил, минимизирующих суммарную ошибку распознавания. Предложены модели и методика расчета классификатора.

Рассмотрен один из примеров практического применения разработанного статистического подхода, представлена его алгоритмическая реализация, обеспечивающая поддержку вычислительных процессов. Результаты исследования наглядно демонстрируют перспективы в направлении формирования информационно-аналитической системы для поддержки принятия решений по эксплуатации маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе адаптивных правил с применением Байесовского классификатора.

Литература

1. Железнов Ф.Д., Акулов В.А., Плотников Ю.И. и др. Методы и средства повышения достоверности ультрафиолетовой диагностики изоляции контактной сети. Доступно по: www.panatest.ru/static?al=ultrafiuletovaja-diagnostika-izoljacii-kontaktnoj-seti. Ссылка активна 28 августа 2019.
2. Чернопазов М.С., Миронов И.С., Постановов С.А., и др. Повышение достоверности оценки измеряемых параметров технического состояния. 2015. №3. С. 24-29.
3. Кузнецова М.И., Китаев С.В. Повышение достоверности диагностирования технического состояния газотурбинных установок // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2014. №3. С. 25-28.
4. Агарков С.А., Власов А.Б., Юдин Ю.И. Система тепловизионной диагностики электро и теплоэнергетического оборудования на судах и объектах береговой инфраструктуры // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2016. №3. С. 66-74.
5. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
6. Catterson V. M. and Rudd, S. E. and McArthur, S. D. J. and Moss, G. (2009). On-line transformer condition monitoring through diagnostics and anomaly detection. In: IEEE International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems 2009 (ISAP 2009), 8-12 Nov 2009, Curitiba, Brazil.
7. Dončuk J., Mentlik V., Velek J. Condition assessment of power transformer using gas detection

methods. Доступно по: <http://pe.org.pl/articles/2013/1a/42.pdf>. Ссылка активна на 28 августа 2019.

8. Mirowski P., LeCun Ya. Statistical Machine Learning and Dissolved Gas Analysis: A Review // IEEE Transactions on Power Delivery. 2012. V. 27. Is. 4. pp. 1791-1799.

9. Wang L., Zhao X., Pei J., et. al. Transformer fault diagnosis using continuous sparse auto encoder Springer Plus. 2016.V.5. P.448.

10. Давиденко И.В., Комаров В.И. Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2003. №1. С. 37-41.

11. Коваленко Д.А., Завидей В.И., Печенкин В.И. Применение корреляционного анализа при активно-тепловой диагностике внутреннего состояния силовых трансформаторов // В мире научных публикаций. 2015. № 2 (62). С. 449-464.

12. Захаров А.В. Корреляционные характеристики диагностических параметров газов, растворенных в масле, при нормальном режиме работы трансформатора // НРЭ. 2002. № 1. С. 36-40.

13. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., и др. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

14. Левин В.М., Яхья А.А. Адаптивное управление техническим состоянием силовых трансформаторов // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 11. С. 81-89.

15. Puza B. Bayesian methods for statistical analysis // Australian National University, VIEW. 2015; 677 p.

16. Юдин С.В., Протасьев В.Б., Подкопаев Р.Ю и др. Методика статистического приемочного контроля на основе байесовского подхода (гипергеометрическое распределение) // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 10. С. 161-165.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, НЭТИ.

Яхья Аммар Абдулазиз – аспирант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Zheleznov FD, Akulov VA, Plotnikov YuI et al. *Metody i sredstva povysheniya dostovernosti ul'trafiol'etovoi diagnostiki izolyatsii kontaktnoi seti*. Available at: www.panatest.ru/static?al=ultrafiol'etovajadiagnostika-izoljacii-kontaktnoj-seti. Accessed to: 28 Aug 2019.

2. Chernopazov MS, Mironov IS, Postanogov SA, et al. Povyshenie dostovernosti otsenki izmeryaemykh parametrov tekhnicheskogo sostoyaniya. 2015;3:24-29.

3. Kuznetsova MI, Kitaev SV. Povyshenie dostovernosti diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh ustanovok. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*. 2014;3:25-28.

4. Agarkov SA, Vlasov AB, Yudin YuI. Sistema teplovizionnoi diagnostiki elektro- i teploenergeticheskogo oborudovaniya na sudakh i ob"ektakh beregovoi infrastruktury. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016;3:66-74.

5. Birger IA. *Tekhnicheskaya diagnostika*. М.: Mashinostroenie, 1978. P. 240.

6. Catterson VM and Rudd, SE and McArthur, et al. On-line transformer condition monitoring through diagnostics and anomaly detection. In: *IEEE International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems 2009 (ISAP 2009)*, 8-12 Nov 2009, Curitiba, Brazil.

7. Dončuk J, Mentlik V, Velek J. Condition assessment of power transformer using gas detection methods. Available at: <http://pe.org.pl/articles/2013/1a/42.pdf>. Accessed: 28 Aug 2019.

8. Mirowski P, LeCun Ya. Statistical Machine Learning and Dissolved Gas Analysis: A Review. IEEE Transactions on Power Delivery. 2012;27(4):1791-1799.

9. Wang L, Zhao X, Pei J, et al. *Transformer fault diagnosis using continuous sparse auto encoder Springer Plus* (2016) 5: 448. Published online 2016. doi: 10.1186/s40064-016-2107-7.

10. Давиденко И.В., Комаров В.И. Применение методов математической статистики для получения критериев оценки состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов. *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2003;1:37-41.

11. Kovalenko DA, Zavidel VI, Pechenkin VI. Primenenie korrelyatsionnogo analiza pri aktivno-teplovoi diagnostike vnutrennego sostoyaniya silovykh transformatorov. *V mire nauchnykh publikatsii*. 2015; 2 (62): 449-464. doi: 10.12731/wsd-2015-2-26.
12. Zakharov AV. *Korrelyatsionnye kharakteristiki diagnosticheskikh parametrov gazov, rastvorenykh v masle, pri normal'nom rezhime raboty transformatora*. NRE. 2002;1:36-40.
13. Aivazyan SA, Bukhshtaber VM, Enyukov IS, et. al. *Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti*. Moskva: Finansy i statistika, 1989. P. 607.
14. Levin VM, Yakh'ya AA. Adaptivnoe upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem silovykh transformatorov. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2018;11:81-89.
15. Puza B. Bayesian methods for statistical analysis: Australian National University, VIEW. 2015; 677 p.
16. Yudin SV, Protas'ev VB, Podkopaev RYu, et. al. Metodika statisticheskogo priemchnogo kontrolya na osnove baiesovskogo podkhoda (gipergeometricheskoe raspredelenie). *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2018;10:161-165.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: vlevin@corp.nstu.ru.

Ammar A. Yahya – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила в редакцию

12 сентября 2019г.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК

Н.А. Миронова

Донецкий национальный университет экономики и торговли имени
Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, ДНР

ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-5717-1116>, Mironova_nad@mail.ru

Резюме: В работе проведены результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик плодовых косточек при их сушке инфракрасным излучением в виброкипящем слое. Промышленная переработка сырья биологического происхождения представляет собой сложный комплекс последовательно выполняемых и взаимосвязанных механических, теплофизических, биотехнологических и других специфических процессов, и требует в условиях жесткой конкуренции на рынке повышения эффективности теплообмена с выработкой качественных, полноценных и безопасных в санитарном отношении пищевых продуктов. Одним из малоисследованных сырьевых источников питательных веществ являются плодовые косточки. Определение коэффициента теплопроводности осуществлялось зондовым методом. Для определения плотности плодовых косточек использовали пикнометрический метод. Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая *i*-тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли ω_i в продукте. На основе полученных экспериментальных данных произведен анализ закономерностей изменения теплофизических характеристик по мере удаления влаги из плодовых косточек, получены соответствующие эмпирические зависимости, описывающие данный процесс. Полученные значения теплофизических характеристик плодовых косточек позволяют установить кинетические закономерности процесса нагрева. Результаты могут быть использованы для проведения комплексного инженерного расчета установки для сушки плодовых косточек на плодоовощных и консервных предприятиях.

Ключевые слова: плодовые косточки; теплофизические характеристики; эмпирические зависимости; инфракрасная сушка; виброкипящий слой.

Благодарности: работа выполнена по результатам Госбюджетной темы Г 2017-5 Государственной организации высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», кафедры оборудования пищевых производств «Исследование процессов переработки нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья».

Для цитирования: Миронова Н.А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик плодовых косточек // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 19-28. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-19-28.

RESEARCH OF THE HEAT OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF FRUIT OSSICLES

NA Mironova

Donetsk national university of economics and trade named after
Mykhayilo Tugan-Baranovsky, Donetsk, DPR

ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-5717-1116>, Mironova_nad@mail.ru

Abstract: Utilization of fruit seeds plays a special role, since they are a valuable raw material for the oil and fat industry, at the enterprises of which the complex processing of seeds is carried out:

oil is obtained from kernels, crumbs and powder are obtained from shells. Before placing the seeds in the oil and fat enterprises, they must be cleaned of impurities and dried, since the seeds extracted from the fruits have an increased humidity of 25-60% and contain a significant amount of impurities in the form of pulp and squeezes. However, due to the lack of specialized equipment for drying fruit seeds in canneries, their supply to the kernel oil plants is declining every year. In this case, tons of seeds are simply destroyed. Attempts to use existing industrial dryers proved to be ineffective, since they do not take into account the structural features of fruit seeds, and are also not very adapted to significant fluctuations in the moisture of raw seeds and the unevenness of their receipt on drying. The most appropriate method of drying fruit seeds is the use of infrared radiation and a vibro-boiling layer.

Keywords: fruitossicles, thermophysical characteristics, empirical dependencies, infrared drying, vibro boiling layer.

Acknowledgments: the work was carried out according to the results of the State budget theme G 2017-5 State Organization of Higher Professional Education «Donetsk national university of economics and trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky», of food production equipment “Study of the processing of non-traditional food and medicinal raw materials”.

For citation: Mironova NA. Research of the heat of physical characteristics of fruit ossicles. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):19-28. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-19-28.

Введение

Исследования теоретических и прикладных проблем тепломассопереноса, связанных с совершенствованием энергосберегающих технологий термической сушки, несмотря на самое широкое внимание и длительный период реализации до настоящего времени по многим аспектам остаются актуальными задачами промышленной теплоэнергетики. С их решением непосредственно связано развитие и качественное совершенствование высокоэффективных экономичных технологий в целом ряде современных промышленных отраслей, включая пищевую промышленность, в частности, для консервного производства пищевой промышленности в числе первостепенных по важности стоит проблема комплексного использования сельскохозяйственного сырья, более полного вовлечения вторичных материальных ресурсов в народное потребление. Рациональное использование побочных продуктов и отходов производства является важнейшим резервом увеличения выработки продукции и повышения эффективности производства в пищевой индустрии.

Проблема сохранения и переработки плодовых косточек, как ценного сырья для целого ряда отраслей промышленности решается их сушкой на плодоовощных предприятиях.

Воздействие теплоты на биологические объекты (пищевые продукты), с целью сохранения их ценных пищевых свойств, стало предметом пристального теоретического и практического изучения в современной науке, базирующаяся на фундаментальных положениях теплофизики и пограничных наук, такие как биохимия, биофизика, микробиология, термодинамика.

Литературный обзор

Теоретические основы тепло- и массообмена в процессах сушки пищевого растительного сырья и их аппаратное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, М.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, П.Г. Романкова, А.С. Гинзбурга, А.М. Голдовского, В.В. Белобородова, В.В. Красникова, В.Е. Куцаковой, В.Ф. Фролова, Е.П. Кошевого, Г.К. Филоненко, И.А. Рогова, Б.А. Вороненко и других ученых[1,5].

Однако, несмотря на обилие публикаций, проблемы изучения различного теплового воздействия на пищевые продукты по-прежнему остаются актуальными. Это связано, прежде всего, с тем, что пищевые продукты обладают значительной изменчивостью своих свойств: содержание влаги, химический состав, созревание, время года.

Неоднородность плодовых косточек как объекта сушки - наличие высокобелкового ядра, прочно удерживающего влагу, и косточковой оболочки, легкоотрывающей влагу - требует создания таких условий сушки, при которых будет происходить интенсивное удаление слабо связанной поверхностной влаги из капиллярно-пористой оболочки и перемещение прочно связанной влаги в коллоидном ядре к поверхности косточки. При

испарении влаги с поверхности происходит усадка ядер, а из-за низкой теплопроводности влага не успевает переместиться из глубинных слоев ядра к поверхности. В результате этого косточковая оболочка трескается.

Улучшение показателей процесса сушки плодовых косточек, в частности сокращение расхода энергоресурсов, продолжительности протекания процесса с сохранением качества продукта, осуществлялось путем применения комбинированного способа с использованием инфракрасного нагрева и виброкипящего слоя. При таком способе тепловой обработки достигается интенсивное перемешивание продукта, максимальная поверхность испарения, равномерное импульсное нагревание материала, что позволяет использовать высокие температуры, а также высушивать материал до низкой остаточной влажности (1,7...5%).

Анализ движения продукта в виброкипящем слое при воздействии инфракрасных излучений показывает, что в хаотичном движении материала существует элемент периодичности. Продукт, который перемешивается в данном слое, кратковременно присутствует в зоне облучения успевая нагреться. При этом происходит испарение влаги с его поверхности. Пребывая вне зоны излучения, продукт охлаждается. Температурный градиент изменяет свое направление, совпадая с направлением градиента содержания влаги. В этот период термодиффузия способствует перемещению влаги - интенсифицирует процесс [1-4].

Для выполнения тепловых расчетов при создании установки для сушки плодовых косточек необходимо знание теплофизических характеристик, от которых зависит выбор рационального метода и режима сушки.

В тепловых технологиях наибольший интерес представляет задача определения всего комплекса теплофизических характеристик (ТФХ), а именно: изменение температуропроводности α , коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности продукта ρ , при этом необходимо знать не только количественное значение перечисленных величин, но и их функциональную зависимость от температуры и влагосодержания.

Теплофизические характеристики плодовых косточек являются функциями состояния и свойств вещества, зависящих от многих факторов, к которым следует отнести химический состав, начальное влагосодержание, структуру продукта, режимы сушки. При этом большое значение имеет характер изменения ТФХ от основных параметров влажного материала: температуры и влагосодержания.

В научной литературе отсутствуют данные по теплофизическим характеристикам плодовых косточек, поэтому существует необходимость в их определении.

Методы

Для определения коэффициента теплопроводности плодовых косточек нами использовался зондовый метод и прибор «МИТ-1».

Прибор «МИТ-1» предназначен для оперативного определения теплопроводности и термического сопротивления материалов зондовым методом в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-40-95, ГОСТ 30256-94. Диапазон измерений прибора составляет 0,07-4 Вт/(м·К), предел основной ошибки $\pm 5\%$, продолжительность измерения 5...6 мин.

На рис. 1 представлен общий вид прибора «МИТ-1» и схема устройства для измерения.

Принцип действия прибора основан на измерении изменения температуры измерительного зонда за определенное время при его нагреве постоянной мощностью.

Прибор состоит из электронного блока, измерительного зонда и внешнего источника питания с выходным напряжением 5В, необходимого для обеспечения достаточной мощности нагревателя в процессе измерений. На лицевой панели корпуса электронного блока расположены клавиатура и окно графического дисплея. В верхней торцевой части корпуса находится разъем для подключения зонда, а также разъем USB для связи с компьютером для обработки результатов и подключения внешнего источника питания. На задней панели в нижней части корпуса находится крышка батарейного отсека. На левой боковой стенке имеется кистевой ремешок.

При определении коэффициента теплопроводности использовался порошок сырых, в процессе сушки и высушенных плодовых косточек, при этом в стеклянный цилиндр помещали исследуемые образцы, вставляли в центр цилиндра зонд диаметром 6,0 мм и максимально уплотняли исследуемый материал. Повторными измерениями устанавливали необходимый диапазон измерений теплопроводности и значения коэффициента теплопроводности в каждом случае.

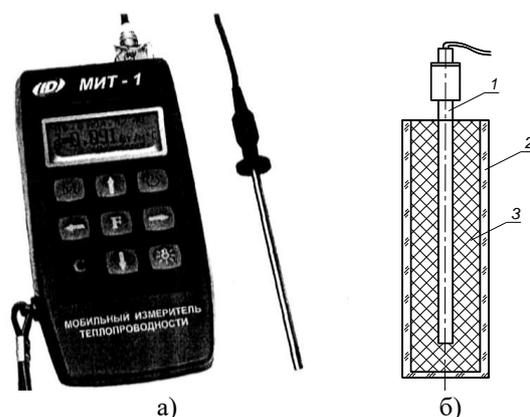


Рис. 1. Общий вид прибора «МИТ-1» (а) и схема устройства для измерения коэффициента теплопроводности (б). Условные обозначения: 1 – зонд; 2 – стеклянный цилиндр емкостью 100 мл; 3 – исследуемый материал

Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая i -тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доли ω_i в продукте. В результате формула для определения удельной теплоемкости плодовых косточек приняла следующий вид [4-6]:

$$c_{\Pi} = \omega_{\text{в}}c_{\text{в}} + \omega_{\text{м}}c_{\text{м}} + \omega_{\text{б}}c_{\text{б}} + \omega_{\text{угл}}c_{\text{угл}} + \omega_{\text{ц}}c_{\text{ц}} \quad (1)$$

где: $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды; $c_{\text{м}}$ – удельная теплоемкость масла; $c_{\text{б}}=c_{\text{угл}}=1,41$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость белков и углеводов [5]; $c_{\text{ц}}=1,33$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость целлюлозы [5].

Удельными теплоемкостями воды и масла задавались как функции среднеобъемной температуры продукта. В первом случае использовались табличные данные из источника[5] (для промежуточных значений температуры удельная теплоемкость воды определялась с помощью интерполяции). Во втором случае использовалось следующее уравнение[5]:

$$c_{\text{м}} = \begin{cases} 1,66(0,439 + 0,00185T_{\text{ср}}) & \text{при } 273 < T_{\text{ср}} < 363, \\ 1,66(0,275 + 0,0023T_{\text{ср}}) & \text{при } 363 < T_{\text{ср}} < 423, \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{\text{ср}}$ – абсолютная среднеобъемная температура продукта.

Для определения плотности плодовых косточек использовали пикнометрический метод с постоянной меткой 100 мл (мерная колба).

Пикнометр представляет собой сосуд, изготовленный из стекла, объем которого известен очень точно. Сосуд имеет узкое горло и глухую пробку для уменьшения испарения. Такая конструкция пикнометра позволяет точно заполнить его жидкостью до метки, нанесенной на узком горлышке. Объем жидкости в этом случае и есть обозначенный объем пикнометра.

Пикнометрический метод измерения плотности исследуемого продукта состоит в следующем:

Взвешиваем исследуемый продукт в целом виде массой $m_{\text{прод}}$.

Пикнометр заполняем дистиллированной водой (до метки 100 мл), закрываем пробкой и взвешиваем, масса m_1 .

При погружении в пикнометр с водой исследуемого продукта он вытеснит объем воды, равный объему продукта. Удалим вытесненную воду, доведя уровень оставшейся воды до метки пикнометра. Массу пикнометра с водой и опущенным в него твердым телом обозначим m_2 .

Масса вытесненной воды будет равна $(m_1 + m_{\text{прод}} - m_2)$, а ее объем, равный объему продукта, будет равен:

$$V_{\text{прод}} = \frac{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2}{\rho_0},$$

где ρ_0 – плотность дистиллированной воды, кг/м³, $\rho_0 = \frac{m_{\text{воды}}}{V_{\text{воды}}}$

Искомая плотность исследуемого продукта вычисляется по формуле:

$$\rho_{\text{прод}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} = \frac{m_{\text{прод}}}{m_1 + m_{\text{прод}} - m_2} \cdot \rho_0.$$

Для учета поправки на выталкивающую силу воздуха $\rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right)$,

где $\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ - плотность воздуха.

В результате плотность исследуемого продукта исправленная определяется по формуле:

$$\rho_{\text{прод.испр.}} = \frac{m_{\text{прод}}}{V_{\text{прод}}} + \rho_{\text{возд}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{\text{прод}}}{\rho_0}\right). \quad (3)$$

Плотность дистиллированной воды брали исходя из температуры воды (если $t=20^\circ\text{C}$, то $\rho_0 = 0,998 \text{ г/см}^3$). Для исключения попадания воды в пористую структуру продукта, перед проведением исследований поверхность косточек покрывалась лаком, плотность которого учитывалась в расчетах. Погрешность измерений составляет $\pm 3\%$.

Результаты

Значения теплофизических характеристик: теплопроводности λ , удельной теплоемкости c , плотности ρ , коэффициента температуропроводности a , плодовых косточек в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного излучения получены согласно, описанным методикам [4,5,14].

По полученным данным в математическом пакете *Mathcad* проведена аппроксимация полиномами с последующим выводом соответствующих уравнений регрессии. Обработка данных осуществлялась при использовании встроенной функции *regress*, которая возвращает коэффициенты полинома степени n , сглаживающего точки методом наименьших квадратов. В результате получены эмпирические зависимости теплофизических характеристик плодовых косточек в рабочем диапазоне температур и влагосодержаний.

На рис.2 и рис. 3 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек абрикоса в зависимости от температуры.

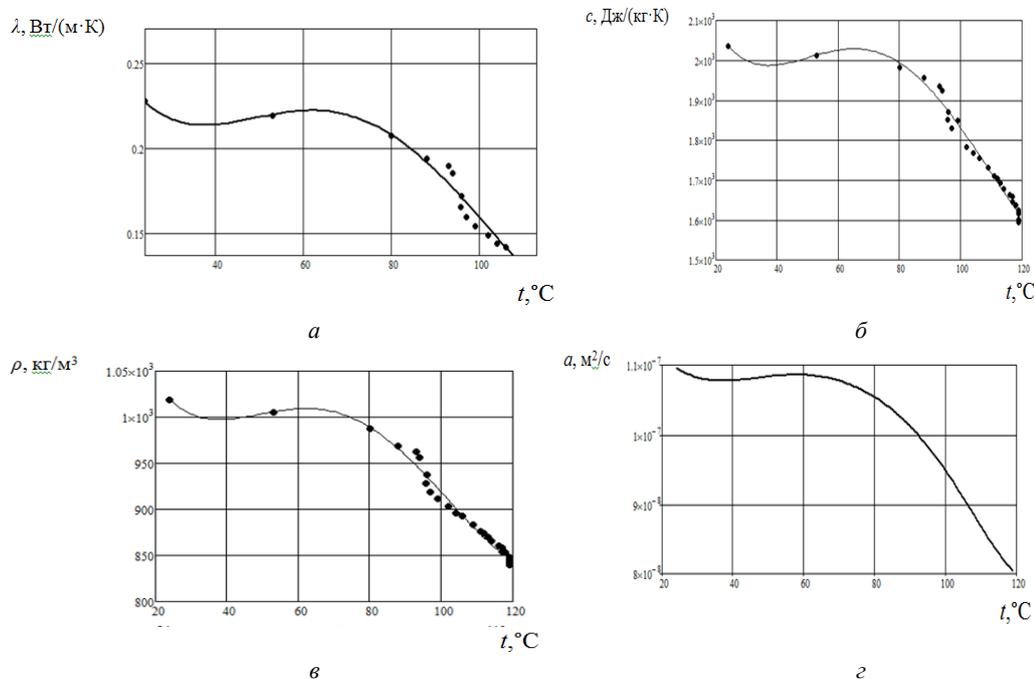


Рис.2. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при $q = 900 \text{ Вт/м}^2$

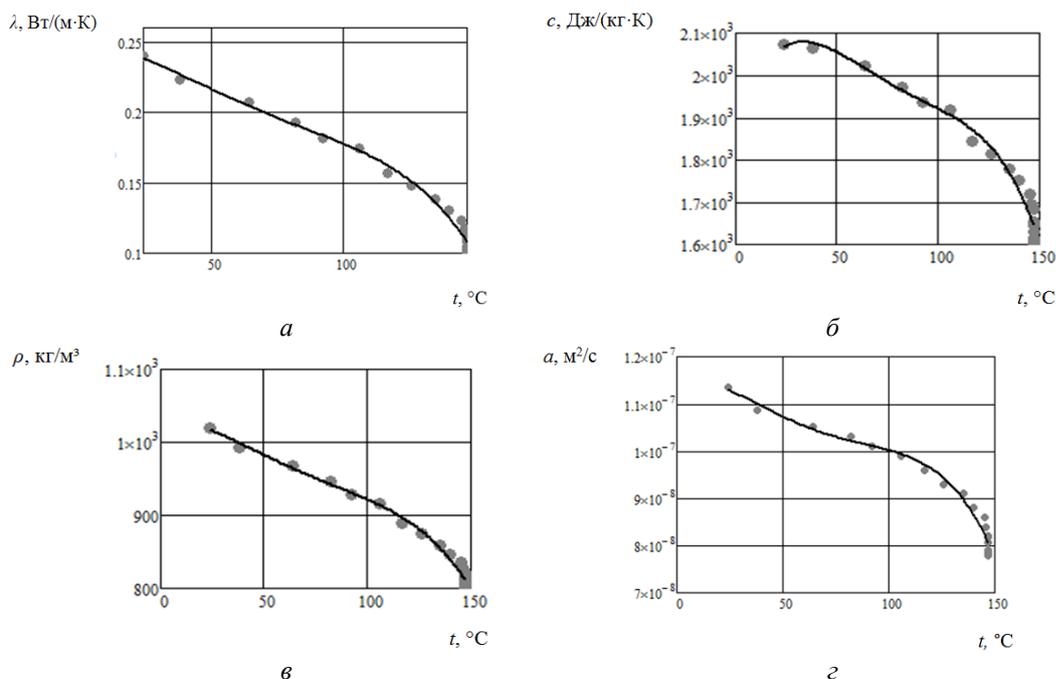


Рис.3. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек абрикоса при $q=1400 \text{ Вт/м}^2$

Из рис. 2 и рис. 3 видно, что для всех полученных кривых характерно уменьшение значений ТФХ с повышением температуры нагрева. Наблюдаем при $q = 900 \text{ Вт/м}^2$ достаточно плавное уменьшение теплофизических характеристик в интервале температур от 24°C до 80°C дальнейшее более интенсивное уменьшение до равновесного влагосодержания. При $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ характерно более равномерное уменьшение ТФХ в процессе увеличения температуры.

Характер кривых на рис. 2 и рис. 3 показывает, что при повышении плотности теплового потока инфракрасного излучения происходит более равномерное уменьшение ТФХ, также нужно отметить, что начальное влагосодержание косточек абрикоса при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$ составило $32,2\%$, а при $q = 900 \text{ Вт/м}^2$ $29,8\%$.

По мере протекания процесса сушки косточек абрикоса до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – на 21% , λ – 58% , c – 23% , a – 31% ; при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – 13% , λ – 43% , c – 20% , a – 18% .

Из представленных данных следует, что при повышении плотности теплового потока инфракрасного излучения изменение ТФХ происходит интенсивнее: ρ – на 8% , λ – 11% , c – 3% , a – 3% .

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек абрикоса:

- при плотности теплового потока 400 Вт/м^2 , диапазона температур $24...71^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $28,7...9,2\%$:

$$\lambda = -1,77 + 0,19 \cdot t - 6,5 \cdot t^2 + 9,4 \cdot t^3 - 4,9 \cdot t^4, R^2 = 0,97;$$

$$c = -8,25 \cdot 10^3 + 997,4 \cdot t - 33,8 \cdot t^2 + 0,49 \cdot t^3 - 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^4, R^2 = 0,967;$$

$$\rho = -1,44 \cdot 10^3 + 237,8 \cdot t - 8,1 \cdot t^2 + 0,12 \cdot t^3 - 6,16 \cdot 10^{-4} \cdot t^4, R^2 = 0,972;$$

$$a = -4,46 \cdot 10^{-7} + 5,3 \cdot 10^{-8} \cdot t - 1,8 \cdot 10^{-9} \cdot t^2 + 2,59 \cdot 10^{-11} \cdot t^3 - 1,34 \cdot 10^{-13} \cdot t^4, R^2 = 0,977;$$

где R^2 - величина достоверности аппроксимации;

- при плотности теплового потока 900 Вт/м^2 , диапазона температур $24...119^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $29,8...5,2\%$:

$$\lambda = 0,4 - 0,013 \cdot t + 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 1,14 \cdot 10^{-8} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$c = 2,62 \cdot 10^3 - 45,5 \cdot t + 1,1 \cdot t^2 - 0,01 \cdot t^3 + 3,45 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,988;$$

$$\rho = 1,3 \cdot 10^3 - 20 \cdot t + 0,5 \cdot t^2 - 5 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

$$a = 1,6 \cdot 10^{-7} - 4,37 \cdot 10^{-9} \cdot t + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 1,1 \cdot 10^{-12} \cdot t^3 + 3,5 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,994;$$

- при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 , диапазона температур $24...147^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $32,2...4,3\%$:

$$\lambda = 0,25 + 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot t - 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 2,9 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,1 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$c = 1,9 \cdot 10^3 + 15 \cdot t - 0,4 \cdot t^2 + 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 - 9,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,992;$$

$$\rho = 10^3 + 0,2 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, R^2 = 0,993;$$

$$a = 1,16 \cdot 10^{-7} + 1,1 \cdot 10^{-10} \cdot t - 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 1,23 \cdot 10^{-13} \cdot t^3 + 0,1 \cdot 10^{-15} \cdot t^4, R^2 = 0,993.$$

На рис.4 и 5 приведены значения теплофизических характеристик плодовых косточек черешни в зависимости от температуры.

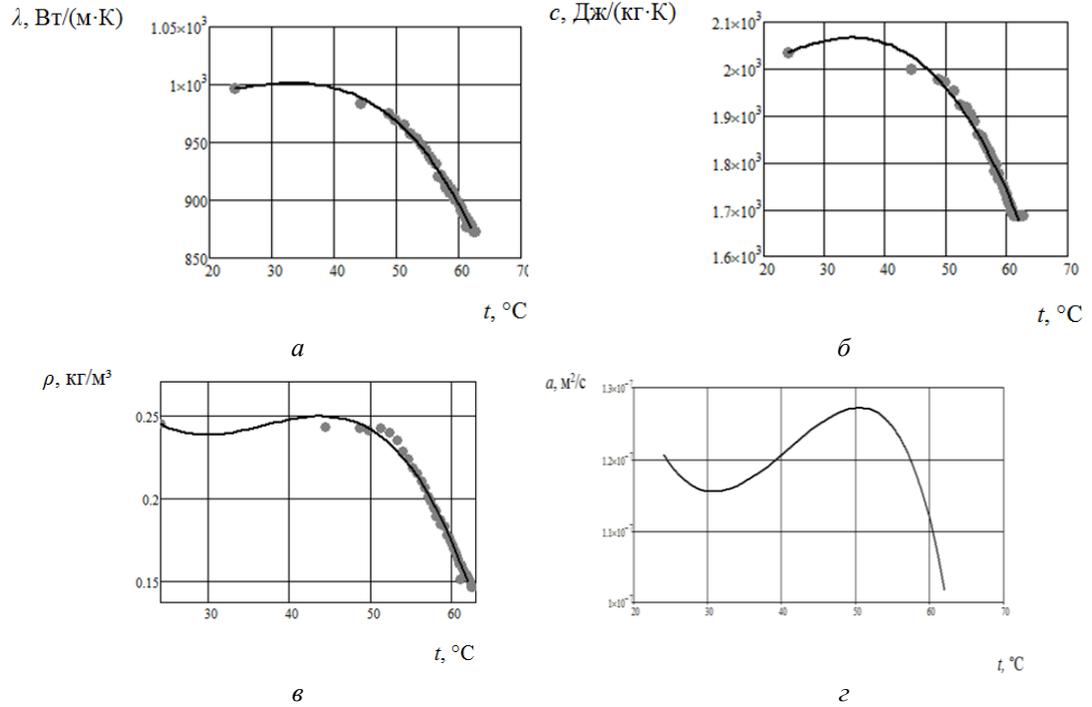


Рис.4. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при $q=400 \text{ Вт/м}^2$

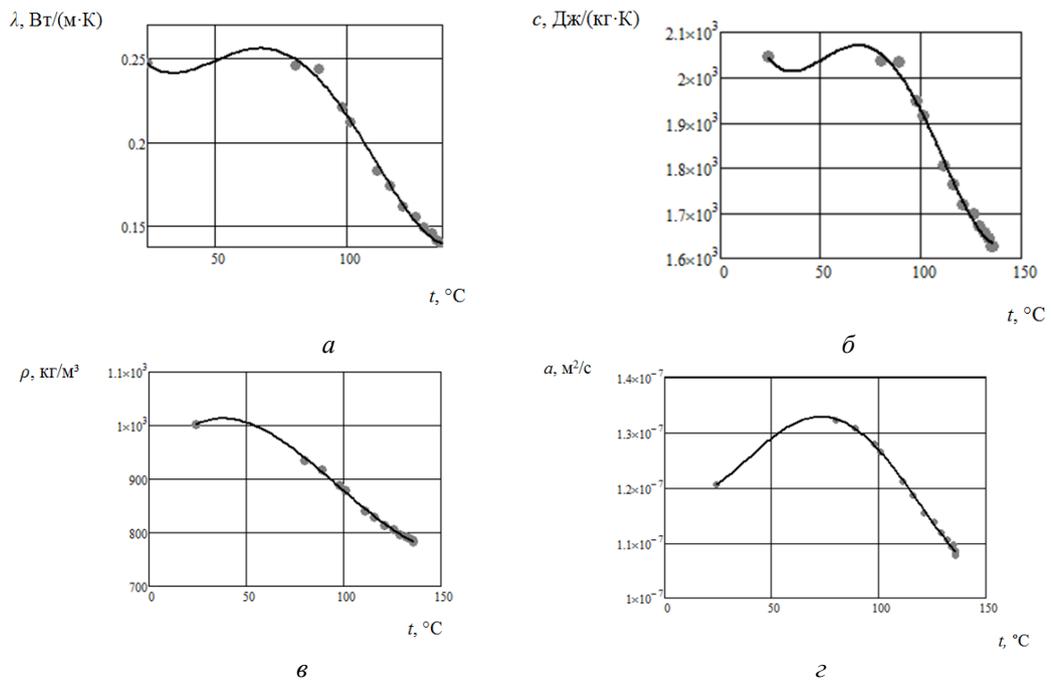


Рис.5. Температурные зависимости теплофизических характеристик: коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б), плотности (в), коэффициента температуропроводности (г) плодовых косточек черешни при $q=1400 \text{ Вт/м}^2$

Их анализ показывает аналогичную тенденцию изменения ТФХ как и для косточек абрикоса. По мере протекания процесса сушки косточек черешни до равновесного влагосодержания происходит уменьшение ТФХ с повышением температуры при $q = 1400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – на 21%, λ – 58%, c – 24%, a – 21%; при $q = 400 \text{ Вт/м}^2$: ρ – 12%, λ – 43%, c – 20%, a – 18%.

Уравнения регрессии по температурным зависимостям теплофизических характеристик для плодовых косточек черешни:

– при плотности теплового потока 400 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 113^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $25,4 \dots 2,4\%$:

$$\lambda = 0,58 - 0,03 \cdot t + 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 7,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^3, R^2 = 0,995;$$

$$c = 1,88 \cdot 10^3 + 4 \cdot t + 0,2 \cdot t^2 - 5,8 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,991;$$

$$\rho = 1 \cdot 10^3 - 4 \cdot t + 0,1 \cdot t^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 1,7 \cdot 10^{-7} - 5,5 \cdot 10^{-9} \cdot t + 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-12} \cdot t^3, R^2 = 0,995;$$

– при плотности теплового потока 900 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 62^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $25,5 \dots 6,6\%$:

$$\lambda = 0,2 + 7 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 4,8 \cdot 10^{-7} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2 \cdot 10^3 + t - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,997;$$

$$\rho = 827 + 10,9 \cdot t - 0,18 \cdot t^2 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,998;$$

$$a = 6 \cdot 10^{-8} + 3,7 \cdot 10^{-9} \cdot t - 6 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 + 2,6 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^2 = 0,975;$$

– при плотности теплового потока 1400 Вт/м^2 , диапазона температур $24 \dots 136^\circ\text{C}$, диапазона влагосодержаний $27,3 \dots 2\%$:

$$\lambda = 0,35 - 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot t + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 6,9 \cdot 10^{-9} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$c = 2,5 \cdot 10^3 - 37 \cdot t + 0,9 \cdot t^2 - 8,910^{-3} \cdot t^3 + 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, R^2 = 0,998;$$

$$\rho = 919 + 5,4 \cdot t - 0,1 \cdot t^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot t^3, R^2 = 0,999;$$

$$a = 1,2 \cdot 10^{-7} - 4,8 \cdot 10^{-10} \cdot t + 2,4 \cdot 10^{-11} \cdot t^2 - 2,8 \cdot 10^{-13} \cdot t^3, R^6 = 0,985.$$

Обсуждение

Возможность проведения аппроксимации полученных кривых изменения ТФХ косточек черешни полиномами 3^й степени в отличие от косточек абрикоса можно объяснить различным химическим составом, структурой и формой продукта.

Для оценки степени достоверности полученных уравнений регрессии была рассчитана среднеквадратичная ошибка аппроксимации, анализ полученных значений которой показывает, что погрешность расчетов не превышает 3%.

Выводы

Таким образом, полученные данные могут быть использованы в тепловых расчетах высушиваемых материалов, от которых зависит выбор рационального метода сушки материала. Тепловые характеристики необходимо знать также при обработке результатов экспериментальных исследований процессов тепло - и массообмена, определения механизма переноса тепла во влажном продукте, анализе форм и видов связи влаги с материалом [1, 9-15].

Перспективами дальнейших исследований является изучение закономерностей изменения теплофизических характеристик составляющих плодовых косточек (ядра и оболочки) в процессе сушки.

Литература

1. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 1. С. 142-149.

2. Киптелея Л. В., Загоруйко А.Н. ИК-сушка плодоягодного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2. С. 80-86.

3. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. Кинетика температурных полей плодовых косточек при инфракрасной сушке в виброкипящем слое // Вестник ДонНТУ: Международный научно-технический журн. 2017. №1(6). С. 43-47.

4. Пономарев С.В. Теоретические и практические основы теплофизических измерений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 408 с. Доступно по URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922109567.html>. Ссылка активна на: 10.12.2019.

5. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. М.: Агропромиздат, 1987. 272 с.
6. Норкулова К.Т., Сафаров Ж.Э. и др. Конвективная сушка и заготовительный процесс лекарственного растительного сырья. Труды 3 международной научно-практической конференции "Векторы развития современной науки". Уфа, 2016. С. 98-100.
7. Рудобашта С.П., Зуева Г.А. и др. Совмещенный процесс сушки и стимуляции семян с помощью импульсного инфракрасного излучения // Актуальные проблемы термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Международных Лыковских научных чтений, посвященных 105-летию академика А. В. Лыкова. М., 2015. С. 236-240.
8. Завалий А.А., Снежкин Ю.Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов. Симферополь, 2016. 264 с.
9. Алтухов И.В., Цугленок Н.В. Технология получения концентрированных сахаросодержащих продуктов с использованием импульсной инфракрасной обработки и сушки корнеклубнеплодов. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018. 155 с.
10. Modern Drying Technology. V.5: Process Intensification / Ed. by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar F-sted. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. 372 p.
11. Poperechnyi A.N., Shdanov I.V., Mironova N.A. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating // Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, Transilvania University of Brasov, Faculty of Food and Tourism. 2014. May 15-17. pp. 66-70.
12. Van't Land C.M. Drying in the Process Industry. John Wiley & Sons, 2011. 368 p.
13. C.M. Van 't Land. Drying in the Process Industry. F-st Ed. John Wiley & Sons, 2012. 381 p.
14. Поперечный А.Н., Миронова Н.А. и др. Сушка нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья. К.: Каштан, 2016. 250 с.
15. Sagar V.R., Suresh Kumar P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables // J Food Sci Technol. 2010. N. 47(1). pp. 15-26.

Автор публикации

Миронова Надежда Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры оборудования пищевых производств Государственной организации высшего профессионального образования, Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского.

References

1. Poperechnyi AN, Mironova NA. Drying kinetics of fruit seeds by infrared radiation in a vibro-boiling layer. *Scientific Journal ITMO*. Russia: St. Petersburg. 2015;1:142-149.
2. Kiptelaya LV, Zagorulko AN. Infrared drying of fruit-bearing raw materials. *Scientific journal NRU ITMO. Series Processes and Food Production Equipment*. 2014;2:80-86.
3. Poperechnyi AN, Mironova NA. Kinetics of temperature fields of fruit seeds during infrared drying in a boiling layer. *Bulletin of Don NTU: International Scientific and Technical Journal*. 2017;1(6):43-47.
4. Ponomareva SV. Theoretical and practical foundations of thermophysical measurements. М.: FIZMATLIT, 2008. 408 p.
5. Ginzburg AS, Gromov MA. Thermophysical characteristics of potatoes, vegetables and fruits. М: Agropromizdat, 1987. 272 p.
6. Norkulova KT, Safarov JE, et al. Convective drying and harvesting of medicinal plant materials. *Proceedings of the 3 th international scientific-practical conference "Vectors of the development of modern science."* Ufa, 2016. S. 98-100.
7. Rudobashta SP, Zuev GA, et al. The combined process of drying and stimulation of seeds by means of pulse infrared radiation. *Urgent problems of thermomist processing of materials in various industries and agro-industrial complex : coll. of scient. art. from the first International Lykovsky scientific readings devoted to the 105 anniversary of the academician A. V. Lykov*. 2015. pp. 236-240.
8. Zavaly AA, Snezhkin YuF. *Development and thermal modeling of devices of infrared drying of thermolabile materials*. Simferopol. 2016. 264 p.
9. Altukhov IV, Tsuglenok NV. *The technology for producing concentrated sugar-containing products using pulsed infrared processing and drying root crops*. Irkutsk: Publishing House of the Irkutsk National Research Technical University, 2018. 155 p.
10. Modern Drying Technology. V.5: Process Intensification. Ed. by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar. F-st ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. 372 p.

11. Poperechnyi AN, Shdanov IV, Mironova NA. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating. *Academic message at the 4th edition of BIOATLAS International Conference, Transilvania University of Brasov, Faculty of Food and Tourism*. 2014. May 15-17, pp. 66-70.
12. Van't Land CM. *Drying in the Process Industry*. John Wiley & Sons, 2011. 368 p.
13. Van't Land CM. *Drying in the Process Industry*. F-st Ed. John Wiley & Sons, 2012. 381 p.
14. Poperechnyi AN, Mironova NA. et al. *Drying of unconventional food and medicinal raw materials*. K: Chestnut, 2016. 250 p.
15. Sagar VR, Suresh Kumar P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables. *Journal Food Sci Technol*. 2010;47(1):15-26.

Author of the publication

Nadezhda A. Mironova – State Organization of Higher Professional Education «Donetsk national university of economics and trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky», Donetsk, DPR.

Поступила в редакцию

23 августа 2019г.



МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ С УЧЕТОМ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ

Зиганшин М. Г.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

mjihan@mail.ru

Резюме: В статье отмечаются риски на пути роста энергетического потенциала в связи с недавним принятием Правительством РФ Парижского соглашения по климату. Согласно с последними данными ООН, концентрации парниковых газов в атмосфере продолжают расти. Следовательно, от России потребуются довести сокращение выбросов CO₂ до 33-40%, что повлечет за собой снижение производства, в том числе энергогенерации, на органическом топливе. Вместе с тем, в решениях Парижского соглашения отсутствуют конкретные инструменты контроля «низкоуглеродности» производства. Это может приводить к необъективному принятию решений по проблемам «низкоуглеродности» производства как на глобальном, так и на национальном уровнях. Предлагается система рейтинговых оценок, дающая средневзвешенные числовые показатели эффективности работы генерирующих предприятий по выбросу токсичных ингредиентов и парниковых газов, с учетом энергозатрат на восстановление воздушного ареала вокруг источника выброса. Проведена валидация методики рейтинговой оценки по категории источников «стационарное сжигание топлива» при энергогенерации. Результаты расчетов по предлагаемой методике, получаемые с учетом фактической загрузки объектов, показали физическую адекватность и объективность оценки энергогенерации на тепловых станциях различного назначения по выбросу загрязнителей разнонаправленного действия. Представленные рейтинговые характеристики могут использоваться в глобальном и/или национальном масштабах, а также для внутренних целей организаций, например, при сопоставлении своих объектов с целью индикации узких мест в реальных производственных условиях.

Ключевые слова: тепловая электростанция, сжигание топлива, эффективность, парниковые газы, токсичные загрязнители, рейтинговая оценка, метод.

Для цитирования: Зиганшин М.Г. Методика оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса загрязнителей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38.

METHOD OF ASSESSMENT GENERATION EFFICIENCY AT THERMAL POWER PLANTS TAKING INTO ACCOUNT EMISSIONS OF POLLUTANTS

MG Ziganshin

Kazan State energy University, Kazan, Russia

mjihan@mail.ru

Abstract: The article notes the risks to the growth of energy potential in connection with the recent adoption by the Government of the Russian Federation of the Paris Climate Agreement. According to the latest UN data, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere continues to increase. Consequently, Russia will be required to bring the reduction of CO₂ emissions to 33-40%, which will entail a decrease in the production, including energy generation, at the base of fossil fuels. At the same time, in the decisions of the Paris Agreement there are no specific tools to control the “low-carbon” production. This can lead to biased decision-making on the problems of “low-carbon” production both at the global and national levels. A rating system is proposed that provides weighted average numerical indicators of the efficiency of generating enterprises in the release of toxic ingredients and greenhouse gases, taking into account energy costs for restoring

the air area around the source of emission. The rating assessment methodology was validated for the category of sources "stationary fuel combustion" during power generation. The results of calculations by the proposed method, obtained taking into account the actual load of the facilities, showed the physical adequacy and objectivity of the assessment of energy generation at thermal plants for various purposes for the emission of multidirectional pollutants. The presented rating characteristics can be used on a global and / or national scale, as well as for internal purposes of organizations, for example, when comparing their objects in order to indicate bottlenecks in real production conditions.

Keywords: *thermal power plant, fuel combustion, efficiency, greenhouse gases, toxic pollutants, rating, method.*

For citation: Ziganshin MG. Method of assessment generation efficiency at thermal power plants taking into account emissions of pollutants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(6):29-38. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-29-38.

Введение

Парижское соглашение по РКИК (Рамочной Конвенции по изменению климата) ООН, подписанное от имени Российской Федерации в Нью-Йорке 22 апреля 2016 г., недавно было принято (Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2019 г. № 1228) с тремя заявлениями, одно из которых говорит о неприемлемости его использования для создания барьеров устойчивому развитию Сторон Конвенции. Таким образом, с момента подписания до принятия договора прошло более трех лет, в течение которых проводились глобальные оценки рисков. Некоторые политологи приводили до двух десятков позиций экономических и политических рисков для России на пути роста ее экономического потенциала, в том числе в сфере энергетики [1]. Энергетические риски были достаточно подробно рассмотрены и в одной из работ автора данной статьи [2]. Вместе с тем, факт принятия Правительством РФ Парижского соглашения говорит об итоговом положительном результате оценки его последствий в целом. В то же время нельзя не видеть, что ключевые с позиции устойчивости развития страны сектора экономики, связанные с углеводородным сырьем и энергогенерацией, подпадают теперь под решения Парижского соглашения, в первую очередь – по линии «низкоуглеродности». Согласно с последними данными ООН, представленными на днях Всемирной метеорологической организацией (ВМО), концентрации парниковых газов в атмосфере продолжают расти [3]. Подобные сводки собираются в ВМО с ряда метеорологических организаций США и Великобритании, а также Европейского центра среднесрочных прогнозов и Японского метеорологического агентства, где они обрабатываются и передаются в ООН. Данные 2018 г. по всем видам парниковых газов, в том числе по CO₂ [4, 5], CH₄ [6-10], SF₆ [11] показали существенное превышение показателей 2017 г., который считался рекордным. Очевидно, что это не позволяет остановиться на двухградусном превышении средней температуры атмосферы, и тем более – на полутораградусном, как было представлено на Парижской конференции по инициативе Генсека ООН¹ в связи с недостаточностью, по его мнению, усилий стран в борьбе с изменением климата. Последнее потребует сокращения выброса CO₂ в России до 33-40% вместо 25-30% по предварительному «национальному вкладу» к Парижскому соглашению. Так как выброс CO₂ с 1990 г. в России из-за падения ВВП снизился приблизительно на 35%, то очевидно, это потребует или заметного уменьшения энергогенерации на органическом топливе, или дальнейшего снижения ВВП. Между тем, характерным для Парижского соглашения является отсутствие конкретных методов и инструментов осуществления решений. Это касается и критериев оценок энергогенерации по низкоуглеродности, в том числе на органическом топливе, что может привести к принятию необъективных решений как в глобальном, так и в национальном масштабах и от чего необходимо иметь, как минимум, методы и инструменты защиты.

Методы

¹ Пан Ги Мун предупредил, что миру грозит климатическая катастрофа [Электронный ресурс]. Доступно по: <https://360tv.ru/news/ekologiya/pan-gi-mun-predupredil-chto-miru-grozit-klimaticheskaja-katastrofa-39668/>. Ссылка активна на: 30 ноября 2019.

Глобальные проблемы вызываются отсутствием практических инструментов оценок производства энергии по низкоуглеродности в числовом формате, пригодном для выполнения сравнительных анализов на национальных уровнях. В распоряжении международных институтов, на которых базируется РКИК ООН, пока имеются только сведения о рейтинговых оценках энергоэффективности зданий, действующих в тех или иных странах. Они были собраны перед парижской конференцией целевой группой по энергоэффективности зданий *BEET (Buildings Energy Efficiency Taskgroup)* при Международном партнерстве в целях сотрудничества в области энергоэффективности (МПСОЭ, *IPEEC, International Partnership for Energy Efficiency Cooperation*). Выполненная группой *BEET* колоссальная работа показала, что национальные подходы весьма разобщены, и вряд ли когда-либо станут унитарными. Поэтому пока декларативно предлагается улучшение метрики и показателей энергоэффективности зданий. Вследствие того, что на здания во всем мире приходится более 30 % от общего конечного потребления энергии (чего можно было бы избежать с помощью решений в сфере дизайна, применяемых материалов, например, используемых при остеклении, оборудования, инженерных систем и контроля потребления), каждый процент экономии рассматривается эквивалентным снижению выброса CO_2 при энергогенерации. Странам-участницам Парижского соглашения рекомендовано работать совместно в рамках МПСОЭ с участием МЭА (Международного энергетического агентства, *International Energy Agency IEA*) и представителей Всемирного высшего партнерства в области энергоэффективности (*Global Superior Energy Performance Partnership, GSEP*) в сфере обмена передовым опытом по таким вопросам, как строительные нормативы, показатели энергоэффективности зданий, распространение методик рейтинговой оценки зданий, метрики, оценка стоимости, классификация и раскрытие информации. Предполагается документирование лучших практик и стимулирование стран к усовершенствованию своих нормативов и методологий рейтинговой оценки. В конечном итоге по рейтинговым показателям энергоэффективности зданий предлагается унифицировать подходы совместными усилиями всех стран-членов *IPEEC, G20* и т.д., взяв за основу схемы, используемые в странах – членах *IPEEC* с большим опытом применения рейтинга. В числе таковых традиционно предлагаются подходы стран – членов ЕС и США. В то же время, другие страны – члены *IPEEC*, такие как Китай и Индия, которые начали применение рейтингов, позиционируются как находящиеся на ранних стадиях развития, а схемы их рейтингов – как еще не накопившие достаточно данных, по которым можно было бы оценить их эффективность.

В сфере низкоуглеродной энергогенерации отсутствуют и такие методы. Так как в мире много энергоемких промышленных процессов, повышение энергоэффективности промышленного производства признано экономически эффективной стратегией снижения выброса CO_2 и считается резервом снижения выброса парниковых газов при энергогенерации, аналогичным повышению энергоэффективности зданий. Также декларируется необходимость работы в рамках существующих рабочих групп *IPEEC*, Рабочей группы *GSEP* по энергетическому менеджменту и Сети содействия энергетическому менеджменту (*Energy Management Action Network, ЕМАК*), чтобы ускорить освоение систем энергетического менеджмента промышленного производства. В частности, указывается, что действенным инструментом повышения энергоэффективности предприятий промышленного сектора будет более широкое внедрение на добровольной основе протокола по энергоменеджменту *ISO 50001:2011 «Energy management systems – Requirements with guidance for use»*. Система энергоменеджмента по протоколу *ISO 50001* учитывает разнообразие промышленных и технологических систем в странах «Группы двадцати» и легко адаптируется к потребностям различных секторов и различным обстоятельствам. Идентичный стандарт ГОСТ Р ИСО 50001-2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» с указанием о необходимости разработки критериев энергоэффективности имеется в России. Однако пока таковые отсутствуют как в российской, так и в мировой практике. Непосредственно по низкоуглеродной генерации принят за приоритетный обмен высокоэффективными технологиями с низким уровнем выбросов типа *HELE (High Efficiency- Low Emissions)* для систем автомобильных двигателей. Участвующим странам предлагается при ведущей роли Японии работать совместно на площадке существующей Рабочей группы МПСОЭ *GSEP* по электроэнергетике в целях повышения осведомленности о высокоэффективных технологиях производства электроэнергии с низким уровнем выбросов парниковых газов, внедрение которых будет способствовать снижению их уровня. Сеть организаций-исполнителей, создаваемая Японией, выстраивается в целях создания возможностей обмена передовым

опытом и знаниями в области реализации энергоэффективных проектов по нескольким секторам и технологиям. Создание расширенной сети основывается на работе уже существующих институтов, таких как Центр энергосбережения (Япония); эта работа также проводится Токийским Хабом Содействия Энергоэффективности в рамках деятельности ООН по устойчивой энергетике для всех (*SE4All, Sustainable Energy for All – Global tracking framework*).

Вышеизложенное показывает, что пока ни в глобальном, ни в национальном масштабах нет практических методов, которые позволяли бы получать объективные и прозрачные числовые характеристики эффективности энергогенерации по низкоуглеродности. С позиции международного взаимодействия в области изменения климата это приводит к отсутствию обоснованной аргументации при отстаивании национальных интересов устойчивости развития энергетики и производства в целом, а на национальном уровне – к отсутствию объективных и прозрачных ориентиров, которые помогали бы принимать корректные инвестиционные решения по энергоэффективным технологиям.

Правительством РФ еще в 2014 г. была разработана Концепция формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации². Для реализации целей данной Концепции в области мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов Минприроды России представило перед Парижской конференцией бесконфликтные методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов³. Несмотря на это, Парижскими соглашениями были приняты более жесткие обязательства, чем предполагалось в Правительстве до конференции, и теперь указанные документы нуждаются в ужесточающей корректировке.

В то же время, в соответствии с п. 33 Климатической Доктрины РФ, необходимо, исходя из приоритетов обеспечения защищенности жизненно важных интересов нашего государства, создавать и совершенствовать свои национальные механизмы, и встраивать их в соответствующие международные механизмы. Также в соответствии с п. 34 Климатической Доктрины, теперь становится релевантным обеспечивать признание международным научным сообществом результатов российских исследований, которые соответствуют мировому уровню или опережают его, и использовать их в качестве аргументов в межгосударственном политическом диалоге по проблемам климата. Это тем более необходимо в сфере исследований, касающихся разработок по числовым оценкам эффективности генерирующих предприятий по вредным выбросам, которые проводятся в России уже с середины прошлого века. В частности, в Татарстане разработки по методам оценки эффективности энергогенерации на ТЭС с учетом выброса парниковых газов ведутся с начала действия Киотского протокола. Результаты некоторых из них представлены, например, в [12, 13]. Они позволяют объективно и прозрачно оценивать совершенство используемого и модернизируемого оборудования ТЭС, в том числе с учетом международной практики [14] по выбросам от источников сжигания ископаемого топлива и требований по загрязнителям глобального действия в пересчете на CO₂, что лежит в основе протокола по энергоменеджменту ISO 50001.

Для продвижения системы рейтинговой оценки низкоуглеродности в национальном и международном масштабах после ее адаптации на региональном уровне полезно воспользоваться рекомендациями Целевой группы *BEET* по данному документу. К примеру, в п. 4.6.1 ИСО 50001 указывается на необходимость обеспечения критериев энергоэффективности следующим образом. Организация должна обеспечить регулярные измерения и анализ ключевых характеристик своих операций, которые определяют энергетическую результативность. К ним относятся, как минимум, выходные данные энергетического анализа, показатели энергетической результативности; эффективность выполнения запланированных решений. Здесь к ключевым характеристикам необходимо добавить и рейтинговую оценку генерирующей организации по выбросам парниковых газов. Это соответствует как протоколу ISO 50001, так и духу Парижских соглашений.

² Концепция формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации. Утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 апреля 2015 г. N 716-р. (Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, N 18, ст.2737)

³ Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. Утверждены приказом Минприроды России от 30.06.2015 N 300

В отмеченном ранее приказе 300 МПР РФ учетные параметры выбросов определены исходя из плана мероприятий по обеспечению к 2020 году сокращения выбросов парниковых газов до уровня не более 75 процентов объема указанных выбросов в 1990 году, утвержденного Правительством РФ до Парижской конференции⁴.

Теперь требуется дополнение национального вклада России по снижению выброса парниковых газов порядка 10%, что приведет и к соответствующему ужесточению учетных параметров выбросов. Очевидно, что дополнение вклада распределится как на энергетику, так и на транспорт и всю производственную деятельность в целом. В этой ситуации система рейтинговых оценок будет стимулировать организации к повышению точности учета выбросов всех категорий и поиску для них наилучших доступных производственных или/и очистных технологий. В соответствии с приказом 300 МПР РФ, выбросы распределяются по следующим категориям источников: стационарное сжигание топлива, сжигание в факелах, фугитивные выбросы, нефтепереработка, производство кокса, производство цемента, производство извести, производство стекла, производство керамических изделий, производство аммиака, производство азотной кислоты, капролактама, глиоксаля и глиоксиловой кислоты, нефтехимическое производство, производство фторсодержащих соединений, черная металлургия, производство ферросплавов, производство первичного алюминия, прочие промышленные процессы, авиационный транспорт, железнодорожный транспорт. Требуется учитывать следующие парниковые газы: CO₂, CH₄, N₂O, CF₄, C₂F₆, CHF₃, SF₆.

В пояснительную записку к отчету о выбросах парниковых газов должны быть включены и сведения о реализуемых мероприятиях, приводящих к сокращению выбросов парниковых газов; а также оценки и анализ изменения удельных выбросов парниковых газов и энергоемкости по основным видам производимой продукции в организации за отчетный период. Поэтому в данном случае система рейтинговых оценок обеспечит прозрачность выбора и объективность сравнения направлений модернизации оборудования для повышения энергоэффективности и снижения выбросов, или обоснование отказа от таких мероприятий.

В настоящее время проведена валидация предлагаемой методики рейтинговой оценки по категории источников «стационарное сжигание топлива» при энергогенерации. В основу методики положены уравнения (1, 2), дающие средневзвешенные числовые показатели эффективности работы генерирующих предприятий по выбросу токсичных ингредиентов и парниковых газов с учетом энергозатрат, которые возникли бы при их удалении из выбросов.

$$R = C_u \cdot \eta_{COMP} = C_u \cdot EER \cdot T_1 = C_u \cdot EER \cdot (T_1/T_2) \cdot T_2, \quad (1)$$

$$\eta_{COMP} = EER \cdot T_1 = \frac{EER \cdot V}{\tau_0 \cdot W} \left(\frac{\sum_{i=1}^m (BC_i \cdot GWP_{i100}) \cdot \prod_{i=1}^m \left(2 - \frac{C_{iAAU}}{C_{ib}} \right) + \sum_{j=1}^n \text{ПДК}_j \cdot \prod_{j=1}^n \left(2 - \frac{C_{je}}{C_{jb}} \right)}{\sum_{i=1}^m (C_{iAAU} \cdot GWP_{i100}) + \sum_{j=1}^n C_{je}} \right) =$$

$$= \left(1 - \frac{E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}}{1,1E_a} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^m (BC_i \cdot GWP_{i100})}{\sum_{i=1}^m (C_{iAAU} \cdot GWP_{i100})} \prod_{i=1}^m \left(2 - \frac{C_{iAAU}}{C_{ib}} \right) + \frac{\sum_{j=1}^n \text{ПДК}_j}{\sum_{j=1}^n C_{je}} \prod_{j=1}^n \left(2 - \frac{C_{je}}{C_{jb}} \right) \right) \times$$

$$\times \frac{100\pi H^2}{\tau_0 \cdot W} \left\{ H + D \left[w_0^r \left(1,239 - 0,147 u_m^r \right) - 0,514 \right] \frac{(\rho_{ar} - \rho)}{(\rho_{ar} - \rho_e)} \right\} \quad (2)$$

⁴ Распоряжение Правительства РФ от 2 апреля 2014 г. N 504-р (Собрание законодательства Российской Федерации, 2014, N 15, ст. 1778, 2015, N 20, ст. 2933)

В уравнениях (1, 2) приняты следующие условные обозначения: W м³/с – интенсивность выброса; $\tau_0 = 1800$ с – временной масштаб, принимаемый равным времени осреднения концентрации компонентов выбросов в атмосферном воздухе при отборе проб; $T_1 = \tau_1/\tau_0$ – безразмерный временной параметр заполнения парниковыми и токсичными газами контрольного объема экспертной оценки V , м³; τ_1 – время, с, заполнения парниковыми и токсичными газами контрольного объема экспертной оценки V , м³; $T_2 = V/(\tau_0 W_a)$ – безразмерный временной параметр заполнения выбросом контрольного объема экспертной оценки V , м³; $\tau_2 = V/W_a$ – время, с, заполнения выбросом контрольного объема экспертной оценки V , м³ (W_a м³/с – интенсивность выброса в рабочих условиях); C_{jb} мг/м³, C_{jAAU} мг/м³, BC_j мг/м³, GWP_{j100} – начальная, предельно допустимая по углеродным квотам (или другим лимитирующим нормативам), фоновая концентрации и потенциал глобального потепления j -го вида выбрасываемых парниковых газов; M_{AAU} , т CO₂- экв/год – допустимый массовый выброс парниковых газов, равный по величине углеродной квоте вида AAU (Assigned Amount Unit, единице установленного количества ЕУК или другому лимитирующим параметру); C_{ib} мг/м³, C_{ie} мг/м³, ПДК_{*i*}, мг/м³ – начальная, конечная и предельно допустимая концентрации концентрации i -го вида токсичных веществ в выбросах; ρ – плотность продуктов сгорания на выходе из трубы расчетная (при расчетной температуре t_a); ρ_e – плотность продуктов сгорания на выходе из трубы эталонная (при температуре $t_e = 150^\circ\text{C}$); ρ_{ar} – плотность атмосферного воздуха (для всех объектов принимается плотность атмосферного воздуха при нормальных условиях $\rho_{ar} = 1,293$ кг/м³); W_e^r , U_m^r – безразмерные скорости струи и ветра по месту сечения устья трубы высотой H , м, и диаметром D , м; E_a – энергозатраты на охлаждение выбросов с учетом конденсации содержащихся в них CO₂ и H₂O; $E_a^{dn} = E_{aH_2O}^{dn} + E_{aCO_2}^{dn}$ – энергозатраты на отвод теплоты конденсации CO₂ и H₂O в выбросах; Q_l – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³; η – коэффициент использования энергии топлива; C_u – степень загрузки производственных мощностей (Capacity utilization), или коэффициент использования.

Значения w_e^r , u_m^r получаются путем масштабирования скорости выхода струи из трубы w_e , рассчитанной при эталонной температуре $t_e = 150^\circ\text{C}$, и скорости обдувающего ветра u_m , по минимально допускаемой (из соображений устойчивости результата численного эксперимента) скорости выхода струи $w = 1$ м/с и скорости штиля $u_{calm} = 1$ м/с. Формула (1) справедлива при следующих ограничениях по скорости выхода струи и скорости ветра: $w_0 \geq 1$ м/с; 1 м/с $< u_m < 7$ м/с; $u_m/w_0 < 3$. Численный эксперимент по установлению высоты подъема струи проводился методами вычислительной гидродинамики и верифицировался по общепризнанным данным [15], используемым в настоящее время в нормативных методиках по расчету рассеивания выбросов в атмосфере. Были учтены также работы других авторов по вопросам математического моделирования начального подъема дымового шлейфа из труб ТЭС [16, 17].

Результаты и обсуждение

Выполнены пробные расчеты безразмерных рейтинговых числовых показателей R и η_{comp} по уравнениям (1, 2) для ряда тепловых электростанций и районных котельных Татарстана. В качестве примера в таблицах 1, 2 приведены результаты расчетов для двух ТЭС, использующих практически одинаковое по составу газовое топливо и различающихся его расходом, количеством выбрасываемых загрязнителей, характеристиками источников выбросов, а также степенью загрузки производственных мощностей.

Таблица 1

Расчеты рейтинговых оценок эффективности энергогенерации ТЭС 1 по парниковым газам

Исходные и расчетные данные		
Источник теплоснабжения	ТЭС 1	
Расход природного газа Q , тыс.м ³ /год	231900	
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	817395	
Отпуск тепловой энергии, Гкал/год	1131510	
Источники выброса – дымовая труба	№1	№2
H , м	147	147

Продолжение таблицы 1

D , м	6	6
t_w , °C	122,5°C	122,5°C
V , м ³	$2,181 \cdot 10^9$	$2,181 \cdot 10^9$
T_2	11065,0	
Токсичные загрязнители		
NO _x		
C_b , мг/м ³	80 – 280	80 – 280
C_e , мг/м ³	80 – 280	80 – 280
CO		
C_b , мг/м ³	0 – 60	0 – 60
C_e , мг/м ³	0 – 60	0 – 60
Парниковые газы при сжигании природного газа		
CO ₂ т/год	1024553,03	
т CO ₂ -экв/год	1024553,03	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 1024553,03 = 922097,73$	
GWP_{i100}	1	
BC , мг/м ³	785 (400 ppm)	
CH ₄ т/год	18,54	
т CO ₂ -экв/год	$18,54 \times 21$	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 389,34 = 350,406$	
GWP_{i100}	21	
BC , мг/м ³	1,5 (2 ppm)	
SF ₆ т/год	$0,716 \cdot 10^{-3}$	
т CO ₂ -экв/год	$0,716 \cdot 10^{-3} \times 24000$	
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	$0,9 \times 0,716 \cdot 10^{-3} \times 24000$	
GWP_{i100}	24000	
BC , мг/м ³	$2,6 \cdot 10^{-3}$ (0,4 ppb)	
T_1/T_2	0,028315008	
EER	0,5775	
Компоненты выбросов	Состав выбросов, % об.	
O ₂	5,567	
N ₂	73,641	
CO ₂	7,058	
H ₂ O	13,734	
η_{comp}	180,3074	
C_u	0,34	
R	61,63	

Таблица 2

Расчеты рейтинговых оценок эффективности энергогенерации ТЭС 2 по парниковым газам

Источник теплоснабжения	ТЭС 2		
Расход природного газа Q , тыс.м ³ /год	901200		
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	3645552		
Отпуск тепловой энергии, Гкал/год	3988934		
Источники выброса – дымовая труба	№1	№2	№3
H , м	250	250	265
D , м	9,6	9,6	9,6
t_w , °C	150°C	150°C	150°C
V , м ³	$5,245 \cdot 10^9$	$5,245 \cdot 10^9$	$5,245 \cdot 10^9$
T_2	12058,9		
Токсичные загрязнители			
NO _x			
C_b , мг/м ³	90-230	90-230	90-230
C_e , мг/м ³	90-230	90-230	90-230

Продолжение таблицы 2

СО			
C_b , мг/м ³	0 – 130	0 – 130	0 – 130
C_e , мг/м ³	0 – 130	0 – 130	0 – 130
Парниковые газы при сжигании природного газа			
CO ₂ т/год	2480639,8		
т CO ₂ -экв/год	2480639,8		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×2480639,8=2232575,		
GWP_{i100}	1		
BC , мг/м ³	785 (400 ppm)		
CH ₄ т/год	44,889		
т CO ₂ -экв/год	44,889×21		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×44,889×21 =848,4		
GWP_{i100}	21		
BC , мг/м ³	1,5 (2 ppm)		
SF ₆ т/год	1,188 10 ⁻³		
т CO ₂ -экв/год	1,188 10 ⁻³ ×24000		
M_{iAAU} , т CO ₂ -экв/год	0,9×1,188 10 ⁻³ ×24000		
GWP_{i100}	24000		
BC , мг/м ³	2,6·10 ⁻³ (0,4 ppb)		
T_1/T_2	0,024042675		
EER	0,5387		
Компоненты выбросов	Состав выбросов, % об.		
O ₂	5,59		
N ₂	73,64		
CO ₂	6,94		
H ₂ O	13,83		
η_{COMP}	156,184		
C_u	0,21		
R	32,799		

Можно видеть, что величины параметра EER 0,5755 и 0,5387, по ТЭС 1 и ТЭС 2 соответственно, отличаются незначительно. Это закономерный результат, поскольку величина EER зависит преимущественно от состава используемого топлива и способа сжигания. Параметр EER не оказывает существенного влияния при сравнении объектов, использующих для генерации природный газ, однако он весьма чувствителен при переходе на низкоуглеродное, например, водородное, топливо.

Результаты расчетов показали также сильное влияние геометрических параметров дымовых труб через показатель T_2 на числовые рейтинговые значения, если не принимать во внимание степени загрузки производственных мощностей. Поэтому при сопоставлении величин T_2 и T_1 разных производственных объектов степени их загрузки должны быть учтены. В противном случае показатель T_2 будет давать преференции в рейтинговых оценках пропорционально недопроизводству энергии.

Показатель T_1 может использоваться также для оценки воздействия объекта на окружающий воздушный ареал. Так, например, значение безразмерного времени $T_1 = 313,3$ для ТЭС 1 соответствует 6,5 суткам. Известно, что время жизни в атмосфере оксидов азота и серы составляет от 2 до 8 суток, оксида углерода 2–4 месяца. Следовательно, в ареале ТЭС 1 при неблагоприятных для рассеивания условиях возможно накопление оксида углерода, а вероятность скопления оксидов азота и серы невелика.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют о валидности разработанной методики оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса токсичных и парниковых загрязнителей. Как показали результаты расчетов по формулам 1, 2, показатели η_{COMP} и R , полученные с учетом фактической загрузки объекта, являются физически адекватными и обеспечивают объективность оценки энергогенерации на тепловых станциях различного назначения по выбросу загрязнителей разнонаправленного действия.

Представленные рейтинговые характеристики имеют существенную информационную ценность и для реальных производственных условий. Они могут использоваться для внутреннего сопоставления объектов одной организации с целью индикации узких мест в системе производства, и последующего разделения, например, на подлежащие модернизации в ближайшее время или в среднесрочной перспективе. Поэтому данный рейтинговый показатель актуален в анализе хозяйственной и иной деятельности организаций, связанной с обеспечением современных экологических требований.

Литература

1. Павленко В.Б. Парижское соглашение как угроза национальной безопасности России // Астраханский вестник экологического образования. 2017. № 4(42) С. 25-40.
2. Зиганшин М.Г., Сивков А.Л. Система рейтинговой оценки деятельности организаций по признаку «низкоуглеродности» // Надежность и безопасность энергетики. 2016. №4(35). С. 7-11
3. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin). N. 15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through. 2018.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Accessed to: 30 Nov. 2019.
5. Rubino M, Etheridge DM, et al. 2019: Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ¹³C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. Earth System Science Data, 11(2).
6. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in Atmospheric Methane Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/ Accessed to: 30 Nov. 2019.
7. Nisbet E.G., E.J. Dlugokencky. et al., 2016: Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. Global Biogeochemical Cycles, 30, 1356-1370.
8. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., et al. 2019. The Global Methane Budget 2000–2017, Earth System Science Data, Preprint. 136 p.
9. Nisbet E.G., Manning M.R. , et al. 2019. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. Global Biogeochemical Cycles. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.
10. Rice A., Butenhoff CL, et al. Atmospheric methane isotopic record favors fossil sources flat in 1980s and 1990s with recent increase. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016;113:1079-10796.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019: Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_sf6/. Accessed to:30 Nov. 2019.
12. Чичирова Н.Д., Зиганшин М.Г. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Ч. 1. Энергетические и экологические показатели с учетом выброса токсичных ингредиентов и CO₂ // Надежность и безопасность энергетики. 2013. №2 (21). С.46-49.
13. Чичирова Н.Д., Зиганшин М. Г. Оценки эффективности теплоэнергетических объектов: Часть 2. Показатели эффективности при выбросе нескольких видов парниковых газов Надежность и безопасность энергетики. 2013. №2. С. 39-43.
14. Sherwood O.A., S. Schwietzke et al., 2017. Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017. Earth System Science.
15. Берлянд М.Е., Киселев В.Б. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема // Метеорология и гидрология. 1972. №3. С. 3-10
16. Федосов А.А., Чичирова Н.Д., Шарифуллин А.Ш. Моделирование начального подъёма выбросов тепловых электрических станций. 5. Совместный расчёт динамического и теплового подъёма // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 5-6. С. 14-20.
17. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Зубков П.Т., Фадеев С.А. Математическое моделирование подъёма дымового факела в атмосфере. // Известия вузов. Энергетика. 1986. № 9. С. 87-89.

Автор публикации

Зиганшин Малик Гарифович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Pavlenko VB. Parizhskoye soglasheniye kak ugroza natsional'noy bezopasnosti Rossii. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2017;4(42):25-40.
2. Ziganshin MG, Sivkov AL. Sistema reytingovoy otsenki deyatel'nosti organizatsiy po priznaku «nizkouglerodnosti». *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2016;4(35):7-11.
3. WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through*. 2018.
4. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019. Trends in atmospheric carbon dioxide. Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>. Accessed to: 30 Nov 2019.
5. Rubino M, Etheridge DM, et al. Revised records of atmospheric trace gases CO₂, CH₄, N₂O, and δ¹³C-CO₂ over the last 2000 years from Law Dome, Antarctica. *Earth System Science Data*. 2019;11 (2):473-492. doi: 10.5194 / essd-11-473-2019.
6. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, 2019. Trends in Atmospheric Methane Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/ Accessed to: 30 Nov 2019 .
7. Nisbet EG, EJ Dlugokencky, et al. Rising atmospheric methane: 2007-2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*. 2016;30:1356-1370. Available at <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>.
8. Saunio M, Stavert AR, Poulter B, et al. 2019: The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, Preprint. 136 p. Available at <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128>.
9. Nisbet EG, Manning MR, et al. Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014-2017: Implications for the Paris Agreement. *Global Biogeochemical Cycles*. 2019;33:318-342. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.
10. Rice AL, Butenhoff CL, et al., 2016: Atmospheric methane isotopic record favors fossil sources flat in 1980s and 1990s with recent increase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Accessed to: <https://doi.org/10.1073/pnas.1522923113>.
11. National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division, 2019: *Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride*. Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_sf6/. Accessed to: 30 Nov 2019.
12. Chichirova ND, Ziganshin MG. Otsenki effektivnosti teploenergeticheskikh ob"yektov: Chast' 1. Energeticheskiye i ekologicheskkiye pokazateli s uchetom vybrosov toksichnykh ingrediyyentov i SO₂. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2013;2(21):46-49.
13. Chichirova ND, Ziganshin MG. Otsenki effektivnosti teploenergeticheskikh ob"yektov. Pt' 2. Pokazateli effektivnosti pri vybrose neskol'kikh vidov parnikovyykh gazov. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*. 2013;2:39-43.
14. Sherwood OA, Schwietzke S, et al. *Global Inventory of Gas Geochemistry Data from Fossil Fuel, Microbial and Burning Sources, version 2017*. Earth System Science Data, 2017. Available at: <https://doi.org/10.5194/essd-9-639-2017>.
15. Berlyand MYe, Kiselev VB. O vliyaniy rel'yefa na rasprostraneniye primesey s uchetom ikh nachal'nogo pod"yema. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1972;3:3-10.
16. Fedosov AA, Chichirova ND, Sharifullin ASH. Modelirovaniye nachal'nogo pod"yoma vybrosov teplovykh elektricheskikh stantsiy. 5. Sovmestnyy raschot dinamicheskogo i teplovogo pod"yoma. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2003;5-6:14-20.
17. Volkov EP, Gavrilov YeI, Zubkov PT, et al. Matematicheskoye modelirovaniye pod"yoma dymovogo fakela v atmosfere. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1986;9:87-89.

Author of the publication

Malik G. Ziganshin – Kazan State Energy University, Kazan, Russia. Email: [mjihan@mail.ru](mailto:mjihhan@mail.ru).

Поступила в редакцию

11 декабря 2019 г.



АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЕТРОМОНИТОРИНГА В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН

Е.В. Насырова, Н.Ф. Тимербаев, О.В. Леухина, И.Ю. Мазаров

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ve.kgeu@gmail.com

Резюме: В работе представлены результаты ветромониторинга, проводимого с целью подтверждения целесообразности строительства ветроэлектростанции на территории Республики Татарстан. Задачей ветромониторинга является определение и исследование динамики среднегодового ветрового режима и расчета ветроэнергетического потенциала на перспективных площадках для размещения ветроэлектростанции. На приведенных площадках после проведения годового цикла измерений метеорологических параметров будут определены среднегодовые скорости ветра, мощность ветрового потока, преимущественные направления, плотность ветра, вертикальный профиль ветрового потока и иные данные необходимые для детального расчета ветроэнергетического потенциала площадок и выбора конкретных моделей ветрогенераторов и их расстановок для эксплуатации на этих площадках. Важным компонентом выполняемой работы является отработка методик расчета ветропотенциала на высотах, отличных от высот прямых измерений.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровые установки, ветромониторинг, альтернативная энергетика, скорость ветра, направление ветра.

Для цитирования: Насырова Е.В., Тимербаев Н.Ф., Леухина О.В., Мазаров И.Ю. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 39-50. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-39-50.

DATA ANALYSIS WIND MONITORING IN THE REPUBLIC OF TATARSTAN

EV Nasyrova, NF Timerbayev, OV Leukhina, IYu Mazarov

Kazan state Energy University, Kazan, Russia
ve.kgeu@gmail.com

Abstract: The paper presents the results of wind monitoring carried out in order to confirm the feasibility of building a wind farm in the Republic of Tatarstan. The task of wind monitoring is to determine and study the dynamics of the average annual wind regime and calculate the wind energy potential at promising sites for placing a wind power plant. On the given sites, after the annual cycle of meteorological parameters measurements, the average annual wind speeds, wind power, preferred directions, wind density, vertical profile of the wind flow and other data necessary for a detailed calculation of the wind power potential of the sites and the selection of specific models of wind generators and their arrangements for operation will be determined at these sites. An important component of the work performed is the development of methods for calculating wind potential at heights other than the heights of direct measurements.

Keywords: renewable energy sources, wind installations, wind monitoring, alternative energy, wind speed, wind direction.

For citation: Nasyrova EV, Timerbayev NF, Leukhina OV, Mazarov IYu. Data analysis wind monitoring in the Republic of Tatarstan. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(6):39-50. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-39-50.

Введение

Возобновляемые источники – это природные ресурсы, способные к быстрому восстановлению естественным путём, также это источники на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. К источникам такого рода относятся ветер, солнце, движущиеся водные массы, геотермальные воды и др.

Ветер – самый проверенный и надежный источник возобновляемой энергии. Сейчас, в силу развития технологий, ветрогенераторы стали занимать крепкую позицию в своей нише.

В 2014 году количество электрической энергии, выработанной ветрогенераторами во всем мире, составило 706Твт*ч (3% всей произведенной человечеством электрической энергии) [1]. Некоторые страны, особенно интенсивно развивающие ветроэнергетику, в частности, на 2015 год в Дании посредством ветрогенераторов вырабатывалось 42% всего электричества; 2014 год в Португалии – 27%; в Никарагуа – 21%; в Испании – 20%; Ирландии – 19%; в Германии – 18,8% [2]; в ЕСв целом – 7,5% [3]. В 2014 году 85 стран мира использовали ветроэнергетику на коммерческой основе. По итогам 2015 года в ветроэнергетике занято более 1000000 человек во всем мире [4].(в том числе 500000 в Китае и 138000 в Германии) [5]. К началу 2016 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 432 ГВт [6] и, таким образом, превзошла суммарную установленную мощность атомной энергетики. Однако на практике использованная в среднем за год мощность ветрогенераторов в несколько раз ниже установленной мощности, в то время как АЭС почти всегда работает в режиме установленной мощности.

Крупные ветряные электростанции включаются в общую сеть, более мелкие используются для снабжения электричеством удалённых и энергоизолированных районов. В отличие от ископаемого топлива, энергия ветра практически неисчерпаема, повсеместно доступна и наиболее экологична. Однако сооружения ветряных электростанций сопряжено с некоторыми трудностями технического и экономического характера, замедляющими распространение ветроэнергетики. В частности, непостоянство ветровых потоков не создаёт проблем при небольшой пропорции ветроэнергетики в общем производстве электроэнергии, однако при росте этой пропорции, возрастают также и проблемы надёжности производства электроэнергии [7-9].

Таким образом, на сегодняшний день обеспеченность потребителей электроэнергией в России далеко не стопроцентная, хотя страна является энергоизбыточной и способна поставлять ресурс на экспорт. Запасы традиционных источников энергии, таких как нефть, газ и уголь, неумолимо уменьшаются и их стоимость достаточно высока, а их использование приводит к образованию парникового эффекта на планете. Постоянное повышение требований к выработке электричества заставляет искать новые средства генерации энергии [10]. Поэтому все большее количество стран в своей энергетической политике обращают свои взоры в сторону альтернативных источников энергии, разрабатывают на практике и внедряют новые технологии. Особое место в этом направлении занимает ветроэнергетика. В России эта сфера пока еще недостаточно развита для обеспечения существенной доли энергопотребления, но промышленный потенциал при должном уровне технологической поддержки может в корне исправить эту ситуацию [11].

Материалы и методы

Для выбора оптимальной площадки расположения ВЭС учитываются следующие факторы:

1. Абсолютная высота над уровнем моря или земли. Как известно, зона до 2 км турбулентна, воздушные потоки, преобладающие выше данной высоты, сильно затормаживают нижние. Но эффект заметно снижается уже на высоте 100 метров. Плюс, расположение ветряка выше 100 метров позволит увеличить длину лопасти и освободить пространство под устройством для деятельности людей и других коммуникаций.

2. Расположение. Оптимальный вариант – побережье или море (океан). Определить место установки ВЭУ так, чтобы со стороны набегающего ветрового потока (направления преимущественного ветра) на ВЭУ отсутствовали препятствия в виде строений, деревьев на расстоянии не менее двойной высоты указанных препятствий. В случае если наличие препятствий избежать невозможно, высоту башни ВЭУ необходимо выбрать такую, чтобы нижние кромки лопастей ротора были на 3–5 м выше этих препятствий.

3. Скорость ветра. Характеристика высчитывается по среднему показателю по региону. Ветроустановка начинает работать при скорости ветра 3 м/с, а при скорости свыше 25 м/с идет аварийное ее отключение, дабы не повредить устройство. Оптимальная скорость – 15 м/с. Также

нужно определить розу ветров в данной местности, направление преимущественного ветра и по силе и по времени.

4. Количество лопастей. В процессе исследований было определено, что три лопасти – самый эффективный вариант.

5. Ось вращения. В случае установки нескольких ВЭУ на ограниченной территории расстояние между осями ВЭУ рекомендуется не менее 10 диаметров их роторов, если они установлены не по фронту к преимущественному ветру; и на расстоянии двух диаметров, если ВЭУ установлены по фронту к ветровому потоку.

Ветроустановка является источником повышенной опасности как электроприбор, а также как высокоскоростной объект, от которого при вращении в случае поломки может отделяться деталь конструкции [12]. В соответствии с требованиями электробезопасности необходимо наличие на ВЭУ молниеотвода и заземления в соответствии с ГОСТ «Электроустановки зданий», часть 4 «Требования по обеспечению безопасности», гл.44 Защита от перенапряжений, раздел 443 «Защита электроустановок от грозových и коммутационных перенапряжений». Между сегментами мачты должны устанавливаться перемычки для свободного прохождения разряда в случае удара молнией [13-14].

В случае размещения ВЭУ на поверхности земли необходимо предусмотреть зону отчуждения в соответствии с ГОСТами и другими требованиями [15]. В случае размещения ВЭУ на здании или сооружении необходимо предусмотреть дополнительную защиту (экраны) для предотвращения разлета лопастей в случае поломки ротора ветроустановки [16-17].

В Татарстане заинтересованы в частичном замещении традиционной энергетики на альтернативную. Для этих целей на территории республики уже проводятся ветроизмерительные исследования силами Казанского государственного энергетического университета [18].

При выборе района монтажа ветроэнергетической установки (ВЭУ) необходимо иметь в виду то, что ротор ВЭУ начинает вращаться при скорости ветра не менее 4 м/сек., номинальную мощность ВЭУ выдает при скорости ветра 10,4 м/сек., а для эффективной работы ВЭУ желательно, чтобы среднегодовая скорость ветра была не менее 6 – 7 м/сек. Поэтому были проработаны конкретные территории в республике в трех районах, в каждом из которых отобраны 6–8 площадок, где можно разместить ветропарк. Выбор осуществлялся по следующим критериям: инфраструктура, скорость и направление ветра, различные препятствующие ограничения.

Измерение скорости ветра – ключевой элемент ветромониторинга. Для измерения этого параметра используются анемометры, расположенные на разных высотах. Как правило, ветроизмерения проводят на высоте 80 м, но сотрудники кафедры «Возобновляемые источники энергии» (ВИЭ) предложили проводить измерения на высоте 50 м, 75 м, 95 м и 100 м.

Система ветромониторинга была установлена на мачтах *HiMast* класса 1 высотой 100 м (поставляемой ООО АГИС-Инжиниринг) в Камско-Устьинском (с. Красновидово), в Спасском (с. Измери) и в Рыбно-Слободском (с. Малая Елга) районах Республики Татарстан. Одна мачта стоит на ровной площадке, две другие мачты стоят на площадке, имеющей не совсем ровную поверхность. Со всех мачт проводились сравнения результатов ветромониторинга.

На рис. 1а и рис.1б приведен технический чертеж мачты К-1, на которой установлены анемометры обогреваемые, флюгер, датчики давления, температуры и влажности. Технические характеристики измерительного оборудования представлены в табл. 1.

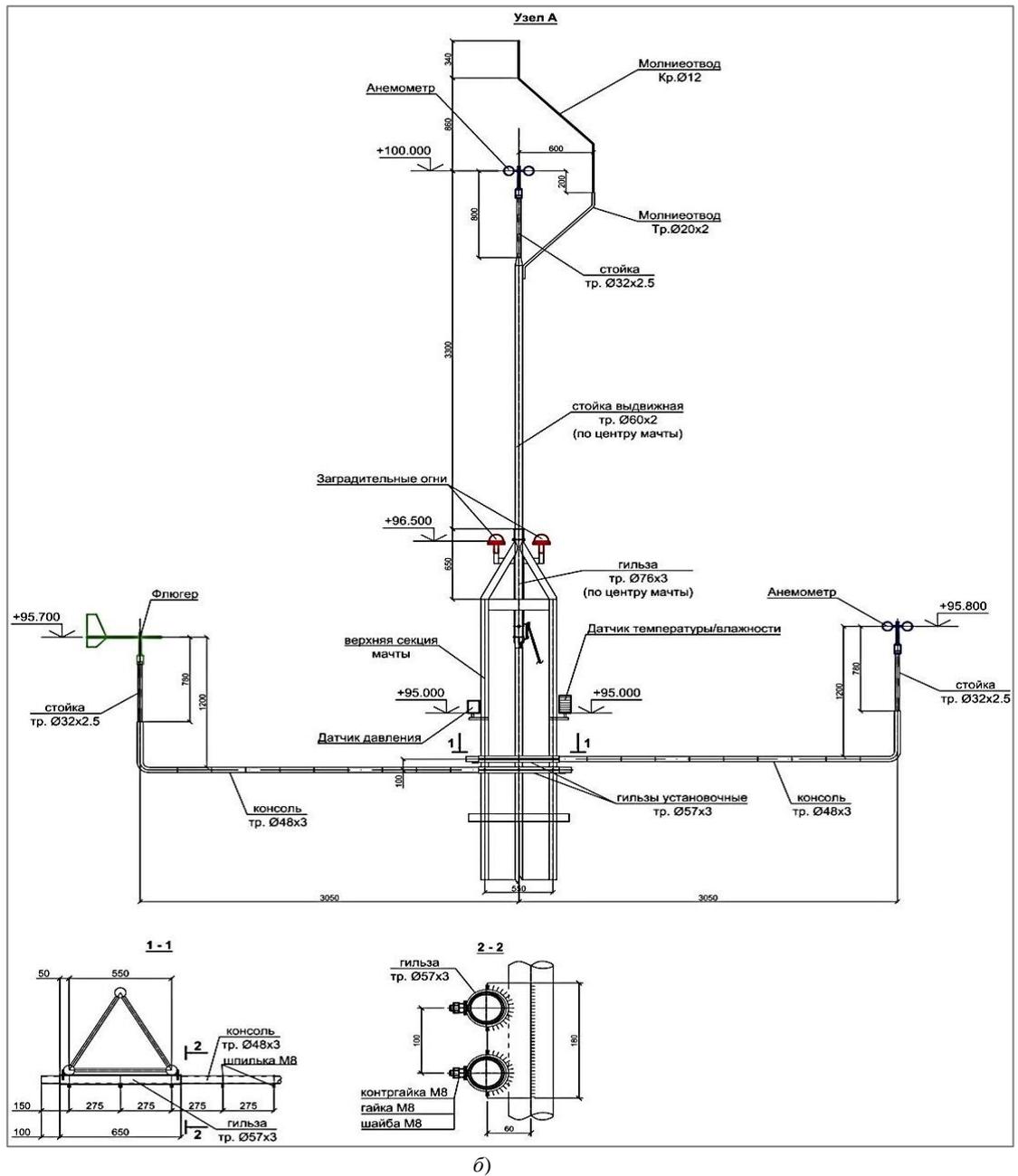


Рис.1. Мачта К-1 – технический чертеж мачты, поставляемой AGIS

Таблица 1

Наименование	Характеристики
Анемометр <i>Thies First Class Advanced</i> (обогреваемый)	<ul style="list-style-type: none"> - соответствие IEC 61400-12-1 (2005-12) MEASNET, CLASSCUP, ISO 17713-1; - класс точности S 0.5 / A 0.9 / B 3.0; - диапазон измерения 0,3 - 75 м/с; - разрешение 0,05 м/с; - условия окружающей среды: от -50°C до +80° С; - степень защиты IP 55 (DIN 40050); - (электромагнитная совместимость) в соответствии с EMC EN 61000-6-2: 2005; - электропитание для обогрева с напряжением 24В AC/DC (гальваническая развязка от корпуса); - полная потребляемая мощность (работа датчика + обогрев) 30 Вт; - калиброванный в соответствии с требованиями MEASNET.

Анемометр <i>Thies First Class Advanced</i> (необогреваемый)	<ul style="list-style-type: none"> - соответствие <i>IEC 61400-12-1 (2005-12), MEASNET, CLASSCUP, ISO 17713-1</i>; - класс точности S 0.5 / A 0.9 / B 3.0; - диапазон измерения 0,3 - 75 м/с; - разрешение 0,05 м/с; - условия окружающей среды: от -50°C до +80°C; - степень защиты <i>IP 55 (DIN 40050)</i>; - (электромагнитная совместимость) в соответствии с <i>EMC EN 61000-6-2: 2005</i>; - потребляемая мощность 5 Вт; - калиброванный в соответствии с требованиями <i>MEASNET</i>.
Флюгер <i>TMR Thies First Class</i>	<ul style="list-style-type: none"> - полностью обогреваемый; - принцип измерения: цифровой <i>TMR</i>; - диапазон измерения 0 - 360°; - точность измерения ± 0,5°; - разрешение 0,35°; - выходной сигнал 10 бит (последовательный, синхронный); - рабочее напряжения обогрева 24 В постоянного / переменного тока; - условия окружающей среды -50 до + 80 °С; - степень защиты <i>IP 55 (DIN 40050)</i>; - электромагнитная совместимость в соответствии <i>EMC EN 61000-6-2: 2001 EN 55022: 2001</i>; - полная потребляемая мощность (работа датчика + обогрев) 30 Вт; - калиброванный в соответствии с требованиями <i>MEASNET</i>.
Датчик температуры + датчик температуры/влажности <i>Galltec Messund Regeltechnik GmbH</i>	<ul style="list-style-type: none"> - наличие защитного корпуса; - диапазон измерений от 0 до 100% и от - 30°C до +70°C; - погрешность измерений ±2,0 %; - рабочее напряжение 9 - 30 В (1 мА/2 мА); - минимальная скорость воздуха (по датчику) 0,5 м/с; - температура окружающей среды от - 40°C до + 80°C; - степень защиты сенсора <i>IP 30</i>; - степень защиты электроники <i>IP 65</i>.
Датчик давления <i>Ammonit</i>	<ul style="list-style-type: none"> - диапазон измерения давления от 80 до 110 кПа; - погрешность измерений 0,5%; - диапазон рабочих температур от - 40°C до + 85°C; - диапазон влажности от 0 до 98% RH; - выходное напряжения 0 – 5В; - напряжение питания 9 – 32В; - корпус из нержавеющей стали; - класс защиты <i>IP 64</i> (при подключенном разъеме).
Регистратор данных <i>AmmonitMeteo-40S</i>	<ul style="list-style-type: none"> - обеспечивает съем данных с метеорологических приборов с минимальным интервалом в 1 сек. и сохранение осредненных за 10-минутный интервал значений метеорологических измерений; - обеспечивается резервным источником питания (бензиновый генератор) с выходной мощностью 1500Вт - обеспечивающий регистрацию данных в течение 2 недель; - минимальный объем памяти регистратора данных составляет 2 года со всех измеренных метеорологических значений; - регистратор оснащается запоминающим устройством с <i>USB</i>-разъемами объемом памяти 16 Гб; - входные каналы: счетчик импульсов 12 шт.; - цифровой последовательный порт (статус) 2 шт.; - передача данных <i>USB</i> (ПК, модем, <i>USB 2.0</i> - накопители, <i>WI-FI</i>) и через сеть <i>Ethernet</i> (модем); - объем данных 2 Гб; - ЖК-дисплей с подсветкой; - данные <i>CSV</i> 50 Мб; - источник питания 9 - 36 В постоянного тока; - защита корпуса <i>IP65</i>; - калиброванный в соответствии с требованиями <i>MEASNET</i>.

Система передачи данных <i>GSM/GPRS</i> (стальной шкаф с модемом, АКБ, контроллером заряда, защитой датчиков от перенапряжения):	- максимальное количество пользователей, получающих сообщение о событиях системы –7; - диапазоны частот 850/900/1800/1900 МГц; - использование: <i>GSM/GPRS</i> -интернет сеть; - автоматическая рассылка ежедневных измеренных данных; - интерфейс модули мини <i>USB 2.0</i> – устройства; - диапазон рабочей температуры от -30°C до +75°C; - напряжение питания 4,75 - 32 В; - ток питания 600 мА при 4,75 В;
Модем <i>UMTS / GPS PHS8-P</i> Стальной шкаф <i>Ammonit</i>	- кабель питания с предохранителем <i>DC-IN</i> /красный, земля /черный, -T2A (T = временная задержка); - <i>SMA</i> интерфейс антенны.

Результаты

На рис. 2 представлена Роза ветров – векторная диаграмма, характеризующая в метеорологии режим ветра в данном месте по многолетним наблюдениям и выглядит как многоугольник, у которого длины лучей, расходящихся от центра диаграммы в разных направлениях, пропорциональны повторяемости ветров этих направлений («откуда» дует ветер). Как видно из рис. 2б, в январе ветер преимущественно преобладал южного, юго-западного и западного направлений, в то время как в июле 2018 г. (рис. 2г) направление ветра наблюдалось во все стороны.

Проанализировав розу ветров за весь период ветромониторинга (с июля 2018 г. по январь 2019 г.) получаем результат: максимальная скорость ветра (больше 9 м/с) преимущественно западного направления.

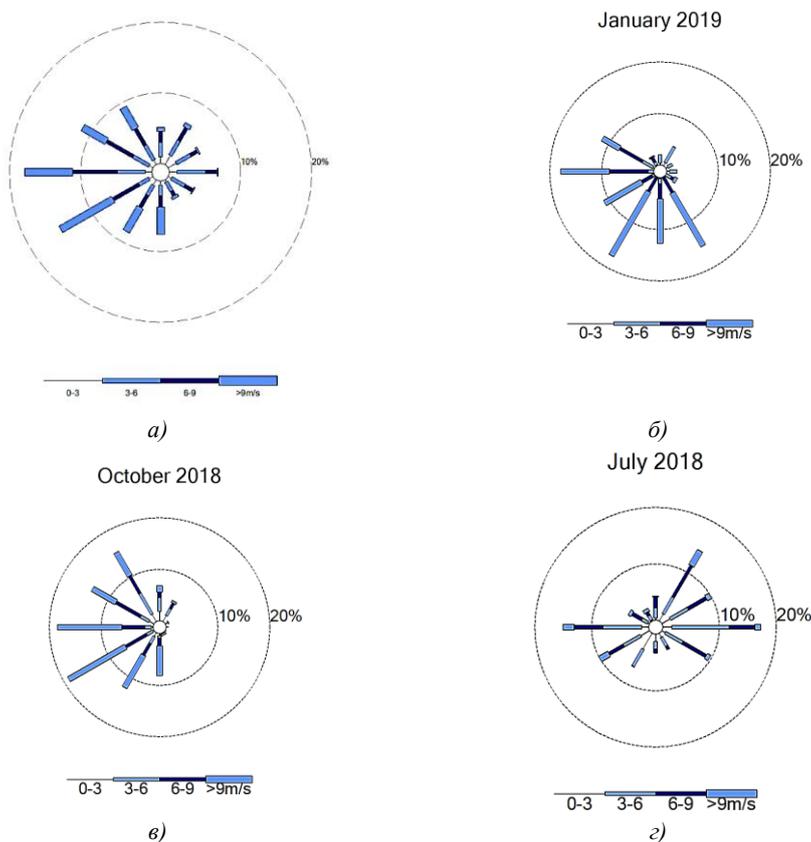


Рис. 2. Роза ветров: а) за весь период мониторинга (июль 2018 г. – январь 2019 г.); б) за январь 2019 г.; в) за октябрь 2018 г.; г) за июль 2018 г

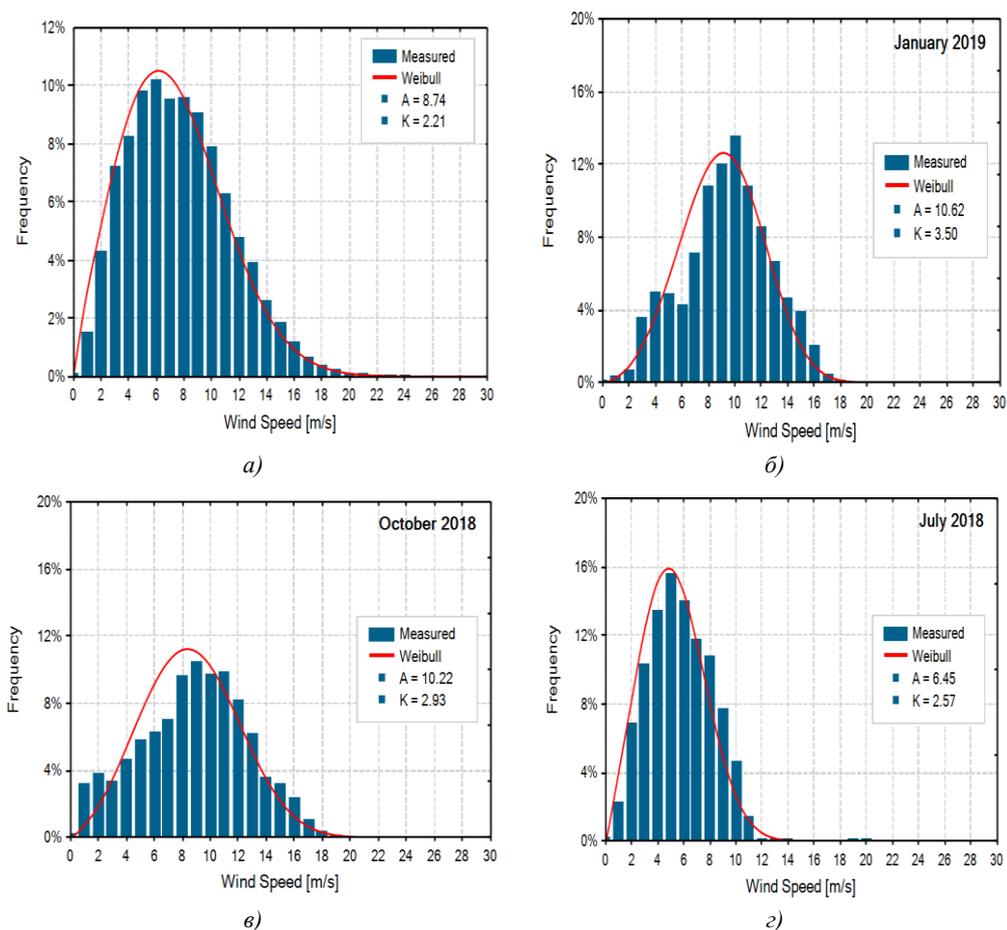


Рис. 3. Частота повторений: а) за весь период мониторинга (июль 2018 г. – январь 2019 г.); б) за январь 2019 г.; в) за октябрь 2018 г.; г) за июль 2018 г.

На рис. 3 представлена частота повторений скорости ветра за весь период мониторинга (рис. 3а) и по месяцам (3 б, в, г). Как видно из рисунка в январе 2019 г. (рис. 3б) преобладал ветер со скоростью 8 м/с и 10 м/с, скорости ветра до 6 м/с практически не было, в то время как ветер со скоростью более 14 м/с преобладал всего 4% времени. Для сравнения в июле 2018 г. (рис. 3г) частота повторений ветра скоростью до 6 м/с составляет около 6 % и максимальная скорость ветра – всего 9 м/с. В июле максимальная скорость ветра была 5 м/с и преобладал 16% времени.

Анализ данных показывает, что максимальная скорость ветра за данный период ветромониторинга составляет 6 м/с и преобладает почти 12 % времени; скорость ветра более 15 м/с не превышает 2% всего времени.

На рис. 4 наблюдается суточный ход изменения ветра на разной высоте. Например, в январе (рис. 4б) в 11 часов дня скорость ветра на высоте 52 м – 8 м/с, а на высоте 94 м – чуть больше 10 м/с. В летнее время (рис. 4г) скорость ветра во второй половине дня не превышает 6,5 м/с, в то время как в утренние часы (6–7 часов) наблюдается очень слабый ветер.

Анализируя графики можно заметить, что скорость ветра в вечернее время усиливается, что коррелируется с потреблением ЭЭ сетями.

Вертикальный профиль ветра – зависимость скорости ветра по высоте в приземном слое, определяемая для конкретной местности на основе измерений скорости ветра на различной высоте относительно земной поверхности приведен на рис. 5.

Как видно из рисунка, разница скорости ветра на высоте 50 м и 98 м составляет чуть больше метра. Соответственно, чем выше будет высота ВЭУ, тем больше будет производительность электроэнергии.

На производительность ВЭУ оказывает большое влияние направление ветра и его скорость. Так как в вечернее время чаще всего ветер усиливается, то соответственно и выработка электроэнергии в вечернее время будет выше. Если ветер меняет направление

резко, то лопасти ветрогенератора не успевают повернуться, что соответственно временно выводит данный ветрогенератор из работы.

Вертикальный профиль ветра – зависимость скорости ветра по высоте в приземном слое, определяемая для конкретной местности на основе измерений скорости ветра на различной высоте относительно земной поверхности приведен на рис. 5.

Как видно из рисунка, разница скорости ветра на высоте 50 м и 98 м составляет чуть больше метра. Соответственно, чем выше будет высота ВЭУ, тем больше будет производительность электроэнергии.

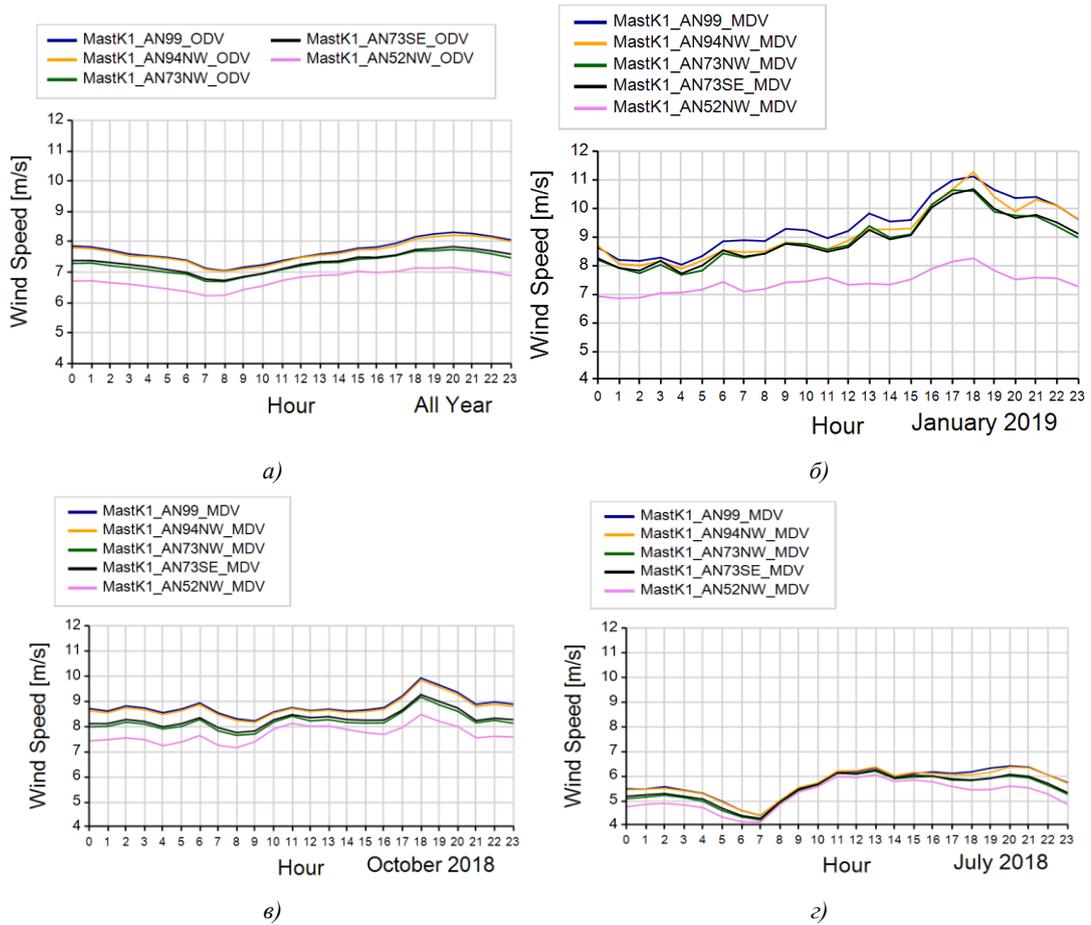


Рис. 4. Суточный ход: а) за весь период мониторинга (июль 2018 г. – январь 2019 г.); б) за январь 2019 г.; в) за октябрь 2018 г.; з) за июль 2018 г

На производительность ВЭУ оказывает большое влияние направление ветра и его скорость. Так как в вечернее время чаще всего ветер усиливается, то соответственно и выработка электроэнергии в вечернее время будет выше. Если ветер меняет направление резко, то лопасти ветрогенератора не успевают повернуться, что соответственно временно выводит данный ветрогенератор из работы.

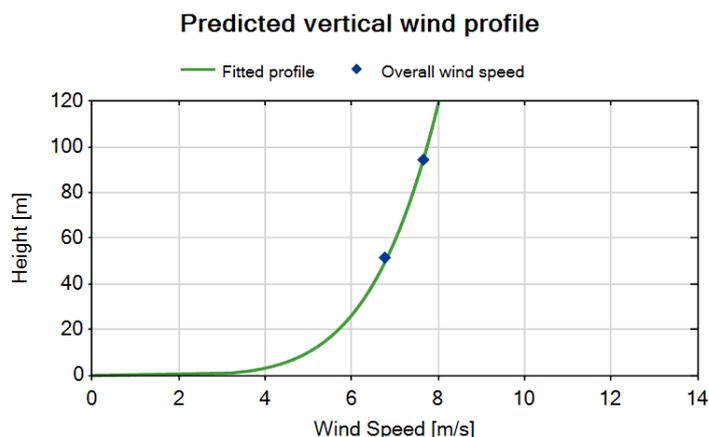


Рис. 5. Прогнозируемый вертикальный профиль ветра

По результатам ветромониторинга проведен расчет мощности P на выходных клеммах асинхронного электрогенератора ветряной установки:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot F \cdot w^3 \cdot K_{И} \cdot K_{Г} \cdot K_{М}, \text{ Вт} \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, равная $1,23 \text{ кг/м}^3$; F – площадь ометания ветроколеса, м^2 ; w – скорость ветра, м/с ; $K_{И}$ – коэффициент использования энергии ветра, равный $0,35 \dots 0,45$; $K_{Г}$ – коэффициент полезного действия электрогенератора, равный $0,9$; $K_{М}$ – коэффициент полезного действия мультипликатора, равный $0,8$.

$$P = 0,5 \cdot 1,23 \cdot w^3$$

$$P = 0,5 \cdot 1,23 \cdot w^3 \cdot 0,35 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 1,55w^3$$

$$P_{(30)} = 334,8 \text{ Вт}; P_{(50)} = 444,5 \text{ Вт}; P_{(70)} = 578,5 \text{ Вт}; P_{(100)} = 735,5 \text{ Вт};$$

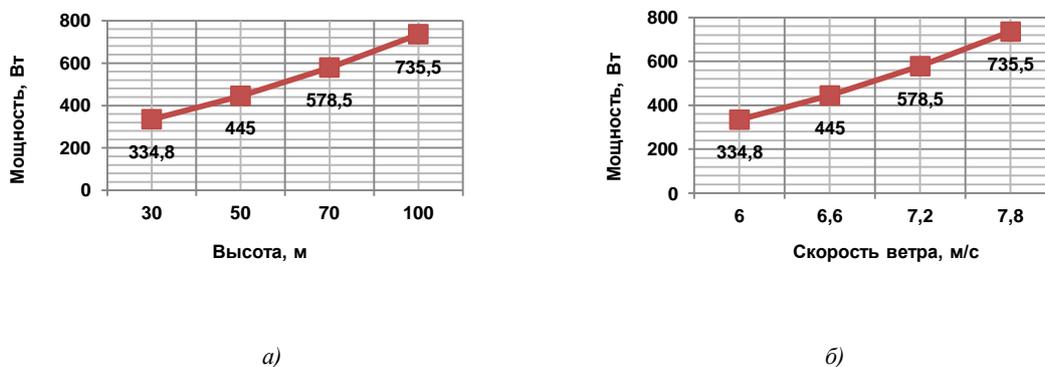


Рис. 6. Графики зависимости мощности от: а) высоты; б) скорости ветра

Выводы

На основании расчета построены графики (рис. 6 а, б) зависимости выработки электроэнергии от высоты и от скорости ветра. Анализ данных графиков показывает, что изменение скорости ветра на 20 % приводит к увеличению выработки электрической мощности почти в два раза, а увеличение высоты с 30 м до 100 м также приводит к увеличению выработки в два раза. Следовательно, увеличение высоты ветроагрегатов позволяет значительно эффективнее использовать ветропотенциал местности и производить значительно большее количество электроэнергии в одной и той же локальной точке.

На основании измерений, полученных в период с июля 2018 г. по январь 2019 г., было установлено, что самой мощной по энергopotенциалу является площадка в Спасском районе РТ вблизи с. Измери, где можно разместить ветропарк большей мощности – до 150 МВт. Чуть меньшей мощности ветропарк можно разместить в Рыбно-Слободском районе (с. Малая Елга), и еще меньшей – Камско-Устьинском районе (с. Красновидово).

Литература

1. Шуйский В.П., Алабян С. С., Комиссаров А.В., и др. Мировые рынки возобновляемых источников энергии и национальные интересы России // Проблемы прогнозирования. 2010. № 3. С. 131-143.
2. Global Wind Energy Council. 2017. Available at: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-windreport-2016/>. Accessed to: 21 Apr 2019.
3. REN21: Renewables Global Status Report 2015. Available at: http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/. Accessed to: 11 March 2019.
4. O'Sullivan J. Two utilities opt out of cape wind., January 2015. Available at: www.bostonglobe.com/metro/2015/01/06/major-setback-for-cape-wind. Accessed to: 06 Apr. 2019.
5. Сидорович В. Мировая энергетическая революция: Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир. М.: Альпина Паблишер. 2015. 208с.
6. Кузнецова Е.В., Пуганова П.А. Экономическая целесообразность использования ветровой энергии // Наука, образование, инновации. 2016. С. 14-16.
7. Impact of Wind Power Generation in Ireland on the Operation of Conventional Plant and the Economic Implications. 2004. Available at: <https://docs.wind-watch.org/EirGrid-WindImpact-Main.pdf>. Accessed to: 18 May 2019.
8. Wind Energy Projects in Cold Climate (Edition 2011). Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research, Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems. 2012. Available at: http://ieawind.org/index_page_postings/June%207%20posts/task%2019%20cold%20climate%20trapproved05.12.pdf. Accessed to: 12 Apr 2019.
9. Verma A.R., Kamani P.L., Kapadia R.R. A review on grid power quality improvement in wind energy system using STATCOM with BESS. Journal Emerg. Technol. Innov. Res. 2 (1) (2015).
10. IRENA. Renewable Capacity Statistics. 2016. Available at: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_RE_Capacity_Statistics_016.pdf. Accessed to: 17 Apr 2019.
11. Валикжанин И.Н. Развитие ветроэнергетики в России. СПб.: Питер. 2018. 187 с.
12. Дайчман Р.А. Использование ветроэнергетических установок в Российской Федерации. АПРОБАЦИЯ. Общество с ограниченной ответственностью «Апробация». Махачкала. 2015. №11. С. 13-15.
13. Возобновляемые источники энергии в России. Итоги 2015 года. Информационно-справочные материалы // Ассоциация «НП Совет Рынка». Доступно по: URL <http://www.np-sp/presscenter/pressinf/index.html>. Ссылка активна на: 11 апреля 2019.
14. Денисов Р.С., Елистратов В.В., Гзенгер Ш. Ветроэнергетика в России: возможности, барьеры, и перспективы развития // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 17-27.
15. Перминов Э. М., Рустамов Н. А. О перспективах возобновляемой энергетики // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 11. С. 19-28.
16. Никитин А.Д. Моделирование переходных процессов при работе автономной ветроустановки с резервным источником энергии. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16. № 1. С. 36-41.
17. Петров А.Е., Мамий С.А. Экономический потенциал возобновляемых источников энергии // Научный журнал КубГАУ – Scientific Journal of KubSAU. 2017. № 127. С. 164-175.
18. Леухина О.В., Насырова Е.В., Филиппова Ф.М., Аверьянова Ю.А. Перспективы развития ветроэнергетики на территории Республики Татарстан. Энергетика и Энергосбережение: Теория и практика. Сборник материалов 4 Всероссийской научно-практической конференции. Издательство: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. 2018. 151.1-151.3 с.

Авторы публикации

Насырова Елена Владимировна – старший преподаватель кафедры «Возобновляемые источники энергии», Казанский государственный энергетический университет.

Тимербаев Наиль Фаритович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Возобновляемые источники энергии», Казанский государственный энергетический университет.

Леухина Ольга Владимировна – старший преподаватель кафедры «Возобновляемые источники энергии», Казанский государственный энергетический университет.

Мазаров Иван Юрьевич – инженер кафедры «Возобновляемые источники энергии», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Shuisky VP, Alabyan SS, Komissarov AV, et al. World markets of renewable energy sources and national interests of Russia. *Problems of forecasting*. 2010;3:131-143.
2. *Global Wind Energy Council*. 2017. Available at: <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-windreport-2016/>. Accessed to: 21 Apr 2019.
3. REN21: *Renewables Global Status Report 2015*. Available at: http://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/. Accessed to: 11 March 2019.
4. O'Sullivan J. *Two utilities opt out of cape wind*. January 2015. Available at: www.bostonglobe.com/metro/2015/01/06/major-setback-for-cape-wind. Accessed to: 04 Jul 2019.
5. Vladimir Sidorovich. *World Energy Revolution: How renewable energy will change our world*. M: Alpina Publisher. 2015. P.208.
6. Kuznetsova EV, Puganova PA. Economic feasibility of using wind energy. *Science, education, innovation*. 2016. pp. 14-16.
7. *Impact of Wind Power Generation in Ireland on the Operation of Conventional Plant and the Economic Implications*. 2004. Available at: <https://docs.wind-watch.org/EirGrid-WindImpact-Main.pdf>. Accessed to: 18 May 2019.
8. Wind Energy Projects in Cold Climate (Edition 2011). *Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Program for Research, Development and Deployment on Wind Energy Conversion Systems*. 2012. Available at: http://ieawind.org/index_page_postings/June%207%20posts/task%2019%20cold_climate%20rp_approved_05.12.pdf. Accessed to: 12 Apr 2019.
9. Verma AR, Kamani PL, Kapadia RR. A review on grid power quality improvement in wind energy system using STATCOM with BESS. *Journal Emergency Technologies Innovation*. Res. 2 (1) (2015).
10. IRENA. *Renewable Capacity Statistics*. 2016. Available at : https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2016.pdf. Accessed to: 17 Apr 2019.
11. Valikzhanin IN. *Development of wind energy in Russia*. SPB : Peter. 2018. P. 187.
12. Daychman RA. Use of wind power plants in the Russian Federation. *APPROBATION. Limited company "Approbation"*. Makhachkala. 2015;1:13-15.
13. *Renewable energy sources in Russia. Results of 2015. Reference materials // Association "NP Market Council"*. Available at: URL [http:// www.np-sp / presscenter / pressinf / index.html](http://www.np-sp / presscenter / pressinf / index.html). Accessed to: 11 Apr 2019.
14. Denisov RS, Elistratov VV, Sh. Gzenger. Wind energy in Russia: opportunities, barriers, and development prospects. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg Polytechnic University. Natural and engineering sciences*. 2017;23(2):17-27. doi: 10.18721 / JEST.230202.
15. Perminov EM, Rustamov NA. On the prospects of renewable energy. *Energy: economics, technology, ecology*. 2016;11:19-28.
16. Nikitin AD. Simulation of transients during the operation of an autonomous wind turbine with a backup energy source. *Bulletin of SUSU. Series "Energy"*. 2016;16(1):36–41. doi: 10.14529 / power160106.
17. Petrov AE, Mamy SA. The economic potential of renewable energy sources. *Scientific journal of KubSAU*. 2017;127:164-175.
18. Leukhina OV, Nasyrova EV, Filippova FM, et al. Prospects for the development of wind energy in the Republic of Tatarstan. Energy and Energy Saving: *Theory and Practice. Collection of materials of the 4 All-Russian scientific-practical conference*. Publishing House: Kuzbass State Technical University named after TF Gorbachev. 2018. pp. 151.1-151.3.

Authors of the publication

Elena V. Nasyrova – Kazan state Energy University, Kazan, Russia. Email: ve.kgeu@gmail.com.

Nail F. Timerbaev – Kazan state Energy University, Kazan, Russia. Email: ve.kgeu@gmail.com.

Olga V. Leukhina – Kazan state Energy University, Kazan, Russia. Email: ve.kgeu@gmail.com.

Ivan Y. Mazarov – Kazan state Energy University, Kazan, Russia. Email: ve.kgeu@gmail.com.



**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ЧАСТИЦ
ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА И ЗОЛЬНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ
ПОЛУКОКСОВАНИЯ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАННОМ РЕАКТОРЕ УТТ**

А.А. Селиванов¹, П.А.Батраков², А.Н. Мракин¹, И.А. Вдовенко¹, О.В. Афанасьева³

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Россия. e-mail: sstuoffice@sstu.ru

² Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия
e-mail: info@omgtu.ru

³ Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
e-mail: eccolga@mail.ru

Резюме: В статье рассматриваются вопросы моделирования процесса теплообмена в барабанном реакторе установки полукоксования горючего сланца с твердым теплоносителем между частицами золы и сланца в условиях постоянного выделения парогазовых продуктов. Выявлена доминирующая роль конвективной составляющей процесса и получены кривые прогрева частиц сланца с учетом эндотермического эффекта.

Установлено, что наиболее мелкая фракция топлива прогревается в течение 30-60 секунд и в дальнейшем служит источником теплоты для остальных фракций. В интервале 400-600 секунд завершается прогрев самой крупной фракции. Дальнейшее пребывание сланцево-золевой смеси в реакторе вызвано отставанием скорости процесса термического разложения от теплообмена, а снижение температуры на 20-25⁰С наличием эндотермического эффекта разложения органического вещества.

Ключевые слова: горючий сланец, полукоксование, теплообмен, твердый теплоноситель, барабанный реактор.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00295 «А».

Для цитирования: Селиванов А.А., Батраков П.А., Мракин А.Н., Вдовенко И.А., Афанасьева О.В. Математическое описание процесса теплообмена частиц горючего сланца и зольным теплоносителем в условиях полукоксования во вращающемся барабанном реакторе УТТ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 51-60. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-51-60.

**THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PROCESS OF HEAT EXCHANGE
PARTICLES OF OIL SHALE AND ASH THE COOLANT IN THE SEMI-COKING
CONDITIONS IN A ROTATING DRUM REACTOR INSTALLATION WITH SOLID
HEAT CARRIER**

AA Selivanov¹, PA Batrakov², AN Markin¹, IA Vdovenko¹,
OV Afanaseva³

¹Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

³Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: The article deals with the modeling of heat transfer process in a drum reactor of a semi-coking unit of oil shale with a solid coolant between ash and shale particles in the conditions of constant separation of vapor-gas products. The dominant role of the convective component of the process is revealed and the curves of heating of shale particles are obtained taking into account the endothermic effect.

It is established that the smallest fraction of fuel warms up within 30-60 seconds and further serves as a source of heat for other fractions. In the interval of 400-600 seconds, the heating of the largest fraction is completed. The further stay of the shale mixture in the reactor is caused by the lagging rate of the thermal decomposition process from heat exchange, and the temperature decrease by 20-25⁰C by the presence of the endothermic effect of the decomposition of organic matter.

Key words: *oil shale, semi-coking, heat exchange, solid coolant, drum reactor.*

For citation: Selivanov AA, Batrakov PA, Markin AN, Vdovenko IA, Afanaseva OV. The mathematical description of process of heat exchange particles of oil shale and ash the coolant in the semi-coking conditions in a rotating drum reactor installation with solid heat carrier. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(6):51-60. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-51-60.

Введение

Проектирование и строительство эффективных теплообменных устройств, работающих с оптимальными показателями, требует продолжительных и дорогостоящих исследований с первичной реализацией процессов на стендовых и полупромышленных аналогах. Важной составляющей является математическое описание, учитывающее основные закономерности теплового взаимодействия фаз.

Термическая переработка полидисперсных сыпучих топлив при постоянном перемешивании с инертным теплоносителем имеет достаточно широкое распространение в химической промышленности и энергетике. В особенности может быть выделена активно развивающаяся отрасль переработки горючего сланца на основе использования установок типа УТТ в Эстонии [1, 2].

При этом многочисленные вопросы остаются при детальном изучении механизма протекания процессов передачи теплоты в условиях взаимодействия сланца и зольного теплоносителя. Экспериментальные и теоретические исследования по протеканию теплообменных процессов при термической переработке мелкодисперсного топлива приведены в [1–5]. Обращает на себя внимание различие в условиях проведения физических экспериментов, конструктивные особенности аппаратов, а также особенности состава органической и минеральной части горючего сланца в зависимости от места добычи. Кроме того имеется ряд результатов, полученный аналитическим способом при принятых допущениях. Использование этих данных для инженерных и практических расчетов требует определенных уточнений и дополнений. Сложность в описании процесса теплового взаимодействия сланца и зольного теплоносителя также вносит полидисперсность и различие составов выделяющихся парогазовых продуктов с течением времени. Очень важна уже имеющаяся информация по взаимодействию топлива с твердым и газовым теплоносителем.

Таким образом, можно полагать об отсутствии на сегодняшний день математической модели процесса теплообмена сланца и зольного теплоносителя в барабанном реакторе УТТ с учетом особенностей состава самого топлива и продуктов термического взаимодействия, неоднородности в гранулометрическом составе и форме частиц, конструктивных особенностей аппарата с учетом вращения и др.

Теоретические основы и результаты

При описании закономерностей теплового взаимодействия частиц сланца и теплоносителя особый интерес представляют работы [1, 2, 6]. Неравномерность прогрева частиц по времени происходит по причине реагирования двух неоднородных компонентов (гранулометрический состав дисперсных материалов). На (рис.1) показана схема взаимодействия частиц с учетом непрерывно выделяющихся продуктов полукоксования.

Исходя из (рис.1) перенос теплоты от частиц зольного теплоносителя (ЗТ) топливным частицам осуществляется через парогазовую прослойку (ПГС) с постоянно изменяющимися свойствами и составом. В свою очередь контактное взаимодействие частиц носит кратковременный характер ввиду вращения барабанного реактора.

Известно, прогрев твердых частиц определяется одновременным действием двух процессов: теплопередача от теплоносителя к поверхности и распространение ее вглубь частиц и зависит от размера, формы частиц, пористости, физических свойств теплоносителя и скорости движения газовой среды [7].

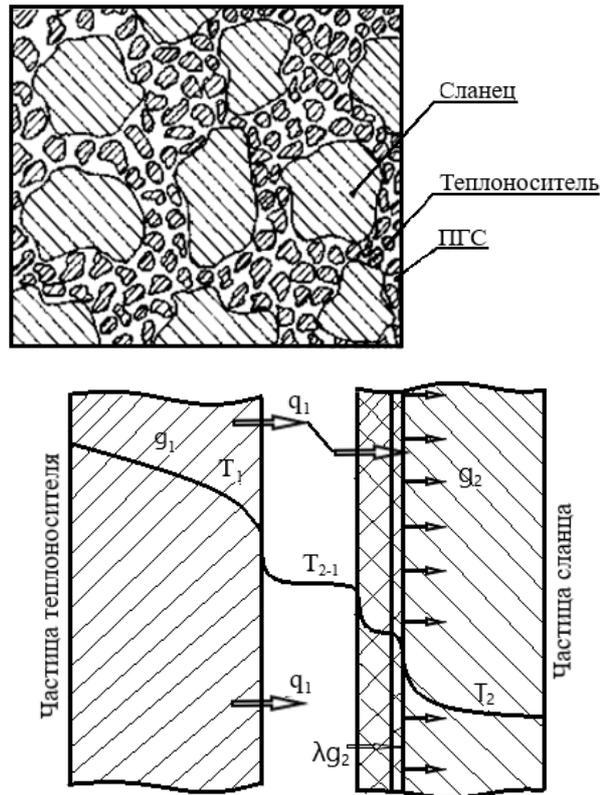


Рис. 1. Схема взаимодействия частиц сланца и золы в барабанном реакторе (БР)

Критерий Био позволит определить наличие внутреннего температурного градиента, который является определяющим для нахождения скорости проникновения теплоты от поверхности к центру частицы(1)

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{2 \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где l – определяющий размер, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); размер

Как известно, сланец имеет плиточную структуру строения, что, в свою очередь, влияет на минимизацию расстояния от поверхности частиц до центра и значительно сокращает время прогрева.

При определении площади поверхности частиц неправильной формы используют эквивалентный диаметр $d_э$, м. Для учета формы частиц используется коэффициент формы Φ , определяющий отклонение формы реальных частиц от шара. В нашем случае важно учитывать тепловоспринимающую поверхность сланцевых и зольных частиц. При соотношениях сторон параллелепипеда x и ax 0,5а фактор формы составит (2)

$$\Phi_i = \sqrt{\frac{S_c}{S_i}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_э^2}{4a^2}} = 0,8727 \frac{d_э}{a}, \quad (2)$$

где S_c/S_i – отношение площадей поверхности сферы к площади поверхности реальной частицы i -той фракции одинакового объема; $d_э$ – эквивалентный диаметр частиц, м²; a – длина ребра частиц правильной формы, м.

В табл. 1, 2 приведены значения $d_э$ и Φ частиц геометрически правильной формы и осредненные значения Φ_i для частиц неправильной формы.

Таблица 1

Значения $d_э$ и Φ_i частиц различных форм

№	Форма частицы	Эквивалентные диаметры		Фактор формы, Φ_i
		$d_{v,i}$	d_{fi}	
1	2	3	4	5
1	 - $(a \times a \times 2a)$	$1,5632 \cdot a$	$1,7841 \cdot a$	0,8762
2	 - $(a \times a \times 0,5a)$	$0,9847 \cdot a$	$1,1284 \cdot a$	0,8727
3	 - a , высотой $h = 0,1a$	$0,5759 \cdot a$	$0,8740 \cdot a$	0,6589
4	Пластина шестиугольная с ребром a , высотой $h = 0,1a$	$0,7917 \cdot a$	$1,3583 \cdot a$	0,5828

Таблица 2

Средние значения фактора формы для топливных частиц

№	Вид топлива	Φ^2	Φ_i
1	сланец - размер фракции ($d = 2,5 \div 11,2$ мм)	0,426	0,653
2	сланец - размер фракции ($d = 5 \div 25$ мм)	$0,46 \div 0,68$	0,755
3	сланец - размер фракции ($d = 34 \div 62,5$ мм)	0,758	0,871
4	каменный уголь ($d = 6 \div 11,25$ мм)	0,536	0,732
5	металлургический кокс ($d = 6 \div 11,25$ мм)	0,403	0,635

В работе Симонова В.Ф. «Определение кинетических констант выделения газовых продуктов при термодеструкции сернистого горючего сланца» были рассмотрены фракционный состав сланца для полукоксования, где 84 % от общей массы частицы имеют размер < 5 мм. Данные фракции сланца как уже было сказано выше имеют плиточную форму: $h = 0,54a$, $L = 1,43a$, $b = a$. При этом важнейшим показателем является минимальное расстояние от центра части к поверхности. $\frac{h_{пл}}{2} = 0,94$ мм. В

ориентировочном интервале значений α ($15 \div 75$ Вт/м²·°C) и известному значению $\lambda_{сл} = 0,266$ Вт/м·°C выполняется соотношение $B_j \leq 0,1 - 0,2$. Данный факт подтверждают авторы [1]. Таким образом, для мелкой и средней фракции сланца, занимаемой подавляющее большинство при переработке в схеме УТТ, можно предполагать отсутствие внутреннего температурного градиента.

Вторым основным процессом является перенос теплоты от поверхности частиц ЗТ через ПГС с постоянно изменяющимся составом к поверхности сланцевых частиц.

Данные о работе пилотных и промышленных реакторов типа УТТ, об особенностях движения сыпучего материала в БР, а также о структурно механических характеристиках Кашпирского сланца и сыпучих продуктах полукоксования приведены в работах [8,9] – табл.3, 4

Таблица 3

Технические характеристики установок УТТ[2]

Установка	Реактор		Частота вращения, об/мин.	Время пребывания		Скорость движения твердого материала, м/с	Производительность по сланцу, т/ч
	Отношение диаметров барабана (внутр./внешн.)	Длина, м		твердого материала, мин.	ПГС, с.		
УТТ-200	1,64/2	4,5	1,83	20,6	18	0,35	6,34
УТТ-500	2,52/3	6,0	1,18	21,4	15	0,57	20,2
УТТ-3000	4,38/5	14,0	0,92	20,7	21,2	1,1	139,0

Таблица 4

Материал	Угол естественного откоса, град.		Плотность, кг/м ³			Пористость, % по объему
	динамический	статический	насыпная	истинная	кажущаяся	
Сланец	45,4	42,1	819	2180	1830	15,3
КЗО (сланцевый полукокс)	42,7	39,5	823	2350	1760	23,7
Зольный теплоноситель	42,2	38,7	788	2480	1690	32,2
Зола уноса	41,8	37,9	762	2410	1650	33,4

На основе характеристик табл. 3, 4, данных о степени заполнения и конструктивных параметрах БР [9], а также результатов исследования процесса выделения ПГС [2] при известных расходных характеристиках по сланцу и золе получим соотношения для расчета объема каждого элементарного участка (рис. 2) – (3) и времени пребывания сланцево-зольной смеси в БР – (4):

$$V_i = \frac{\left(\frac{g_{сл}}{\rho_{сл}} + \frac{g_з}{\rho_з} \right) \cdot \tau_i}{(1 - \varepsilon)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D_6^2}{4} \cdot l, \text{ м}^3 \quad (3)$$

$$\tau = V_6 / \sum_1^n V_i \quad (4)$$

где τ_i – временной интервал расчета, с; V_6 – свободный внутренний объем барабанного реактора, м³; $g_{сл}$, $g_з$ – расход сланца и ЗТ, кг/с; ε – порозность движущегося слоя, согласно; $\rho_{сл}$, $\rho_з$ – кажущаяся плотность сланца и ЗТ, кг/м³; D_6 – внутренний диаметр БР, м; $\sum_1^n V_i$ – объем выделившихся компонентов ПГС, м³/с.

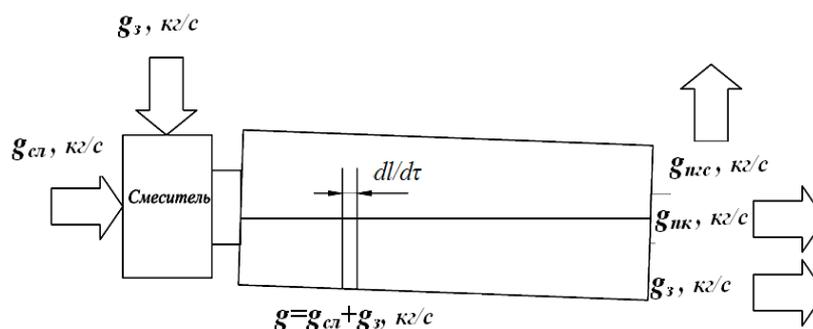


Рис. 2. Распределение материальных потоков в процессе полукоксования в БР

Время пребывания объема V_i в БР зависит от особенностей процесса выделения ПГС в сегменте толщиной l , м. (рис.2).

Лучистый теплообмен в установках подобного типа не превышает 7%, следовательно, влияние его по сравнению с конвективным незначительно [10].

Вторым важным обстоятельством является анализ контактной составляющей теплообмена. Типовые модели теплового взаимодействия твердых мелкодисперсных материалов имеют существенные различия с картиной взаимодействия сланца и теплоносителя в реакторе в условиях выделения ПГС [11]. В частности они предполагают продолжительный тепловой контакт частиц, который отсутствует в барабанном реакторе ввиду постоянного перемешивания и поступательного движения вперед, а также активной фильтрации продуктов полукоксования. Это дает право полагать о подавляющем влиянии конвективного переноса теплоты, а условия теплового взаимодействия могут быть представлены на основе результатов работ [1, 2] (Рис. 1).

Таким образом, при движении смеси частиц сланца и ЗТ будет происходить фильтрация ПГС через разрыхленный слой частиц со значением порозности слоя превышающим рекомендуемые для движущегося плотного слоя. В работе [9] приведены данные по взаимодействию твердого теплоносителя (в форме шаров) и газа пропускаемого через засыпку. Значения критерия Рейнольдса $12 < Re < 2100$. Уравнение, характеризующее значение критерия Нуссельта, имеет вид (5)

$$Nu = 2 + 1,3 \cdot Pr_m^{0,15} + 0,66 \cdot Re_m^{0,15} \cdot Pr_m^{0,31} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (5)$$

Похожие выражения приведены в работах А.П. Баскакова, В.Н. Тимофеева [10]. Скорость фильтрации газа через засыпку будет определяться с учетом постоянно растущего количества продуктов полукоксования.

$$w_{ПГС} = \frac{V_{лет}}{f \cdot \varepsilon}, \quad (6)$$

где $f = D_G \cdot l$ – поверхностная площадь сегмента участка твердой фазы при движении материала в реакторе (рис.2), m^2 ; $V_{лет}$ – суммарный объем ПГС на расчетном участке, m^3/c .

Число Рейнольдса вычисляется по формуле (7)

$$Re = \frac{4 \cdot w_{ПГС}}{f_0 \cdot \nu}, \quad (7)$$

где $f_0 = f(1 - \varepsilon)$ – удельная поверхность частиц в $1 m^3$ слоя, m^2/m^3 ; ν – кинематический коэффициент вязкости ПГС, m^2/c .

Объемный расход ПГС будет складываться из значений удельных объемных расходов газов, выделяющихся на каждом участке за время в соответствии с температурой в заданном промежутке с учетом массового расхода (8), m^3/c :

$$V_{лет} = \sum_1^n g_i^{лет} \cdot v_i^{уд}, \quad (8)$$

где $g_i^{лет}$ – выход ПГС на i -том участке, $кг/c$; $v_i^{уд}$ – удельный объем ПГС на i -м участке (9), $m^3/кг$:

$$v_i^{уд} = \sum_1^n \left(\frac{v_j^{уд}}{M_j} \right) \cdot \left(\frac{T_i}{T_0} \right), \quad (9)$$

где $v_j^{уд}$ – удельный объем j -го компонента, $m^3/кг$.

Тепловой поток как со стороны зольных частиц к ПГС, так и от ПГС к сланцевым частицам будет определяться по классическому уравнению Ньютона-Рихмана (10). Частицы сланца (i -той фракции), в заданный временной интервал $\Delta\tau$, способны воспринимать от парогазовой среды количество теплоты ΔQ_i , $кДж$, определяемое выражением

$$\Delta Q_i = \alpha_i \cdot F_i (t'_{ПГС} - t'_{f,i}) \cdot \Delta\tau \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где, α_i – соответственно коэффициенты теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F_i – тепловоспринимающие поверхности, m^2 ; $t'_{f,i}$ – температуры поверхностей частиц, $^\circ C$, каждой i -й фракции. С учетом данных по фракционному составу и геометрической форме, выражение для определения тепловоспринимающей поверхности примет вид (11)

$$F_i = f_i \cdot m_i = \frac{6}{\rho_i \cdot d_{\ominus,i} \cdot \Phi_i^2} \cdot m_i. \quad (11)$$

Обсуждение

Расчеты по разработанному математическому описанию проводились с учетом результатов [8, 12, 15], где получены данные по константам выделения продуктов полукоксования для различных уровней прогрева материала с соответствующим выходом ПГС.

Для проверки правильности выбранных соотношений для описания особенностей теплового взаимодействия сланца и ЗТ с учетом ПГС необходимо сопоставление результатов численного и физического экспериментов. В качестве исходных данных были приняты результаты [13, 14].

Таблица 5

Сравнение результатов математической модели с экспериментальными результатами [10]

Показатели	№ опыта (численный эксперимент/ физический эксперимент)			
	1	2	3	4
Время пребывания смеси, с	1198/1188	1036/1144	512/799	769/954
Газы дезоксидации (CO ₂ , H ₂ O, H ₂ S), % масс	33,27/32,27	32,93/32,00	31,98/28,7	32,1/40,4
Легкие газы (H ₂ , CO, CH ₄ , C _m H _n), % масс	9,69/8,1	9,65/11,7	9,4/16,9	9,51/35,3
Смола, % масс.	57,03/59,6	57,41/56,3	58,6/54,4	56,3/24,3
Среднеопытная погрешность, %	1,71	1,36	4,99	22,03
Общая погрешность, %	7,52			

Согласно таблице 5, суммарная относительная погрешность по всем опытам находится в пределах 10%, а отдельно по опытам 25%, что подтверждает адекватность выбранных экспериментальных данных и эмпирических соотношений.

Данные рисунка 3 определяют интенсивность прогрева различных фракций сланца и снижение температуры теплоносителя, полученные в результате численного эксперимента на математической модели процесса полукоксования сланца и ЗТ (теплообмен осложненный выделением ПГС) [6,9,12].

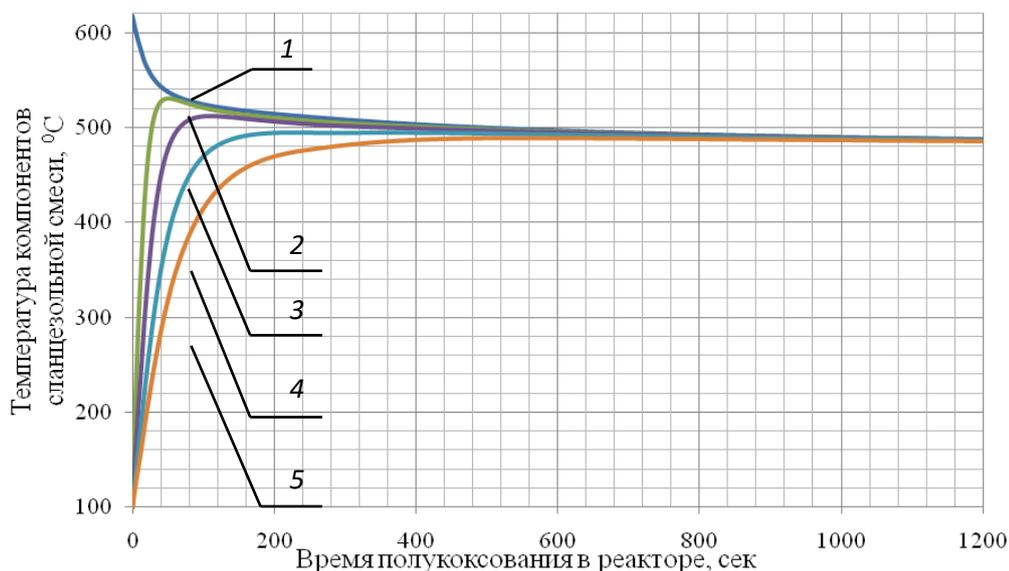


Рис. 3 Кривые прогрева сланца полифракционного состава:

1 – 3Тд=1 мм; 2 – фракция 0-3 мм; 3 – фракция 3-7 мм; 4 – фракция 7-11 мм; 5 – фракция 11-15 мм

Как видно из рис. 3 имеет место перегрев (выше принятой температуры полукоксования 500⁰ С) мелких фракций, которые в процессе движения материала по барабанному реактору играют роль дополнительного источника теплоты для более крупных фракций. В интервале 400-600 секунд завершается прогрев самой крупной фракции. Кроме того впоследствии происходит понижение температуры сланцевозольной смеси за счет учтенного в модели эндотермического эффекта разложения органической массы сланца с соответствующими кинетическими константами реакций [8].

Выводы:

1. Показано практическое отсутствие внутреннего температурного градиента у большинства частиц сланца при прогреве.
2. Выявлена доминирующая роль конвективного переноса теплоты от ЗТ к частицам сланца через ПГС с изменяющимся составом и свойствами.
3. В результате проведения численных экспериментов получены данные прогрева горючего сланца полифракционного состава. Показано, что наиболее мелкая фракция топлива прогревается в течение 30-60 секунд и в дальнейшем служит источником теплоты для остальных фракций.
4. Показано влияние эндотермического эффекта разложения органического вещества ГС, что приводит к снижению температуры потока на 20-25 °С.

Литература

- 1.Блохин, А.И., Зарецкий М.И, Стельмах Г.П., и др. Энерготехнологическая переработка топлив твердым теплоносителем. М.: Светлый стан, 2005. 336 с.
- 2.Волков Э.П. Энерготехнологическое использование сланца. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 480 с.
- 3.Иорудас, К.А., Стельмах Г.П. Тепло и массообмен в реакторе установок с твердым теплоносителем: Тезисы доклада 2 Всесоюзной научно-технической конференции. "Гидроупругость и долговечность конструкций энергетического оборудования" // Изд. Лит. ССР. Июль 1990. С. 213-214.
- 4.Хасхачих В.В. Экспериментальное исследование тепло-массообменных процессов переработки горючего сланца в установке с твердым теплоносителем (УТТ) // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии 18 Бенардосовские чтения: материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 220-223.
- 5.Печенегов, Ю.Я., Мракин А.Н. Влияние стефановского потока на теплообмен в системе "газ-твердая частица" при термохимической конверсии твердого топлива // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1152-1154.
- 6.Al-Ayed, OS. Distillation curves under the influence of temperature and particle size of Ellajjun oil shale // International Green Energy Conference. Canada: N. p., 2005. pp. 1-4.
- 7.AdnanAl-Harahsheha, Omar Al-Ayed, Moh'dAl-Harahsheh, Rajab Abu-El-Halawah. Heating rate effect on fractional yield and composition of oil retorted from El-lajjun oil shale // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, V.89. Issue 2. November 2010. pp. 239-243.
- 8.Симонов В.Ф., Селиванов А.А., Мракин А.Н., и др. Определение кинетических констант выделения газовых продуктов при термодеструкции сернистого горючего сланца // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. №1 (81). С. 219-224.
- 9.Selivanov A.A., Batrakov P.A., Mrakin A.N., et al. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme // Procedia Engineering. 2016. 152. pp. 134-139.
- 10.A.P.Baskakov, B.Leckner. Radiative heat transfer in circulating fluidized bed furnaces / Powder Technology. 1997. V. 90. Issue 3. pp 213-218
- 11.A. I. Nafsun, F. Herz, E. Specht, H. et al. Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters // Chemical Engineering Science. 2017. V.16. pp. 346-353.
- 12.Simonov V.F., Mrakin A.N., Selivanov A.A., et al., Development of an algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V. 52. pp. 675-681.
- 13.Казаков, Е.И., Мамай В.И., Мишанин В.А., и др. Определение основных технологических параметров термической переработки сланца Перелюб-Благодатовского месторождения на стендовой установке с твердым теплоносителем (УТТ) // Межвузовский научный сборник СПИ – Саратов: СПИ, 1982. С. 101-105.
- 14.Volkov E., Stelmakh G. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the "Galoter" process in 1944–1999 // Oil Shale. 1999. V.16. N.2. pp. 161-185.
- 15.Симонов В.Ф. О влиянии скорости нагрева горючих сланцев на динамику выделения летучих продуктов и их качественный состав // Вестник СГТУ. 2011. Т. 4. № 1 (59). С. 181-185.

Авторы публикации

Селиванов Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Батраков Пётр Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Омский государственный технический университет.

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМС, Казанский государственный энергетический университет.

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Вдовенко Иван Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

References

1. Blokhin, AI, Zaretsky MI, Stelmach GP, et al. *Energy technology processing of fuels with solid heat carrier*. М.: Svetly Stan, 2005. 336 p.
2. Volkov EP. *Energy technology use of slate*. М : Publishing House MEI, 2015. 480 p.
3. Iorudas KA, Stelmakh GP. *Heat and mass transfer in the reactor of plants with solid coolant: Abstracts of the 2 scientific and technical conf. "Hydroelasticity and durability of power equipment designs"*. Ed. Lit. SSR. July 1990. pp. 213-214.
4. Khaskhikhikh VV. An experimental study of heat and mass transfer processes for processing oil shale in a plant with a solid coolant (UTT). *In the collection: Current State and Prospects for the Development of Electrical and Thermotechnology 18 Benardos Readings: Materials of the International Scientific and Technical Conference*. 2015. pp. 220-223.
5. Pechenegov YuYa, Mrakin AN. The effect of the Stefan stream on heat transfer in the gas-solid particle system during thermochemical conversion of solid fuel. *Engineering Physics Journal*. 2017;90(5): 1152-1154.
6. Al-Ayed. Distillation curves under the influence of temperature and particle size of Ellajjun oil shale. *International Green Energy Conference*. Canada: 2005. pp. 1-4.
7. Adnan Al-Harashsheha, Omar Al-Ayed, Moh'd Al-Harashsheh, Rajab Abu-El-Halawah. Heating rate effect on fractional yield and composition of oil retorted from El-lajjun oil shale. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2010. V.89. Issue 2. pp.239-243.
8. Simonov VF, Selivanov AA, Mrakin AN, et al. Determination of the kinetic constants for the evolution of gaseous products during thermal decomposition of sour fuel. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2015;4(1):(81):219-224.
9. Selivanov AA, Batrakov PA, Mrakin AN. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme. *Procedia Engineering*. 2016;152:134-139.
10. Baskakov AP, Leckner B. Radiative heat transfer in circulating fluidized bed furnaces. *Powder Technology*. 1997;90(3):213-218.
11. Nafsun A, Herz F, Specht E, et al. Thermal bed mixing in rotary drums for different operational parameters. *Chemical Engineering Science*. 2017;160 (16) :346-353.
12. Simonov VF, Mrakin AN, Selivanov AA, et al. Development of an algorithm for calculating the parameters of a drum reactor for low-temperature carbonization of oil shale with ash-based heat-transfer agent. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017;52:675-681.
13. Kazako EI, Mamai VI, mishanin VA, et al. *Determination of main technological parameters of thermal processing of oil shale Perelyub-Blagodatovka field for bench set with solid heat carrier (UTT) interuniversity scientific collection of SLEEP – Saratov: SPI, 1982. pp. 101-105.*
14. Volkov E, Stelmakh G. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the "Galoter" process in 1944-1999. *Oil Shale*. 1999;16(2):161-185. 4. A.
15. Simonov VF, Morev AA. About the influence of the heating rate of oil shale on the dynamics of the evolution of volatile products and their qualitative composition. *Bulletin of SSTU*. 2011;4(1): (59):181-185.

Authors of the publication

Alexey A. Selivanov – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

Petr A. Batrakov – Omsk State Technical University, Omsk, Russia.

Olga V. Afanaseva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton N. Mrakin – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

Ivan A. Vdovenko – Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia.

Поступила в редакцию

15 июля 2019г.



ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОВЫХ РАСШИРЕНИЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН К ВНЕШНЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

А.Ю. Сосновский¹, Б.Е. Мурманский², Ю.М. Бродов³

¹ГК «Теплоэнергосервис» г. Екатеринбург, Россия

²Свердловский филиал ПАО «Т Плюс» г. Екатеринбург, Россия

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина г. Екатеринбург, Россия

Резюме: Выполнен анализ различных (традиционных и альтернативных) конструкций сочленения выносных корпусов подшипников и цилиндров паровых турбин средней и большой мощности. С учётом выявленных подобий взаимодействия элементов рассмотренных конструкций предложена обобщенная кинематическая модель системы тепловых расширений паровой турбины. В предложенной модели система тепловых расширений представлена в виде многозвенной шарнирной системы, состоящей из одного или нескольких «базовых» модулей. На основе разработанной модели исследованы условия устойчивости (отсутствия самоторможения на направляющих продольных шпонках) системы тепловых расширений паровой турбины к внешним воздействиям. По результатам моделирования показано, что величина изменения угла поворота цилиндра турбины относительно корпуса подшипника в узле сочленения должна быть ограничена. Установлено, что для устойчивости системы с одним выносным корпусом подшипника достаточно, чтобы предельный угол поворота в узле сочленения цилиндра турбины и корпуса подшипника не превышал предельного угла поворота корпуса подшипника относительно продольных шпонок. Для устойчивости системы с несколькими последовательно перемежающимися выносными корпусами подшипников (многоцилиндровой турбины) необходимо, чтобы предельный угол поворота во всех узлах сочленения цилиндров турбины с корпусами подшипников не превышал величины наименьшего предельного угла поворота из всех корпусов подшипников. Результаты выполненного исследования могут быть использованы при проектировании новых паровых турбин и при реконструкции систем тепловых расширений оборудования, находящегося в эксплуатации.

Ключевые слова: турбоагрегат, тепловые расширения, корпус подшипника, продольная шпонка, поперечная шпонка.

Для цитирования: Сосновский А.Ю., Мурманский Б.Е., Бродов Ю.М. Исследование универсальных условий устойчивости систем тепловых расширений паровых турбин к внешнему воздействию // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 61-71. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-61-71.

INVESTIGATION OF UNIVERSAL CONDITIONS OF STABILITY OF THERMAL EXPANSION SYSTEM OF STEAM TURBINES TO EXTERNAL ACTIONS

AYu Sosnovskiy¹, BE Murmanskii², YuM Brodov³

¹Teploenergoserwis Management Company, Ekaterinburg, Russia

²T-plus group, Ekaterinburg, Russia

³Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The analysis of various designs (both traditional and alternative) for outboard bearing housing joints with cylinders of steam turbines of medium and high power. Taking into account the identified similarities in the interaction of elements of the considered structures, a generalized kinematic model of the thermal expansion system of a steam turbine is presented. In the assumed model, the thermal expansion system is presented in the form of a multi-link hinged system

consisting of one or more “basic” modules. Based on the developed model, the stability conditions (the absence of self-braking on the guiding longitudinal keys) against external influences are studied for the thermal expansion system of a steam turbine. According to the simulation results, it is shown that the magnitude of the turbine cylinder rotation angle change relative to the bearing housing in the junction must be limited. It was revealed that for stability of a system with one outboard bearing housing, it is sufficient that the maximum rotation angle at the junction of the turbine cylinder and the bearing housing does not exceed the maximum rotation angle of the bearing housing relative to the longitudinal keys. For stability of a system with several sequentially moving outboard bearing housings (multi-cylinder turbine), it is necessary that the limiting angle of rotation at all junctions of the turbine cylinders with bearing housings does not exceed the value of the smallest limiting angle of rotation for all bearing housings. The results of the study can be applied in the design of new steam turbines and in the reconstruction of thermal expansion systems for equipment in operation.

Keywords: turbine unit, heat expansion, bearing case, longitudinal spline, transversal spline.

For citation: Sosnovskiy AYu, Murmanskii BE, Brodov YuM. Investigation of universal conditions of stability of thermal expansion system of steam turbines to external actions. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):61-71. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-61-71.

Введение

Система тепловых расширений (СТР) паровой турбины, как показывает опыт эксплуатации паротурбинных установок [1, 2], является одним из критических узлов многоцилиндровых паровых турбин. Нарушения в работе СТР приводят к возникновению дефектов проточной части и подшипников турбин, проявляются в повышенных значениях относительных расширений роторов, повышенной вибрации подшипников и др. [3]. Исследования, выполненные рядом организаций на турбинах различных производителей [4-7], позволили разработать объем типовых и сверхтиповых работ, выполняемых во время ремонта турбин для обеспечения нормальной работы СТР [8, 9]. Однако, не все случаи нарушений в работе СТР могут быть объяснены известными причинами. Целесообразно рассмотрение работы СТР на моделях, а такие работы в последние десятилетия не выполнялись.

На большинстве турбин средней и большой мощности (от 25 МВт и выше) произведённых в СССР, и позднее в РФ, используется СТР с традиционным устройством сочленения цилиндра турбины с выносным корпусом подшипника [1, 10]. В таком устройстве осевое усилие от цилиндров турбины при изменении их температурного состояния передается на выносные корпуса подшипников через т.н. «поперечные шпонки» в опорных лапах цилиндра. Совпадение осей цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников обеспечивается т.н. «вертикальными шпонками». Их конструкция обеспечивает свободное взаимное перемещение в вертикальной плоскости «зуба», закреплённого на цилиндре турбины, относительно ответной части, закреплённой на выносном корпусе подшипника практически на уровне поверхности скольжения корпуса подшипника по фундаментной раме. От боковых смещений корпус подшипника удерживается направляющими «продольными шпонками». На рис.1 представлены схемы организации СТР с традиционными устройствами сочленения для одноцилиндровых (рис 1, а), двухцилиндровых (рис. 1, б) и трёхцилиндровых (рис 1, в) паровых турбин.

Основным недостатком традиционного устройства сочленения цилиндра турбины и корпуса подшипника считается передача осевого усилия через лапы, являющимися, по сути, продолжением фланцев горизонтального разъёма цилиндров турбины и, соответственно, разнесёнными от оси турбины. Неодинаковое тепловое расширение лап в продольном направлении (температурный перекосяк) приводит к тому, что выносной корпус подшипников поворачивается относительно «продольных шпонок». Так, например, исследования выполненные специалистами ЦКТИ показали, что у турбины К-800-240 ЛМЗ корпус среднего подшипника (между ЦВД и ЦСД) поворачивается на предельный угол, обусловленный зазором на продольных шпонках, уже при разности температуры левого и правого фланцев ЦСД в 6 – 12 градусов, из-за неодинаковости тепловых расширений лап ЦСД в продольном направлении [11]. Дальнейшее увеличение разности температур, по мнению специалистов ЦКТИ, приводит к появлению дополнительных нерасчётных усилий

сопротивления перемещению корпуса подшипника по фундаментной раме и может привести к заклиниванию корпуса подшипников на «продольных шпонках».

Для исключения влияния температурного перекоса на работу СТР предложены и реализованы другие конструкции устройств сочленения выносных корпусов подшипников с цилиндрами турбины, в которых осевое усилие от цилиндров турбины на выносные корпуса подшипников передается по оси турбины, исключая влияние температурного перекоса по фланцам цилиндров турбины на работу СТР [12-15].

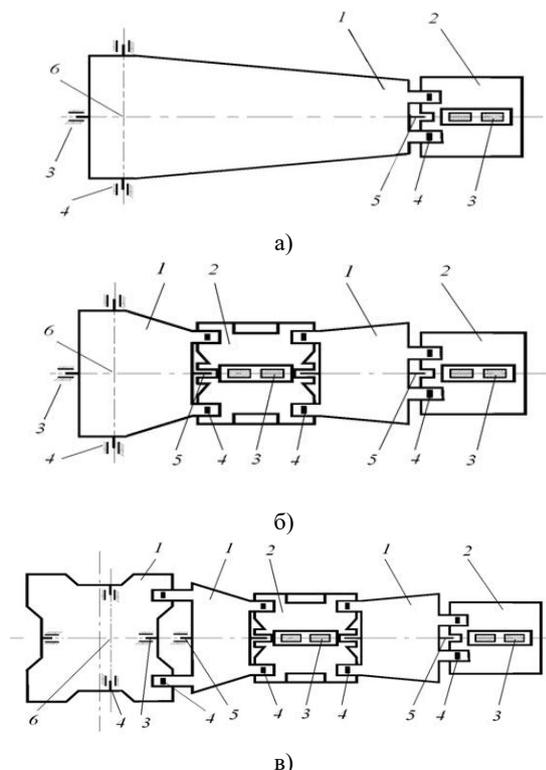


Рис. 1 Схемы СТР с традиционными устройствами сочленения

а) одноцилиндровая турбина; б) двухцилиндровая турбина; в) трёхцилиндровая турбина.

1 – цилиндр турбины; 2 – выносной корпус подшипника; 3 – продольные шпонки; 4 – поперечные шпонки; 5 – вертикальная шпонка; 6 – фикс-пункт турбины.

Опыт исследования СТР паровых турбин различных типов показывает, что существенное влияние на работу традиционных схем организации СТР и, как следствие, на вибрационное состояние турбины оказывает и температурное состояние (перемещение) присоединенных к цилиндрам турбины трубопроводов [16-19]. Под действием внешних усилий от присоединённых трубопроводов цилиндры турбины и выносные корпуса подшипников в пределах зазоров в направляющих или сцепных устройствах могут смещаться и поворачиваться относительно друг друга и относительно оси турбины. Поворот выносных корпусов подшипников относительно «продольных шпонок» под действием внешних усилий также, как и температурный перекос, приводит к возникновению дополнительных нерасчётных усилий сопротивлению перемещению корпуса подшипника по фундаментной раме.

В работе [20], показано, что устойчивость системы тепловых расширений паровой турбины к внешнему воздействию в значительной степени зависит от соотношения величин зазоров в «шпоночных» соединениях сочленения цилиндра турбины и выносных корпусов подшипников.

Анализ конструкций ранее упомянутых устройств сочленения цилиндров турбины с выносными корпусами подшипников (с исключением лап цилиндров турбины из схемы передачи осевых усилий) показал, что они также как и традиционная схема СТР допускают принципиальную возможность углового смещения цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников относительно друг друга и относительно оси турбины. Соответственно, все используемые в настоящее время в СТР устройства сочленения цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников в той или иной степени могут быть подвержены влиянию внешних усилий от присоединённых к турбине трубопроводов.

Целью данной работы является определение универсальных условий устойчивости функционирования СТР с разным количеством цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников к воздействию внешних факторов для всех ранее упомянутых конструкций сочленения цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников. Анализ проводился на основе разработанной авторами кинематической модели.

Материалы и методы. Обобщённая кинематическая модель СТР паровой турбины

На основе сравнительного анализа схем организации СТР паровых турбин различных типоразмеров с разным количеством цилиндров и возможными конструкциями устройств сочленения цилиндров турбины с выносными корпусами подшипников разработана модель, в которой СТР представлена в виде многосвязной шарнирной системы состоящей из одного или нескольких «базовых» модулей. Количество «базовых» модулей в схеме СТР равно количеству выносных корпусов подшипников, свободно перемещающихся вдоль оси турбины.

«Базовый» модуль состоит из трёх звеньев: «продольных шпонок», выносного корпуса подшипника и цилиндра турбины. Кинематическая схема «базового» модуля представлена на рис.2 (а). Между собой звенья 1 и 2 связаны призматическим шарниром, который соответствует сочленению «продольные шпонки – паз корпуса подшипника». Звено 3 соответствует цилиндру турбины. Звенья 2 и 3 связаны осевым шарниром A_i , который соответствует устройству сочленения цилиндра турбины и корпуса подшипника. Так же осевыми шарнирами звенья 2 и 3 связаны с предыдущим (B_i) и последующим (B_{i+1}) «базовыми» модулями. В модели принята правосторонняя система координат, в которой ось X направлена от фиксипункта турбины в сторону паровпуска (от генератора в сторону регулятора).

Изменение взаимного положения элементов «базового» модуля под действием внешних сил и моментов, приложенных к звену 3, представлено на рис. 2(б).

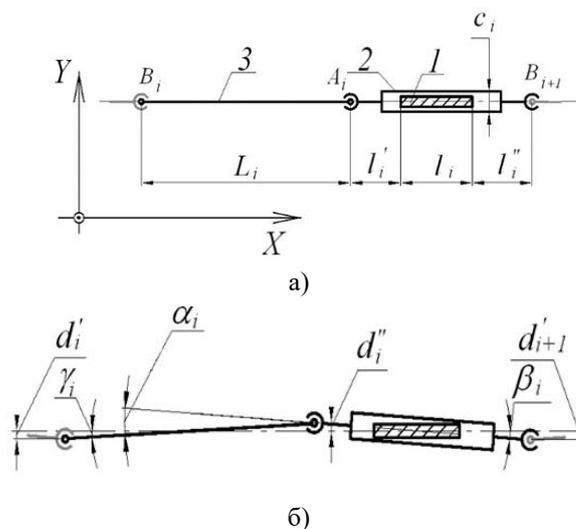


Рис. 2 «Базовый» модуль СТР

а) кинематическая схема «базового» модуля СТР;

б) изменение взаимного положения элементов «базового» модуля при внешнем воздействии;

l – «продольные шпонки»; 2 – выносной корпус подшипника; 3 – цилиндр турбины.

Звено 1 («продольные шпонки») неподвижное, жестко закреплено на фундаменте турбоагрегата. Звено 2 соответствует выносному корпусу подшипника.

На рис. 2 (а) и (б) приняты следующие обозначения:

L_i – расстояние между шарнирными узлами i -го цилиндра турбины;

l_i – расстояние между внешними торцами направляющих i -го выносного корпуса подшипников;

l_i' – расстояние между внешним торцом направляющих i -го выносного корпуса подшипников со стороны фиксипункта и ближайшим шарнирным узлом цилиндра;

l_i'' – расстояние между дальним от фиксипункта внешним торцом направляющих i -го выносного корпуса подшипников и ближайшим шарнирным узлом $(i+1)$ -го цилиндра турбины;

c_i – зазор в i -ом призматическом шарнире между направляющими «продольными шпонками» и корпусом подшипников;

d_i' – сдвиг ближайшего к фиксипункту шарнирного узла от оси турбины в поперечном направлении;

d_i'' – сдвиг шарнирного узла между цилиндром и корпусом подшипников от оси турбины в поперечном направлении;

d_{i+1}' – сдвиг шарнирного узла между корпусом подшипников и следующим цилиндром от оси турбины в поперечном направлении;

α_i – угловое смещение оси корпуса подшипника от оси цилиндра турбины;

β_i – угловое смещение оси корпуса подшипника относительно оси турбины;

γ_i – угловое смещение оси цилиндра относительно оси турбины;

i – номер «базового» модуля, нумерация ведется со стороны фиксипункта турбины;

M – суммарный момент, приложенный к цилиндру турбины;

P – суммарное сдвиговое усилие, приложенное к цилиндру турбины.

При разработке модели приняты следующие допущения и упрощения:

– изменением линейных размеров звеньев 2 и 3, связанных с изменением их температурного состояния, а также изменением проекций этих звеньев на ось X, связанных с их поворотом относительно оси турбины, пренебрегаем;

– шарнирный узел B_i не перемещается вдоль оси X;

– шарнирные узлы A_i , B_i и B_{i+1} , при воздействии на звенья модуля внешних усилий и моментов, могут занимать только крайние положения, допускаемые конструкцией сочленения.

Воздействие на цилиндр турбины (звено 3) произвольных сдвигового усилия и момента приведёт к его сдвигу и повороту относительно оси турбины. Через шарнирный узел A_i цилиндр турбины поворачивает корпус подшипника (звено 2) относительно оси турбины. При этом величина углового смещения корпуса подшипника относительно цилиндра турбины составит:

$$\alpha_i = \beta_i - \gamma_i \quad (1)$$

Величина углового смещения оси корпуса подшипника относительно оси турбины β_i возникающего под действием приложенных к корпусу подшипника усилий со стороны цилиндра турбины, определяется из выражения:

$$\beta_i = \frac{d_{i+1}' - d_i''}{(l_i' + l_i + l_i'')}$$

или, с учётом принятых допущений, можно записать

$$\beta_i = \frac{0 - d_i''}{\left(l_i' + \frac{l_i}{2}\right)} \quad (2)$$

Величина углового смещения цилиндра турбины относительно оси турбины, под действием приложенных к нему внешних усилий и моментов, γ_i определяется из выражения:

$$\gamma_i = \frac{d_i'' - d_i'}{L_i} \quad (3)$$

Как было показано в [20], самым неблагоприятным для работы СТР является такое положение корпуса подшипников относительно продольных шпонок, когда возникает одновременный контакт продольных шпонок с обеими сторонами паза в подошве корпуса подшипника («диагональный» контакт). При «диагональном» контакте появляется вероятность возникновения эффекта самоторможения корпуса подшипника на продольных шпонках.

Для призматического шарнира абсолютная величина угла предельного поворота $\beta_i^{\text{пред}}$, при котором возникает «диагональный» контакт и появляется эффект самоторможения, обусловлена геометрическими характеристиками призматического шарнира и определяется из выражения

$$|\beta_i^{\text{пред}}| = \frac{c_i}{l_i} \quad (4)$$

Отсюда, с учётом принятых допущений, однозначно определяется и абсолютная величина предельного поперечного смещения шарнирного узла A_i

$$|d_i^*| = c_i \left(l_i + \frac{l_i}{2} \right) \quad (5)$$

Величина углового смещения α_i в этом случае зависит от величины углового смещения γ_i , которое, в свою очередь, зависит только от поперечного смещения шарнирного узла B_i .

Поскольку величины угловых и поперечных смещений невелики, то выражение (1) целесообразно записать в безразмерном виде

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = 1 - \frac{\gamma_i}{\beta_i}$$

Тогда, с учётом выражений (2) и (3) получаем

$$\frac{\alpha_i}{\beta_i} = 1 + \left(1 - \frac{d_i^*}{d_i^*} \right) \times \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right) \times K_i^{II}, \quad (6)$$

где K_i^I и K_i^{II} – безразмерные коэффициенты, зависящие от геометрических размеров «базового» звена (цилиндра и корпуса подшипников турбины).

Безразмерные коэффициенты K_i^I и K_i^{II} определяются по формулам:

$$K_i^I = \frac{l_i}{l_i}, \quad (7)$$

$$K_i^{II} = \frac{l_i}{L_i},$$

Анализ предложенной модели показывает, что при отсутствии ограничений по величине угла α_i при воздействии на звено 3 (цилиндр турбины) внешних усилий и моментов в призматическом шарнире возникает «диагональный» контакт. Для того, чтобы при воздействии на цилиндр турбины внешних усилий и моментов не мог возникнуть «диагональный» контакт, величина изменения угла поворота цилиндра турбины относительно корпуса подшипника в узле сочленения должна быть ограничена. Необходимо, чтобы выполнялось неравенство

$$\alpha_i^{\text{пред}} < \beta_i^{\text{пред}} - \gamma_i, \quad (8)$$

где $\alpha_i^{\text{пред}}$ – величина предельного углового смещения корпуса подшипника относительно цилиндра турбины, которая задается конструкцией шарнирного соединения;

$\beta_i^{\text{пред}}$ – величина предельного углового смещения корпуса подшипника относительно «продольных» шпонок, обусловленная геометрическими размерами призматического шарнира.

С учетом выражения (6) неравенство (8) можно записать

$$\frac{\alpha_i^{\text{пред}}}{\beta_i^{\text{пред}}} < 1 + \left(1 - \frac{d_i^*}{d_i^*} \right) \times \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right) \times K_i^{II}. \quad (9)$$

Таким образом, при всех сочетаниях $\frac{\alpha_i^{\text{пред}}}{\beta_i^{\text{пред}}}$ и $\frac{d_i^*}{d_i^*}$ лежащих в области ниже линии

описываемой выражением (6) появление «диагонального» контакта в призматическом шарнире исключено и наоборот, при всех сочетаниях находящихся выше этой линии, возникает «диагональный» контакт и будет наблюдаться эффект самоторможения при движении корпуса подшипника (звено 2) относительно фундаментной рамы (звено 1). Соответственно, прямую описываемую выражением (6) авторы предлагают назвать

границей самоторможения. На рис. 3 представлены примеры диаграмм самоторможения, построенные для различных значений коэффициентов K_i^I и K_i^{II} .

Из выражения (6) и графика на рисунке 3 видно, что при равных величинах

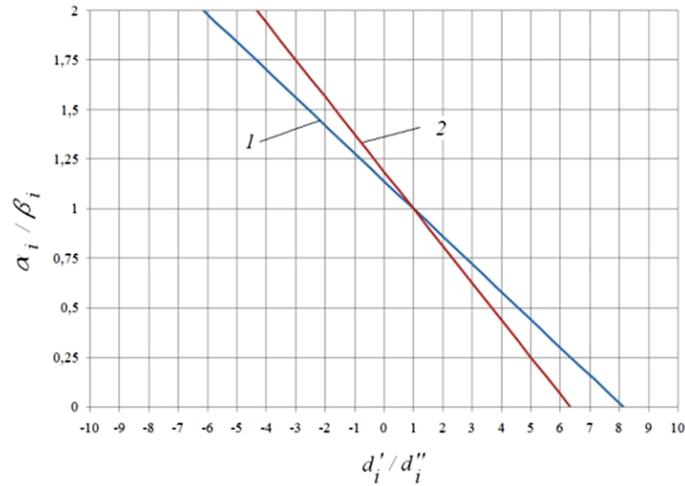


Рис. 3 Диаграмма самоторможения

1 – $K_i^I=0,2, K_i^{II}=0,2$; 2 – $K_i^I=0, K_i^{II}=0,375$

поперечного сдвига шарнирных узлов A_i и B_i величины углов α_i и β_i равны. При увеличении отношения d_i^I к d_i^{II} величина углового смещения α_i становится меньше величины β_i . И, наоборот – при уменьшении отношения d_i^I к d_i^{II} величина углового смещения α_i становится больше величины β_i . При сдвигах d_i^I и d_i^{II} в противоположных направлениях величина углового смещения α_i всегда больше величины β_i . Поэтому в дальнейшем целесообразно рассматривать только однонаправленные поперечные смещения шарнирных узлов.

Предложенная модель, по мнению авторов, позволяет выполнить анализ устойчивости СТР к внешнему воздействию для всех типов сочленения цилиндров турбины с выносными корпусами подшипников практически для любого количества «базовых» модулей (последовательно перемещающихся выносных корпусов подшипников). Наиболее распространенными являются СТР с одним и двумя «базовыми» модулями.

Результаты и обсуждение: Анализ устойчивости СТР с одним «базовым» модулем

Схема СТР с одним «базовым» модулем характерна, в основном, для одноцилиндровых паровых турбин.

Абсолютная величина предельного углового смещения звена 2 для любого «базового» модуля, как было показано ранее, определяется из выражения(4).

Тогда выражение (5) с учётом выражения (7) можно записать

$$|d_i^{II}| = c_i \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right).$$

Соответственно, из неравенства (9), для первого «базового» модуля получаем

$$\frac{\alpha_1^{\text{пред}}}{\beta_1^{\text{пред}}} < 1 + \left(K_1^I + \frac{1}{2} \right) \times K_1^{II} - \frac{d_1^I}{c_1} \times K_1^{II}. \quad (10)$$

Для практического использования при выборе величины $\alpha_1^{\text{пред}}$ удобно принять условие

$$\frac{\alpha_1^{\text{пред}}}{\beta_1^{\text{пред}}} \leq 1. \quad (11)$$

Тогда из неравенства (10) получаем, что неравенство (11) будет всегда справедливо при выполнении условия

$$\left(K_1^I + \frac{1}{2} \right) \times K_1^{II} - \frac{d_1^I}{c_1} \times K_1^{II} > 0.$$

или

$$|d_1'| < c_1 \left(K_1^I + \frac{1}{2} \right). \quad (12)$$

Для одноцилиндровых турбин величина $|d_1'|$, как правило, либо равна 0, либо не больше половины зазора на продольной шпонке выносного корпуса подшипника, т.е. на практике всегда выполняется условие (12).

Соответственно, из выражений (4) и (11) получаем

$$|\alpha_1^{\text{пред}}| \leq \frac{c_1}{l_1}.$$

Таким образом, для обеспечения устойчивости СТР одноцилиндровой турбины (турбины с одним перемещающимся выносным корпусом подшипника) достаточно, чтобы предельный угол поворота в узле сочленения цилиндра турбины и корпуса подшипника не превышал угла поворота корпуса подшипника относительно продольных шпонок, при котором возникает «диагональный» контакт.

Анализ устойчивости СТР с двумя «базовыми» модулями

Схема СТР с двумя «базовыми» модулями характерна для двух- и трёхцилиндровых отечественных турбин.

Из неравенства (9) получаем условие отсутствия «диагонального» контакта для любого $i+1$ -го «базового» модуля.

$$\frac{\alpha_{i+1}^{\text{пред}}}{\beta_{i+1}^{\text{пред}}} < 1 + \left(1 - \frac{d_{i+1}'}{d_{i+1}''} \right) \times \left(K_{i+1}^I + \frac{1}{2} \right) \times K_{i+1}^{\text{II}}.$$

Для любого B_{i+1} шарнирного узла величина поперечного сдвига d_{i+1}' обуславливается угловым смещением звена 2 предыдущего базового модуля. С учётом того, что, как правило, $l_i' = l_i''$ можно записать

$$|d_i'| = |d_{i+1}'| = c_i \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right).$$

Тогда получаем

$$\frac{\alpha_{i+1}^{\text{пред}}}{\beta_{i+1}^{\text{пред}}} < 1 + \left(K_{i+1}^I + \frac{1}{2} \right) \times K_{i+1}^{\text{II}} - \frac{c_i \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right)}{c_{i+1}} \times K_{i+1}^{\text{II}}.$$

Если условие устойчивости принимаем аналогично условию устойчивости СТР с одним «базовым» модулем, т.е.

$$\frac{\alpha_{i+1}^{\text{пред}}}{\beta_{i+1}^{\text{пред}}} \leq 1, \quad (13)$$

то получаем, что должно выполняться неравенство

$$c_{i+1} \left(K_{i+1}^I + \frac{1}{2} \right) > c_i \left(K_i^I + \frac{1}{2} \right).$$

Т.е. можно сделать вывод, что для обеспечения устойчивости СТР к внешнему воздействию величина максимального поперечного смещения шарнирного узла A_{i+1} должна быть не меньше величины максимального поперечного смещения шарнирного узла B_{i+1} , т.е.

$$|d_{i+1}'| \leq |d_{i+1}''|. \quad (16)$$

Для отечественных турбин, как правило, $c_i = c_{i+1}$ и $l_i' = l_i'' = l_{i+1}' = l_{i+1}''$, тогда получаем, что условие (13) будет выполняться при выполнении неравенства

$$l_{i+1} \leq l_i. \quad (17)$$

Соответственно, для обеспечения устойчивости СТР с двумя «базовыми» модулями необходимо, чтобы выполнялось условие

$$|\alpha_i^{\text{пред}}| \leq |\alpha_{i+1}^{\text{пред}}|.$$

Учитывая (4) и (13) в общем виде можно записать

$$|\alpha_i^{\text{пред}}| \leq \min_i \left(\frac{c_i}{l_i} \right). \quad (18)$$

В реальных турбоагрегатах не всегда выполняется условие (17), но соблюдение условия (18) всегда обеспечивает устойчивость СТР.

Рассмотрим вариант, когда абсолютная величина предельного углового смещения в узле A_i равна абсолютной величине предельного углового смещения в узле A_{i+1} .

Принимаем $\left| \alpha_i^{\text{пред}} \right| = \frac{c_{i+1}}{l_{i+1}}$, тогда получаем

$$d'_{i+1} = \frac{c_{i+1}}{l_{i+1}} \left(l_i + l_i'' \right) - \frac{c_i}{2}. \quad (19)$$

В то же время

$$d''_{i+1} = \frac{c_{i+1}}{l_{i+1}} \left(\frac{l_{i+1}}{2} + l'_{i+1} \right). \quad (20)$$

Подставляя выражения (19) и (20) в неравенство (16), с учётом ранее принятых допущений, получаем, что оно справедливо для $l_i \leq l_{i+1}$.

При соблюдении условия (18) величина предельного углового смещения в шарнирном узле B_{i+1} , последующего цилиндра относительно предыдущего корпуса подшипника не ограничена. Для реальных турбин эта величина, как правило, равна ограничению в шарнирном узле A_i .

Таким образом, для обеспечения устойчивости СТР многоцилиндровой паровой турбины (турбины с несколькими последовательно перемещающимися выносными корпусами подшипников) необходимо, чтобы предельный угол поворота в каждом узле сочленения цилиндров турбины и корпусов подшипников при любых ранее упомянутых конструкциях узлов сочленения цилиндров турбины и выносных корпусов подшипников не превышал наименьшей величины предельного угла поворота из всех корпусов подшипников.

Выводы

На основе разработанной авторами модели, в которой СТР представлена в виде многозвенной шарнирной системы состоящей из одного или нескольких «базовых» модулей исследованы условия устойчивости СТР к внешним воздействиям

1. На основе моделирования показано, что величина изменения угла поворота цилиндра турбины относительно корпуса подшипника в узле сочленения должна быть ограничена.

2. На основе исследования на модели установлено:

– Для обеспечения устойчивости СТР турбины с одним перемещающимся выносным корпусом подшипника достаточно, чтобы предельный угол поворота в узле сочленения цилиндра турбины и корпуса подшипника не превышал предельного угла поворота корпуса подшипника относительно продольных шпонок.

– Для обеспечения устойчивости СТР паровой турбины с несколькими последовательно перемещающимися выносными корпусами подшипников необходимо, чтобы предельный угол поворота во всех узлах сочленения цилиндров турбины с корпусами подшипников не превышал величины наименьшего предельного угла поворота из всех корпусов подшипников.

3. Результаты выполненного исследования могут быть использованы при проектировании новых паровых турбин и при реконструкции систем тепловых расширений оборудования находящегося в эксплуатации.

Литература

1. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины. 2-е изд., перераб. и доп. // М., Энергоатомиздат, 1990. 640 с.
2. Костюк А.Г., Булкин А.Е., Трухний А.Д. Турбины тепловых и атомных электрических станций. 2-е изд., перераб. и доп // М.: Издательство МЭИ, 2001, 488 с.
3. Нормализации тепловых расширений паровых турбин тепловых электростанций: РД 34.30.506-90 // М.: Минэнерго, 1990. 40 с.
4. Авруцкий Г.Д., Браун Э.Д., Дон Э.А и др. О скольжении корпусов подшипников паровых турбин // Теплоэнергетика. 1991. №1. С.18-24.
5. Шаргородский В.С., Хоменок Л.А., Курмакаев М.К. Нормализация тепловых расширений мощных паровых турбин // Электрические станции. 1996. №6. С. 12-19.

6. Розенберг С.Ш., Сафонов Л.П., Хоменок Л.А. Исследование мощных паровых турбин на электростанциях // М.: Энергоатомиздат. 1994. 272 с.
7. Ермолаев В.В., Сосновский А.Ю., Евсеев Я.И., Шкляр А.И. и др. Исследование системы тепловых расширений турбин К-300-240ХТЗ Рефтинской ГРЭС / Совершенствование турбин и турбинного оборудования: Региональный сборник научных статей: УГТУ, 1998, 287 с.
8. Родин В.Н., Шарапов А.Г., Мурманский Б.Е. и др. Ремонт паровых турбин / под общ. ред. Бродова Ю.М. и Родина В.Н. Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ. 2005. 438с.
9. Мурманский Б. Е. Разработка и реализация концепции комплексной системы повышения надежности состояния паротурбинной установки // Надежность и безопасность энергетики. 2015. №1 (28). С. 44-48.
10. Сосновский А.Ю., Мурманский Б.Е., Бродов Ю.М. Системы тепловых расширений паровых турбин: учебное пособие для вузов. Екатеринбург: УРФУ, 2015. 132с.
11. Хоменок Л.А., Ремезов А.Н., Ковалев И.А., Шаргородский В.С. Повышение эффективности эксплуатации паротурбинных установок ТЭС и АЭС. Т.1. Совершенствование паровых турбин // СПб, Изд. ПЭИпк, 2001, 340 с.
12. Герцберг Х.Я., Коваленко А.Н., Сафонов Л.П., Френкель Л.Д. Системы установки на фундаменте и температурные расширения многоцилиндровых паровых турбин // М.: НИИ Эинформэнергомаш, 1982. 46 с.
13. Евсеев Я.И. Патент 2123603 РФ Устройство для обеспечения теплового расширения турбоагрегата. Бюл. №35, 1998.
14. Зильберштейн С.Л., Тененбойм Л.Г. Английские паровые турбины большой мощности и тенденции развития паротурбостроения Англии // М.: ОРГРЭС, 1966. 72 с.;
15. Прхлик Любош. Эффективные турбоагрегаты для энергетических станций. Доступно по: http://www.segrp.ru/data/3290391_Param0.pdf. Ссылка активна на: 01.04.2019.
16. Ермолаев В.В., Сосновский А.Ю., Шкляр А.И., Великович М.В. и др. Комплексный подход к нормализации тепловых расширений турбины // Электрические станции. 2002. №5. С. 26-31.
17. Балашова Р.К., Власов В.В., Пашнин К.А., и др. Нормализация перемещений турбин от действия усилий, передаваемых трубопроводами на лапы цилиндров // Электрические станции. 2013. № 6 (983). С. 14-16.
18. Мурманский Б.Е., Сосновский А.Ю. О выявлении причин затруднённых тепловых расширений паровых турбин // Энергетик. 2017, №12, с. 33-37.
19. Гаврилов П.Я., Мурманский Б.Е., Сосновский А.Ю., и др. Анализ усилий и моментов, действующих на одноцилиндровую паровую турбину со стороны присоединенных трубопроводов пара // Технические науки в мире: от теории к практике. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. 2017. С. 30-35.
20. Сосновский А. Ю., Мурманский Б. Е., Бродов Ю. М. и др. Устойчивость системы теплового расширения паровой турбины к воздействию внешних факторов. Энергетические технологии и инженерия. 2017. Т.51. № 4. С.454-458.

Авторы публикации

Сосновский Андрей Юрьевич – канд. техн. наук, заместитель технического директора ООО «УК Теплоэнергосервис» по турбоустановкам.

Мурманский Борис Ефимович – д-р техн. наук, начальник теплотехнического управления филиала «Свердловский» ПАО «Т Плюс».

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, профессор, действительный член АИИН РФ, заведующий кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет.

References

1. Trukhnii AD. Stationary steam turbines. 2-nd ed., Rev. and add. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 640 p.
2. Kostyuk AG, Frolov VV, Bulkin, AE. Turbines of thermal and nuclear power stations. 2nd prod., reslave. and add. M.: MEI Publishing house. 2001. 488 p.
3. Normalization of steam turbines of thermal power plants: RD 34.30. 506-90. M.: Minenergo, 1990. P.40 .
4. Avrutskii GD, Brown ED, Don A. On sliding of the bearing's housings of steam turbines. *Теплоэнергетика*. 1991;1:18-24.
5. Shargorodskii VS, Khomenok LA, Kurmakaew MK. The normalization of the thermal expansion of powerful steam turbines. *Power stations*. 1996;6:12-19.

6. Rosenberg SSh, Safonov LP, Homenok LA. *Investigation of steam turbines of high capacity at power plants*. M.: Energoatomizdat, 1994. P. 272
7. Yermolaev VV, Sosnovsky AYu., Evseev YaI, Shklyar AI, et al. Research of thermal expansions system of the turbines K-300-240HTZ of Reftinsky GRES. *Improvement of turbines and turbine equipment: Regional collection of scientific articles: UGTU*. 1998. 287 p.
8. Rodin VN, Sharapov AG, Murmanskii BE. Repair steam turbine and others; under general ed. Yu. M. Brodov. Ekaterinburg: UGTU-UPI. V.205. 438 p.
9. Murmanskii BE. Development and implementation of the concept of an integrated system for improving the reliability of the state of a steam turbine installation. *Reliability and safety of energetics*. 2015;1 (28):44-48.
10. Sosnovskiy AY, Murmanskii B. E, Brodov Yu. M. Thermal expansion systems of steam turbines: a textbook for high schools. Ekaterinburg: URFU 2015. 132 p.
11. Homenok LA, Remezov AN, Kovalyov IA, Shargorodsky VS, et al. Increasing of the equipment operation for steam turbine units of thermal and nuclear power stations. V.1. Steam turbines improvement, under the editorship of L.A. Homenok . SPb, Prod. PEIpk. 2001;1:340.
12. Gertsberg H Ya, Kovalenko AN, Safonov LP, Frenkel LD. The systems of installation on the base and the temperature expansions of multicylinder steam turbines. M.: Niieinformenergomash, 1982.46 p.
13. Evseev YaI. Device for providing the turbine unit thermal expansion. Patent 2123603 RF.N. 35. 1998.
14. Zilberstein SL, Tenenboym LG. *English high power steam turbines and tendency of development of steam turbine construction in England*. M.: ORGRES, 1966. 72 p.
15. Prehlik Lubos. *Efficient turbines for power stations*. Available at: http://www.segrp.ru/data/3290391_Param0.pdf. Accessed to: 01.Apr.2019.
16. Ermolaev VV, Sosnovskii AYu, Shklyar AI, et al. Complex approach to normalization of thermal expansions of a turbine. *Power Technology and Engineering*. 2002;36(3):132-137.
17. Balashova RK, Vlasov VV, Pashnin KA, et al. Normalization of the displacement of turbines owing to forces transferred by piping to cylinder lugs. *Power Technology and Engineering*. 2013;47(4):293-295.
18. Murmanskii BE, Sosnovskiy AY, et al. About the identification of the reasons of the steam turbines complicated thermal expansions. *Energetik*. 2017;12:33-37.
19. Gavrilov PYa , Murmanskii BE , Sosnovskiy AU, et al. Analysis of forces and moments acting on a single-cylinder steam turbine from the side of attached steam pipelines. *Technical Sciences in the World: From Theory to Practice. Collection of Scientific Works on the Results of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. pp. 30-35.
20. Sosnovskii AY, Murmanskii BE, Brodov Y.M., et al. Stability of the thermal-expansion system of a steam turbine against external factors. *Power Technology and Engineering*. 2017;51(4):454-458.

Authors of the publication

Andrey Yu. Sosnovskiy – Teploenergoservis Management Company, Ekaterinburg, Russia.

Boris E. Murmanskii – T-plus group, Ekaterinburg, Russia.

Yuri M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила в редакцию

24 сентября 2019г.



ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВЫРАВНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВО ВХОДНЫХ ПАТРУБКАХ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

А.Е. Зарянкин¹, Т. Падашмоганло², М.С. Постникова³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
Tohid.padashi@gmail.com

Резюме: Рассматривается проблема обеспечения равномерного поля скоростей при входе воздуха в первую ступень компрессора газовой турбины SGT5-2000E с угловым входным трактом, содержащим фильтр, шумоглушитель и патрубков. На основе проведенного математического моделирования течения в этом патрубке установлено, что при входе в компрессор максимальная скорость на 36% превышает среднерасходную скорость, что серьезно сужает диапазоны устойчивой работы компрессора. Для решения указанной проблемы предлагается изменить конструкцию входного патрубка таким образом, чтобы в его проточную часть можно было установить разработанный новый эффективный гаситель неравномерности полей скоростей. Проведенные исследования показали, что таким образом коэффициент неравномерности удалось снизить с указанных выше 36% до 6%.

Ключевые слова: объемный гаситель неравномерности, коэффициент неравномерности, входной патрубок, компрессор, коэффициент сопротивления.

Для цитирования: Зарянкин А.Е., Падашмоганло Т., Постникова М.С. Исследование способов выравнивания параметров потока во входных патрубках осевых компрессоров // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 72-83. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-72-83.

INVESTIGATION OF METHODS FOR EQUALIZING THE FLOW PARAMETERS IN THE AXIAL COMPRESSOR INTAKE FLARE

AE Zaryankin¹, T Padashmoghlanlo¹, MS Postnikova¹

¹Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia
Tohid.padashi@gmail.com

Abstract: The problem of ensuring a uniform velocity field at the air inlet to the first stage of the gas turbine compressor SGT5-2000E with an angular inlet path, that contains an inlet filter, a silencer and an angular intake flare, is considered. Based on the mathematical modeling of the flow in this flare, it was found that the maximum speed at the compressor inlet is 36% higher than the average flow rate. It leads to the fact that the range of stable operation of the compressor seriously narrows. To solve this problem, it is proposed to change the intake flare design so that a newly developed effective damper of uneven velocity fields is installed in its flow part. Studies have shown that in this way the nonuniformity coefficient was reduced from the above 36% to 6%.

Keywords: volumetric nonuniformity damper, nonuniformity coefficient, intake flare, compressor, resistance coefficient.

For citation: Zaryankin AE, Padashmoghlanlo T, Postnikova MS. Investigation of methods for equalizing the flow parameters in the axial compressor intake flare. Power engineering: research, equipment, technology. 2019;21(6):72-83. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-72-83.

Введение

При угловом подводе воздуха к осевому компрессору газотурбинных установок характер течения воздуха во входном тракте имеет весьма сложную картину и

характеризуется большой окружной и радиальной неравномерностью потока в сечении выхода из тракта, причиной которой является конструктивная особенность входного тракта. Следует отметить, что неравномерность потока в окружном направлении оказывает большое влияние на механические напряжения в рабочих лопатках первой ступени компрессора вследствие возникновения циклических нагрузок. Характер течения воздуха в стандартных угловых входных патрубках ГТУ исследовался в работах [1-5] при неизменной конструкции входного патрубка.

Имеется крайне ограниченное количество работ, касающихся вопроса оптимизации входных патрубков газотурбинных установок с целью не только снижения гидравлического сопротивления всего тракта, но и выравнивания поля скоростей потока воздуха, поступающего из входного тракта в компрессор. Эти работы можно свести к двум основным направлениям. Первое направление сводится к чисто конструктивным изменениям проточной части входного тракта с целью исключения причин возникновения отрывного течения с формированием вихревых образований в потоке. Здесь большой интерес представляют практические решения, предложенные фирмой *M&I Power Tech (CDN), INC(Ontario, Canada)* и содержащиеся в [3], где в проточной части входного тракта были установлены различные конструктивные исполнения направляющих лопаток, предотвращающих отрыв потока от стенок и образование вихревых зон (рис.1).

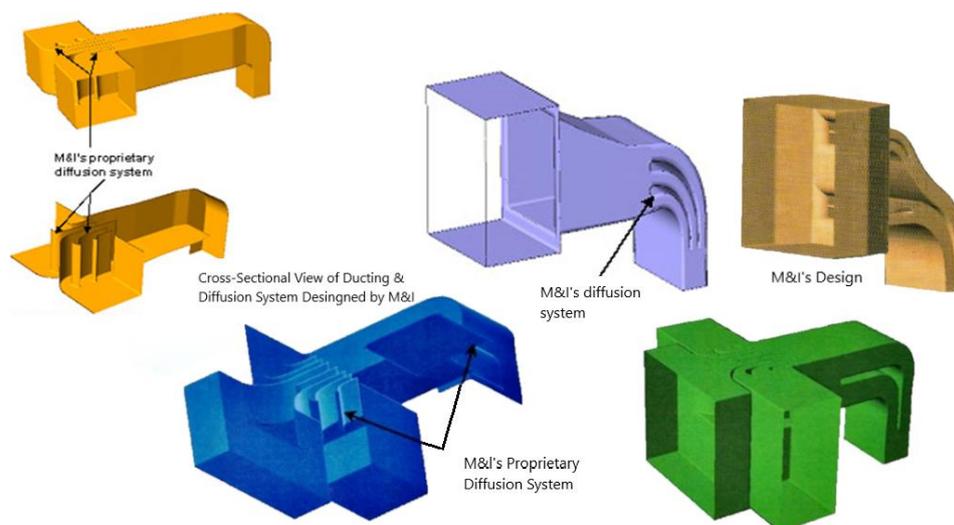


Рис.1. Установка направляющих лопаток в проточной части входного тракта ГТУ [3]

Приведенные в [4] результаты показали, что установка аэродинамических решеток с изменяющимися размерами по линии изгиба канала входного тракта газовой турбины W501D5с боковым подводом воздуха к компрессору ведет к выравниванию распределения скоростей по сечению за поворотом.

Весьма интересными оказались результаты работы [5], где наряду с численными исследованиями проводился подробный физический эксперимент на модельных входных трактах газовых турбин на специально созданном стенде. Показано, что течение воздуха в исходном входном тракте обладает нестабильным, пульсирующим характером и сопровождается интенсивными колебаниями всех параметров воздуха. В целом исследуемый входной тракт по исходному варианту оказался непригодным для ГТУ ни по надежности, ни по экономичности. Анализируя причины нестабильности течения, в [5] делается вывод о том, что причиной зафиксированных низкочастотных пульсаций давления могут быть: отрыв потока в поворотном прямоугольном колене в области малого радиуса после поворота на 90° к оси установки и срывные явления на опорных ребрах в выходной кольцевой части тракта, где скорости течения максимальны.

В процессе оптимизации геометрии входного тракта в [5] с целью снижения уровня потерь кинетической энергии входного тракта, уменьшения интенсивности пульсаций давления в его элементах и выравнивания структуры потока в сечении выхода из входного патрубка в его проточную часть устанавливались тонкостенная разделительная перегородка в плоскости симметрии патрубка, уменьшенная в радиальном направлении тонкостенная разделительная перегородка, специально спрофилированный кольцевой обтекатель типа *bell mouth* и модифицированный, более развитого в радиальном направлении, обтекатель типа *bell mouth*.

Для количественной оценки всех рассмотренных вариантов в [5] был использован коэффициент потерь кинетической энергии потока во входном тракте, определяемый как отношение перепадов давления полного торможения между входным и выходным сечениями тракта к скоростному напору потока в кольцевом сечении перед входным направляющим аппаратом (далее ВНА) компрессора. Рассматривая приведенные в [5] результаты можно отметить, что конечные результаты всех вариантов оказались достаточно скромными. Если при установке в проточную часть патрубкатонкостенной разделительной перегородки удалось снизить коэффициент потерь с 34% (для исходного варианта) до 12,29%, то применение остальных мер позволило снизить этот коэффициент лишь до 11,34%. При этом на входе в компрессор сохранилась высокая нестационарность и неравномерность входного поля скоростей.

С практической точки зрения представляет особый интерес работа [6], где представлены результаты комплексного исследования характеристик входного патрубка газотурбинной установки ГТЭ-110 на основе физических экспериментов. В результате было показано, что амплитуда колебаний статического давления в боковом сечении модели исходного входного патрубка ГТЭ-110 за кожухом вала составляет 300 Па, говорится о наличии значительной нестационарности течения при обтекании кожуха вала. Проведенная модернизация входного патрубка ГТЭ-110 позволила существенно снизить коэффициент потерь полного давления потока во входном тракте по сравнению с его исходным вариантом (от 0,3794 до 0,0941), снизила степень неравномерности потока до 4,9% и обеспечила нормальный уровень пульсаций параметров потока на входе в лопаточный аппарат компрессора. Существенное снижение амплитуд пульсаций давления было получено при установке в нижней части камеры патрубка разделительного ребра. Аналогичный вывод был сделан и в [5].

Анализ литературных данных показал, что выравнивание распределения скоростей воздуха в выходном сечении патрубка перед лопаточным аппаратом компрессора лишь чисто конструктивным изменением проточной части патрубка представляет собой сложную задачу. В связи с этим представляется целесообразным ввести в его проточную часть специальный гаситель неравномерности (второе направление по решению указанной выше проблемы). Такой подход выравнивания поля скоростей воздуха перед его входом в компрессор видимо впервые рассматривается в настоящей работе.

Материалы и методы

В качестве базы для исследования нами был выбран угловой входной патрубок компрессора турбины фирмы *Siemens (Berlin, Germany)* типа SGT5-2000E (рис.2). Характеристики ГТ и параметры забираемого компрессором воздуха из атмосферы приведены в табл.1 по условиям *ISO (International Organization for Standardization)* [7].

Таблица 1

Характеристики ГТ и параметры наружного воздуха по условиям ISO

Мощность ГТУ	187 МВт
КПД установки	36,5%
Степень сжатия воздуха в компрессоре	12,8
Расход воздуха через компрессор	558 кг/с
Температура атмосферного воздуха	15°C
Давление полного торможения наружного воздуха	101325 Па
Относительная влажность воздуха на входе	60%
Доля водяного пара H ₂ O в воздухе	0,0063 кг/кг
Доля O ₂ в воздухе	0,2285 кг/кг
Доля N ₂ в воздухе	0,7652 кг/кг



Рис.2. Газовая турбина SGT5-2000E с базовым угловым входным трактом

Трехмерная модель базового входного тракта газотурбинной установки SGT5-2000E представлена на рис.3. Расчеты проводились для натурального входного тракта компрессора, где воздух поступает в тракт не только по осевому прямоугольному входу проходной площадью $50,9\text{ м}^2$ ($7,7 \times 6,6$ м), но и по двум боковым прямоугольным входам проходной площадью $2 \times 49,5\text{ м}^2$ ($2 \times 7,5 \times 6,6$ м). Кроме того, проходная площадь выходного сечения кольцевого конфузора (на входе в ВНА компрессора) составляет $6,5\text{ м}^2$. Ширина входного патрубка принималась равной $7,7$ м. Исходя из предположения, что течение симметрично относительно плоскости геометрической симметрии расчетной области, все расчеты проводились для половины исследуемого патрубка (рис.3).

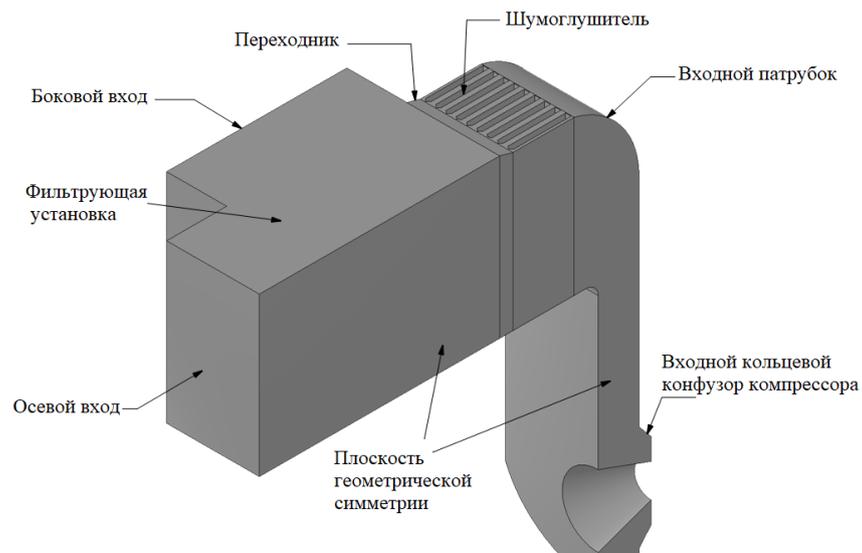


Рис.3. Расчетная модель базового входного тракта

Сетки расчетных областей были построены с помощью генератора сетки *ANSYSICEMCFD* с соблюдением необходимого требования к выбранной модели турбулентности по значению y^+ . В качестве примера на рис.4 показана гибридная сетка расчетной области базового входного тракта, состоящая из 2,6 млн гексаэдрических и тетраэдрических ячеек.

Расчетные модели входных угловых патрубков компрессора с установленным в их проточную часть объемным гасителем неравномерности.

На рис.5 представлен первый вариант новой конструкции входного углового патрубка, отличающийся от базового патрубка (рис.3) выполнением на месте поворота потока кромок задней и передней стенок с плавной кривизной больших радиусов и установкой в его проточную часть объемного гасителя неравномерности с одновременным увеличением проходных площадей входного патрубка и при входе потока воздуха в гаситель. За гасителем установлен профилированный кольцевой конфузор, выходной наружный диаметр которого равен наружному диаметру сечения входа воздуха в лопаточный аппарат компрессора.

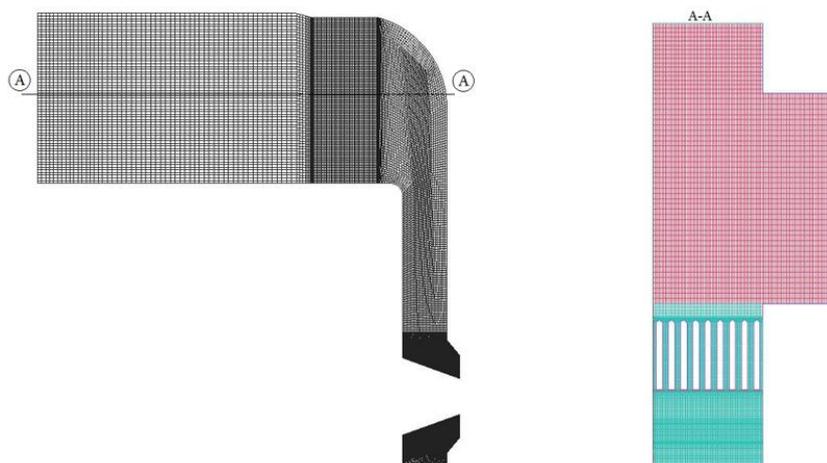


Рис.4. Расчетная сетка базового входного тракта (половина модели)

В приведенном на рис.5 варианте, гаситель представлял собой две конические перфорированные поверхности с углами при вершине 45° , соединенные между собой своими основаниями. Такая конструкция предусматривает расположение опорных ребер переднего подшипника ротора турбокомпрессора во внутренней полости объемного гасителя. Более того, гаситель в системе подвода воздуха к компрессору служит дополнительным фильтром, исключающим попадание в проточную часть компрессора инородных твердых тел.

В результате дальнейшей модернизации проточной части патрубка с гасителем рассматривался его вариант с входной конической поверхностью больших диаметров перфорации с углом при вершине 60° и выходной конической перфорированной поверхностью с углом при вершине 45° .

Отличительные особенности всех рассмотренных вариантов входного углового патрубка наглядно видны на рис.6-8.

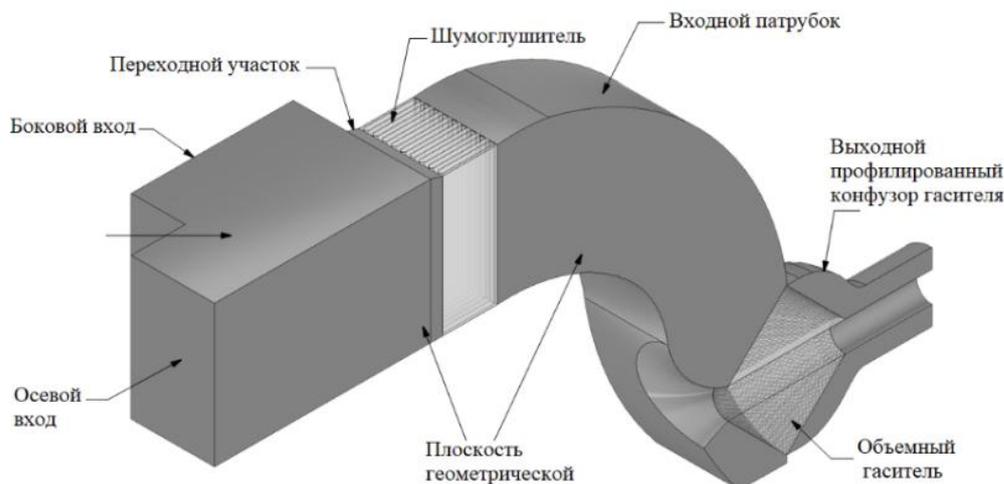


Рис.5. Расчетная модель входного тракта с объемным гасителем с двумя коническими перфорированными поверхностями с углами при вершине 45° (первый вариант)

При исследовании рассмотренных вариантов входных трактов приняты следующие допущения: так как во входном тракте при входе в компрессор число Маха воздуха достигает величин $0,3-0,4$, то расчеты велись с учетом сжимаемости рабочего тела (воздуха); рабочее тело подчинялось уравнению состояния идеального газа; течение рабочего тела – адиабатное и установившееся (*Steady State*); режим течения – турбулентный.

Моделирование турбулентного режима рабочего тела в настоящей работе производилось с помощью программного комплекса *ANSYS FLUENT*, базирующего на численном решении осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (*RANS*) с учетом уравнений неразрывности и энергии.

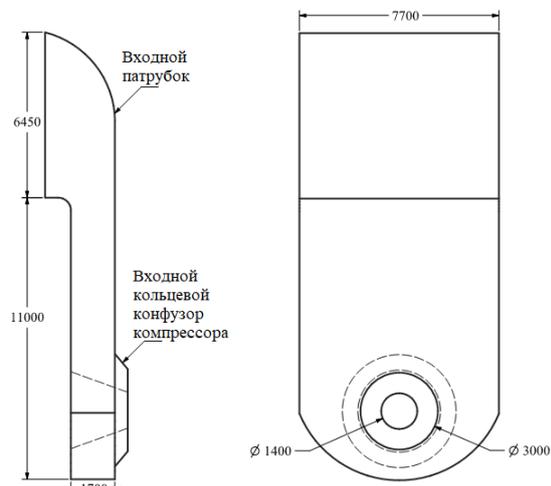


Рис.6. Конструктивная схема входного базового углового патрубка

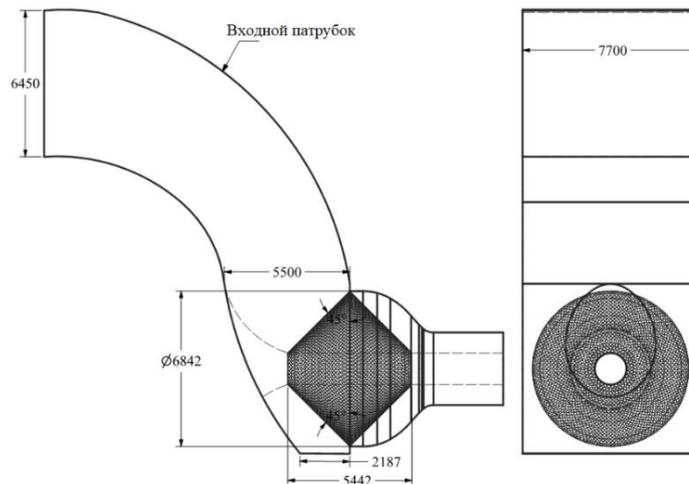


Рис.7. Конструктивная схема входного углового патрубка с объемным гасителем 1-го варианта

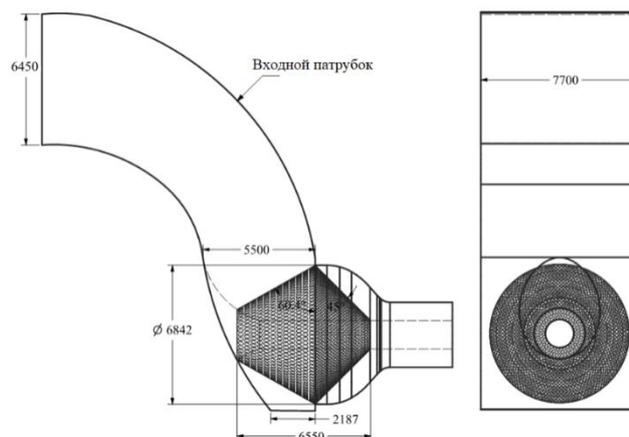


Рис.8. Конструктивная схема входного углового патрубка с объемным гасителем 2-го варианта

Уравнение неразрывности для стационарного течения сжимаемой жидкости:

$$\nabla(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Осредненные по Рейнольдсу (по времени) уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

Для замыкания осредненной по Рейнольдсу системы уравнений Навье-Стокса, необходимо определить связь между напряжениями по Рейнольдсу и параметрами осредненного течения. Эту связь определяют с помощью различных моделей

турбулентности. В настоящей работе для этой цели применялась двухпараметрическая модель турбулентности *k-εstandard* с использованием пристеночной функции (*Wallfunction*):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

В данной системе уравнений термин G_k , представляющий собой турбулентную кинетическую энергию, которая определяется следующей формулой:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Константы $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k и σ_ϵ имеют следующие значения: $C_{1\epsilon}=1,44$, $C_{2\epsilon}=1,92$, $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1$ и $\sigma_\epsilon=1,3$ [8].

Алгоритм решения (*Solver type*) выбран *Pressure Based* (алгоритм установления). Для повышения точности решений расчеты были выполнены с использованием дискретизации второго порядка точности (*Second Order Upwind*). Кроме того, алгоритм решения связки уравнений движения и неразрывности (*Pressure-Velocity Coupling*) выбирался *coupled*. Значения невязок при дискретизации уравнения неразрывности и осредненных уравнений Навье-Стокса задавалось 10^{-3} , а для уравнения энергии 10^{-6} .

Для учета гидравлического сопротивления фильтрующей установки течение воздуха в ней рассматривалось как течение рабочего тела в пористой среде. В результате гидравлическое сопротивление фильтров при турбулентном течении может быть рассчитано по уравнению *Ergun* [9]:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{1}{\alpha} \mu u_\infty + \frac{\rho C_2}{2} u_\infty^2 \quad (7)$$

где Δp – перепад давления полного торможения в фильтрующей установке, L – длина пористого то соответствовало перепаду давления в фильтрующей установке 490 Па.

При входе в тракт во всех вариантах задавались фиксированные параметры атмосферного воздуха, приведенные в табл.1, а в выходном сечении тракта (перед ВНА компрессора) было задано значение статического давления таким образом, чтобы массовый расход воздуха через входной тракт ГТУ соответствовал спроектированной пропускной способности тракта по условиям *ISO* для газовой турбины *SGT5-2000E*, то есть фиксированному массовому расходу 558 кг/с (для половины модели тракта 279 кг/с). Температура воздуха во входном и выходном сечениях была принята постоянной, равной 15°C. Что касается параметров турбулентности, то во входных и выходных граничных сечениях задавались интенсивность турбулентности (*Turbulent Intensity*) и гидравлический диаметр, значения которых приведены ниже.

- Во входном сечении: интенсивность турбулентности 2,5% и гидравлический диаметр 4,87 м для осевого входа, а для бокового входа интенсивность турбулентности 2,5% и гидравлический диаметр 7,02 м.

- В выходном сечении: интенсивность турбулентности 2,1% и гидравлический диаметр 1,8 м.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования течения воздуха во входном тракте базового патрубка представлены на рисунках 9-12. На рис. 9 римскими цифрами обозначены сечения, где приведены поля скоростей в контрольных сечениях.

Поля скоростей в плоскости геометрической симметрии тракта и в его различных контрольных сечениях, приведенные соответственно на рисунках 9-11, наглядно показывают, что скорость потока воздуха проходя отдельные элементы тракта интенсивно увеличивается и ее величина в выходном сечении тракта достигает 100 м/с, которая соответствует значению числа Маха 0,296. Поток воздуха из осевого и боковых подводов со скоростью 2-7 м/с протекает через фильтрующую установку. Затем его скорость применено в 2 раза увеличивается в проходном участке тракта, примыкающем непосредственно к фильтрующей установке. Заметное ускорение потока происходит в каналах шумоглушителя, где максимальная величина скорости достигает 23 м/с (рис.10). При

повороте от осевого направления к вертикальному сначала происходят снижение скорости вблизи передней стенки и ее повышение у задней стенки патрубка, а за поворотом обратное явление. Скорости вблизи передней стенки растут, а у задней падают.

При угловом подводе воздуха к компрессору, поток воздуха вынужден совершать еще один поворот от вертикального направления к осевому направлению, входя в кольцевой конфузор перед направляющим аппаратом. Кроме того, некоторая его часть обтекает конструктивный конус, и попадает в кольцевой конфузор из нижней части патрубка. В результате поле скоростей воздуха при его входе в компрессор характеризуется большой неравномерностью и несимметричностью, что хорошо видно в приведенном на рис.11 поле скоростей в поперечном кольцевом сечении III - III.

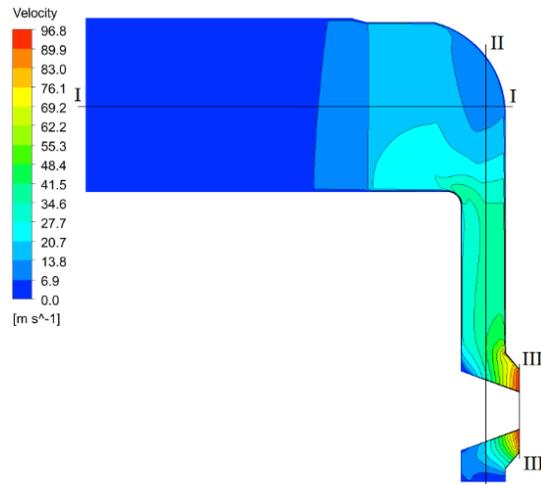


Рис.9. Поле скоростей в плоскости геометрической симметрии базового входного тракта

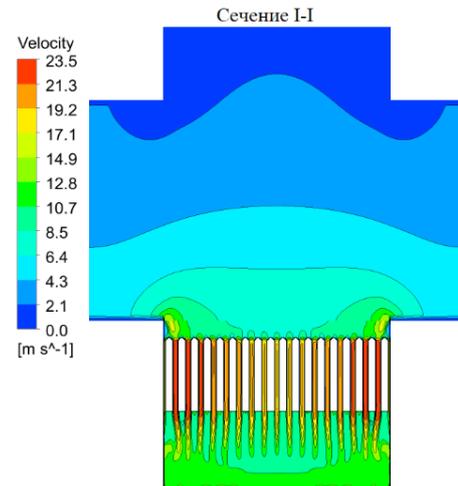


Рис.10. Поле скоростей в контрольном сечении I-I

Оценка степени неравномерности распределения скоростей в выходном кольцевом сечении патрубка (сечении III-III) проводилась по величине отношения максимальной скорости потока к среднерасходной по указанному сечению: $K = C_{max}/C_{cp}$. Расчетная величина этой степени в сечении выхода из патрубка (сечении III-III) составляет 1,36.

Полученные поля скоростей в плоскости геометрической симметрии и в контрольном сечении I-I для входных патрубков с объемным гасителем, приведенные на рис. 13-15, показывают, что плавный поворот потока с большими радиусами кривизны, одновременное увеличение проходной площади патрубка по сравнению с базовым вариантом и поджатие потока за поворотом (рис.7 и рис.8) не только предотвращают отрыв потока от задней стенки патрубка, но и улучшают распределение скоростей (рис.15) за поворотом (перед гасителем неравномерности), что, в свою очередь, ведет к снижению общего сопротивления.

Наглядное представление об эффективности выравнивания поля скоростей с помощью объемных гасителей дают поля скоростей, установленные за ними и представленные в рис. 16., где хорошо видно, что установка объемных гасителей в выходном сечении углового патрубка с одновременным увеличением проходной площади потока при его входе в гаситель способствует практически равномерному распределению поля скоростей как в окружном, так в радиальном направлении приблизив локальные скорости потока воздуха к среднерасходному значению скорости, и, устраняет пульсации параметров потока воздуха перед его входом в направляющий аппарат компрессора, что, в конечном счете, ведет к повышению вибрационной надежности ротора турбокомпрессора. Кроме того, равномерное распределение поля скоростей воздуха при его входе в компрессор ведет к повышению КПД компрессора и к его устойчивой работе как в номинальном, так и в переменных режимах. Здесь по сравнению с базовым входным трактом разница между максимальной и среднерасходной скоростями воздуха перед компрессором составляет всего 6,2% ($K=C_{max}/C_{cp}=1,062$).

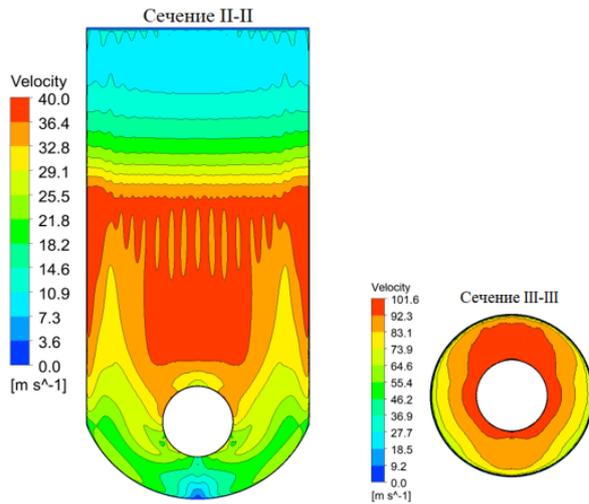


Рис.11. Поля скоростей в контрольных сечениях II-II и III-III

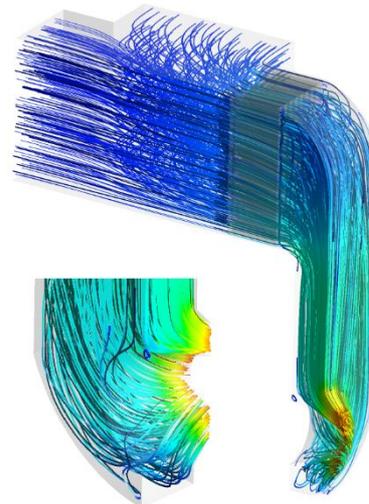


Рис.12. Трехмерная картина линий тока в исследуемом входном тракте

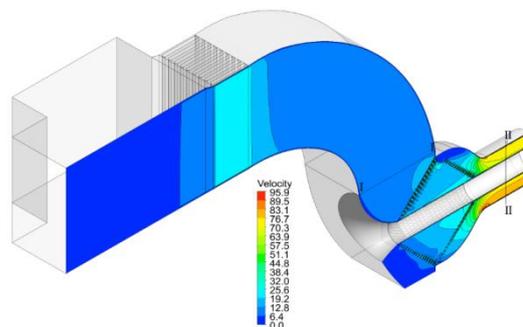


Рис.13. Поле скоростей в плоскости геометрической симметрии тракта с объемным гасителем 1-го варианта

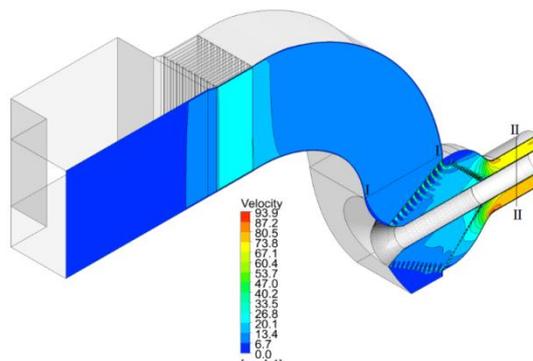


Рис.14. Поле скоростей в плоскости геометрической симметрии тракта с объемным гасителем 2-го варианта

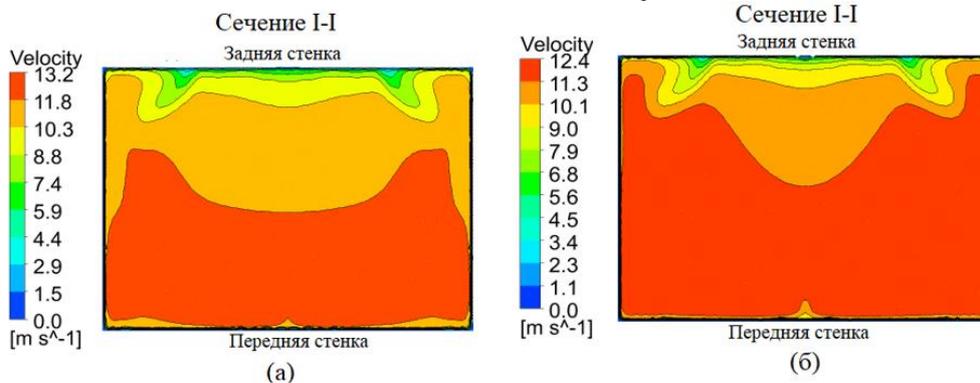


Рис.15. Поле скоростей в контрольном сечении I-I входного патрубка: а) с объемным гасителем 1-го варианта, б) с объемным гасителем 2-го варианта

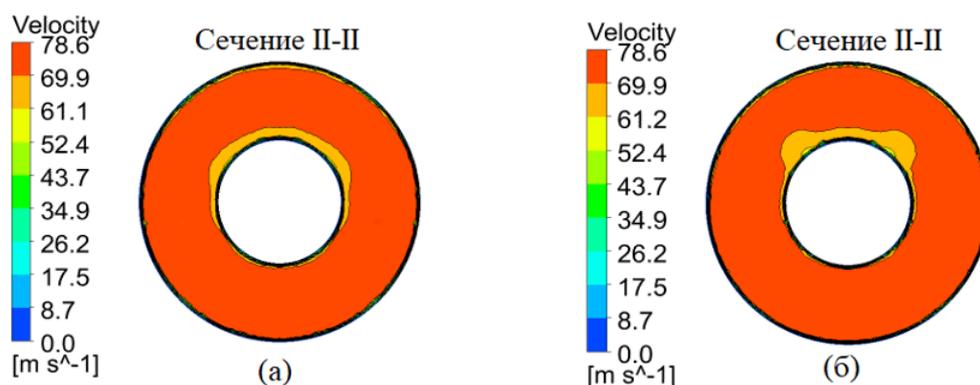


Рис.16. Поле скоростей в контрольном сечении II-II входного патрубка при входе воздуха в компрессор а) с объемным гасителем 1-го варианта, б) с объемным гасителем 2-го варианта

Как правило, внесение дополнительных устройств (гасителей неравномерности) в проточную часть входных патрубков приводит к повышению общего гидравлического сопротивления всего тракта (табл. 2). Однако, суммарный эффект от установки рассматриваемых объемных гасителей может оказаться положительным в связи с равномерным распределением скорости потока воздуха при его входе в компрессор.

Таблица 2

Расчетные значения степени неравномерности потока воздуха при его входе в компрессор ГТУ SGT5-2000E и потерь полного давления всего тракта

Тип входных трактов компрессора SGT5-2000E	Степень неравномерности потока при его входе в компрессор	Потеря полного давления всего тракта
Базовый	1,36	996 Па
С объемным гасителем 1-го варианта	1,062	1733 Па
С объемным гасителем 2-го варианта	1,062	1563 Па

Выводы

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

В результате проведенных исследований течения во входном базовом тракте ГТУ SGT5-2000E показано, что при использовании в осевом компрессоре входного патрубка с угловым подводом воздуха перед входным направляющим аппаратом компрессора имеет место значительная окружная и радиальная неравномерность скоростей и давлений воздуха, причиной которой является конструктивная особенность используемого тракта.

Эффективным способом для выравнивания поля скоростей в выходном сечении тракта является установка разработанных объемных гасителей неравномерности, позволяющих снизить неравномерность распределения скоростей в сечении выхода из тракта до 6%.

Литература

1. Stephen D. H. The Use of 3D CFD Analysis in the Design of Air Intake Systems as a Visualization Tool to Optimize Performance in Gas Turbine Applications // ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. 2005. V.4. pp. 349-359.
2. Chaker M., Thomas R. M. III. Design Consideration of Fogging and Wet Compression Systems as Function of Gas Turbine Inlet Duct Configurations // ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. 2015.
3. Applications for Gas Turbine and HRSG: <http://www.mipowertech.net/applications-for-gas-turbine-and-hrsg> // Ссылка активна на: декабрь 2018 г.
4. Jeanty F., De Andrade J., Croquer S and et.al. Numerical Analysis of a Fogging System in a Gas Turbine // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. 2012. V.3. pp. 913-923.

5. Черников В.А. Повышение эффективности входных трактов, ступеней и выходных диффузоров стационарных газовых турбин для комбинированных газопаровых установок. Дисс. ... д-р. техн. наук. СПб.:СПб ПУ. 2012. Доступно по: <http://elib.spbstu.ru/dl/2884.pdf/download/2884.pdf>. Ссылка активна на: 13 ноября 2018.

6. Михайлов В.Е., Хоменок Л.А. и др. Исследования и оптимизация характеристик входного патрубка осевого компрессора установки ГТЭ-110 // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. №. 3/3. С. 21-25.

7. SGT5-2000 Eheavy-dutygasturbine (50 Hz): Available at: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt5-2000e.htm/> Accessed to: 15 Dec 2018.

8. Jones W. P., Launder B. E. The prediction of laminarization with a 2-equation model of turbulence // International Journal, Heat Mass Transf. 1972. №15. P.301.

9. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns // Journal of Chemical Engineering Progress. 1952. V.4. N 2. pp. 89-94.

10. Будаков И.В., Буданов В.А. Расчетно-аналитическое исследование воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110 // Вестник ИГЭУ. 2015. N.3. С. 1-8.

Авторы публикации

Зарянкин Аркадий Ефимович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Паровых и Газовых Турбин». Национальный исследовательский университет «МЭИ», «НИУ «МЭИ». E-mail: ZaryankinAY@mpei.ru.

Падашмоганло Тоҳид – канд. техн. наук. Тегеран, Иран. E-mail: tohid.padashi@gmail.com.

Постникова Мария Сергеевна – студент кафедры «Паровых и Газовых Турбин». «НИУ «МЭИ». E-mail:mary.postnikova@yandex.ru.

References

1. Stephen DH. The Use of 3D CFD Analysis in the Design of Air Intake Systems as a Visualization Tool to Optimize Performance in Gas Turbine Applications. *ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air*. 2005; 4: 349-359.

2. Chaker M, Thomas R. M. 3 Design Consideration of Fogging and Wet Compression Systems as Function of Gas Turbine Inlet Duct Configurations. *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2015.

3. Applications for Gas Turbine and HRSG. Available at : <http://www.mipowertech.net/applications-for-gas-turbine-and-hrsg>. Accessed to: 2018.

4. Jeanty F, De Andrade J, Croquer S. and et.al.Numerical Analysis of a Fogging System in a Gas Turbine. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2012. pp. 913-923.

5. Chernikov VA. *Povyshenie effektivnosti vkhodnykh traktov, stupenei i vykhodnykh diffuzorov statsionarnykh gazovykh turbin dlya kombinirovannykh gazoparovykh ustanovok*. [dissertation]. St.-Petersburg, 2012. Available at: <http://elib.spbstu.ru/dl/2884.pdf/download/2884.pdf>. Accessed to: 13 Nov 2018.

6. Mikhailov VE, Khomenok LA. and et. al. Issledovaniya i optimizatsiya kharakteristik vkhodnogo patrubka oseвого kompressora ustanovki GTE-110. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*. 2010;3(3):21-25.

7. SGT5-2000 Eheavy-dutygasturbine (50 Hz): Available at: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt5-2000e.html>. Accessed to: 15 Dec 2018.

8. Jones WP, Launder BE. The prediction of laminarization with a 2-equation model of turbulence. *International Journal., Heat Mass Transf.* 1972;15:301.

9. Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. *Journal of Chemical Engineering Progress*. 1952; 4 (2): 89-94.

10. Budakov IV, Budanov VA. Raschetno-analiticheskoe issledovanie vozdukhozabornogo trakta gazoturbinnoi ustanovki GTE-110. *Vestnik ISPU*. 2015;3:1-8.

Authors of the publication

Zaryankin Arkadiy Efimovich – Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: Zaryankin AY@mpei.ru.

Padashmoghano Tohid – Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: tohid.padashi@gmail.com.

Postnikova Maria Sergeevna – Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: mary.postnikova@yandex.ru.

Поступила в редакцию

19 июля 2019 г.



МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ В СРЕДЕ ASPEN PLUS

А.А. Михин, В.В. Сергеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
Mikhanton89@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрена схема глубокой утилизации теплоты дымовых газов. Установлено, что в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удастся сконденсировать максимально возможную часть паров, содержащихся в газах. Для анализа основных энергетических показателей конденсационной установки и оптимизации ее режимов работы было выполнено моделирование приоритетной схемы в среде Aspen Plus. В настоящей схеме присутствуют тройники, теплообменники и реактор (топка котла). Настройка тройников (смесителей) осуществляется путем задания расходов или долей двух потоков, входящих или выходящих из элемента. Топка котла моделируется в качестве реактора Гиббса, который рассчитывает химическое и термодинамическое равновесие за счет минимизации разницы энергии Гиббса продуктов и исходных веществ. С помощью компьютерной программы Aspen Plus было выполнено моделирование схемы конденсационной установки на котельном агрегате ПТВМ-100 с уточнением оптимальных режимных параметров материальных потоков и теплообменного оборудования. Проведенные расчеты показывают, что при использовании конденсационного котла достигается тройной энергетический эффект: используется физическая теплота уходящих газов; используется выделяющаяся при конденсации скрытая теплота парообразования; используется конденсат, выделяющийся из дымовых газов.

Ключевые слова: конденсационный котел; котельные агрегаты, теплогенераторы; дымовые газы; теплообменное оборудование, математическая модель.

Для цитирования: Михин А.А., Сергеев В.В. Моделирование конденсационной установки в среде ASPEN PLUS // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2019. Т.21. № 6. С.84-92. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-84-92.

SIMULATION OF CONDENSATION UNIT IN ASPEN PLUS

AA Mikhin, VV Sergeev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
Mikhanton89@mail.ru

Abstract: The article discusses the scheme of deep utilization of the heat of flue gases. It has been established that in boiler units operating on natural gas, the only way to significantly improve the use of fuel is to deeply cool the combustion products to a temperature at which it is possible to condense the maximum possible portion of the fumes contained in the gases. To analyze the main energy indicators of the condensing unit and optimize its operating modes, a priority scheme was simulated in Aspen Plus. In this scheme, there are tees, heat exchangers and a reactor (boiler furnace). The configuration of tees (mixers) is carried out by setting the costs or fractions of two flows entering or leaving the element. The boiler furnace is modeled as a Gibbs reactor, which calculates the chemical and thermodynamic equilibrium by minimizing the difference in the Gibbs energy of the products and the starting materials. Using the Aspen Plus computer program, the condensation unit circuit was simulated at the PTVM-100 boiler unit with the specification of the optimal operating parameters of material flows and heat exchange equipment. The calculations show that when using a condensing boiler, a triple energy effect is achieved: the physical heat of the flue gases is used; the latent heat of

vaporization released during condensation is used; the condensate released from the flue gases is used.

Keywords: *condenser; boiler; flue gases; heat generators; heat exchangers; mathematic model.*

For citation: Mikhin AA, Sergeev VV. Simulation of condensation unit in *ASPEN PLUS*. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):84-92. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-84-92.

Введение

Основным преимуществом использования природного газа в котельных агрегатах является малая величина тепловых потерь [1-3]. Потери теплоты от механического недожога в этом случае отсутствуют, потери теплоты от химической неполноты горения топлива близки к нулю, потери теплоты в окружающую среду при использовании эффективных современных теплоизоляционных материалах весьма малы [4, 5]. Единственной потерей теплоты в котлах, о дальнейшем снижении которой может идти речь, является лишь потеря с уходящими газами, которая по отношению к низшей теплоте сгорания газа составляет 5–6 % [6, 7]. Отсюда следует вывод: в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удастся сконденсировать максимально возможную часть паров, содержащихся в газах [8]. Конденсационные котлы работают с высокой эффективностью даже в условиях высокой нагрузки. Развитие технологий газовой конденсации открывает большие возможности для снижения потребления газа в многоквартирных домах, а также в офисных зданиях. Коэффициент использования топлива может достигать теоретического значения более 110% при отнесении на низшую теплоту сгорания [9, 10]. Материалы с высокой коррозионной активностью, возникающей в результате конденсации газа, были серьезной проблемой в промышленности на протяжении многих лет использования агрегатов [11]. Трещины, вызванные коррозией, обнаружены в основном в низкотемпературных теплообменниках (обычно при температуре от 70 до 90 °С). Ранее теплообменники, как правило, изготавливались из стандартной низкоуглеродистой стали. При этом, большинство трещин случилось там, где механические напряжения были относительно высокими. Микроскопический анализ образцов показал, что часто происходила межкристаллитная коррозия.

Во избежание коррозии из-за конденсации газов, очень важно хорошо понимать состав и количество конденсированной жидкости, которая может образоваться в конденсационных котлах. Методы расчета процесса конденсации интенсивно совершенствовались в течение последних нескольких десятилетий. Для чистого воздуха точку росы можно получить непосредственно из справочных данных для водяного пара. Но когда в газе присутствуют другие частицы, такие как SO₃, SO₂, HCl или NO₂, точка росы будет отклоняться от идеальной линии точки росы. При атмосферном давлении, точка росы дымовых газов в присутствии этих компонентов может быть пересчитана с помощью уравнений, характерных для разных веществ. Чтобы противостоять агрессивным коррозионным условиям, конденсационные котлы в настоящее время изготавливаются из нержавеющей стали и других коррозионностойких материалов [12]. При этом затраты на материалы иногда втрое превышают аналогичные затраты для обыкновенных котлов. Одним из типовых материалов, используемых для данных агрегатов, являются нержавеющие стали, которые характеризуются высоким содержанием хрома и молибдена [13]. Кроме того, для изготовления конденсационных котлов могут применяться современные полимерные и композитные материалы.

Сегодня основная задача состоит в определении параметров, при которых обеспечивается надежная эксплуатация наружных газоходов и дымовых труб, отводящих в атмосферу охлажденные и частично осушенные в конденсационных теплообменниках продукты сгорания [14, 15]. В настоящее время находит применение установка дымовых труб, выполненных из стеклопластика, что расширяет возможности применения технологии глубокой утилизации теплоты дымовых газов [16, 17].

Материалы и методы

Наружный воздух, подаваемый на горение, предварительно нагревается в калориферной секции воздухоподогревателя и увлажняется в секции орошения после чего вентиляторной установкой подается в воздушный коллектор. Коллектор расположен

снаружи здания котельной вдоль линии приемных камер, которые подключены к коллектору отдельными патрубками. Из приемных камер воздух по существующим подпольным каналам подается на всос дутьевых вентиляторов, расположенных по обе стороны каждого котла. Для нагрева воздуха используется часть обратной сетевой воды, расход которой регулируется таким образом, чтобы ее температура за воздухоподогревателем составляла 20 °С. Увлажнение воздуха осуществляется конденсатом, выделяющимся из дымовых газов. Распыление конденсата в камере орошения производится через форсунки. Количество форсунок и расход конденсата на увлажнение определяются расчетом в зависимости от расхода воздуха на горение. При изменяющемся расходе воздуха количество распыляемого конденсата должно регулироваться. Воздухоподогреватель может быть дополнен секцией второго подогрева для повышения температуры воздуха после увлажнения. Вентилятор наружного воздуха должен быть оснащен частотно-регулируемым приводом для поддержания постоянного давления в воздушном коллекторе.

Уходящие дымовые газы забираются из газохода за котлом и подаются на утилизацию в охладитель дымовых газов, где охлаждаются до температуры близкой к температуре точки росы (примерно 52 °С). Далее охлажденные дымовые газы направляются в конденсационную часть утилизатора, где осуществляется конденсация водяных паров. Осушенные дымовые газы посредством дымососа удаляются в атмосферу. Схема утилизации теплоты дымовых газов выполняется таким образом, что газы забираются из одного работающего котла, а удаляются через дымовую трубу соседнего неработающего котла. Схема позволяет осуществлять реверсивную подачу дымовых газов на утилизацию и далее в атмосферу, используя пару котлов, стоящих рядом. Утилизируемое тепло дымовых газов передается обратной сетевой воде. Поступающая из тепловой сети обратная вода перед утилизацией разделяется на несколько частей. Основная часть (примерно 86 %) поступает непосредственно на вход котла. Другая часть подается на воздухоподогреватель, где ее температура снижается до 20 °С, чтобы интенсифицировать процесс конденсации водяных паров из дымовых газов в утилизаторе. Кроме того, некоторый объем обратной воды подается в охладитель для предварительного охлаждения дымовых газов в сухом виде. Перед утилизатором оба потока воды смешиваются, а после него подогретая вода подается в основной поток обратной воды на входе в котел. При наличии низкопотенциальных потребителей они нагреваются водой за утилизатором в теплообменнике. Вода, нагревающая низкопотенциальных потребителей, циркулирует через теплообменник, тем самым увеличивая объем воды в утилизаторе и, соответственно, повышая теплосъем в конденсационной части утилизатора. Циркуляция низкопотенциального потребителя осуществляется собственным насосом потребителя, в зависимости от его назначения. Образующийся конденсат, частично может использоваться для увлажнения воздуха, а также подаваться на подпитку тепловой сети после очистки от растворенных в нем газов.

Результаты

Одним из эффективных методов решения широкого спектра задач, относящихся к высокотемпературным процессам и установкам, является математическое моделирование, выполняемое в программно-вычислительных комплексах. К числу этих комплексов, разработанных в технологии визуального программирования, относится и интерактивная информационно-моделирующая среда *Aspen Plus*. Данная среда обеспечивает возможность моделирования процессов, основанных на химическом и фазовом превращении, позволяет выполнять конструктивные расчеты и оценку стоимости оборудования. Для анализа основных энергетических показателей конденсационной установки и оптимизации ее режимов работы было выполнено моделирование приоритетной схемы (рис. 1) в среде *Aspen Plus*.

В настоящей схеме присутствуют тройники, теплообменники и реактор (топка котла). Настройка тройников (смесителей) осуществляется путем задания расходов или долей двух потоков, входящих или выходящих из элемента. Топка котла моделируется в качестве реактора Гиббса, который рассчитывает химическое и термодинамическое равновесие за счет минимизации разницы энергии Гиббса продуктов и исходных веществ. Фактически данный реактор можно использовать для большинства химических процессов в энергетике и технологии (горение, пиролиз, газификация и т.д.).

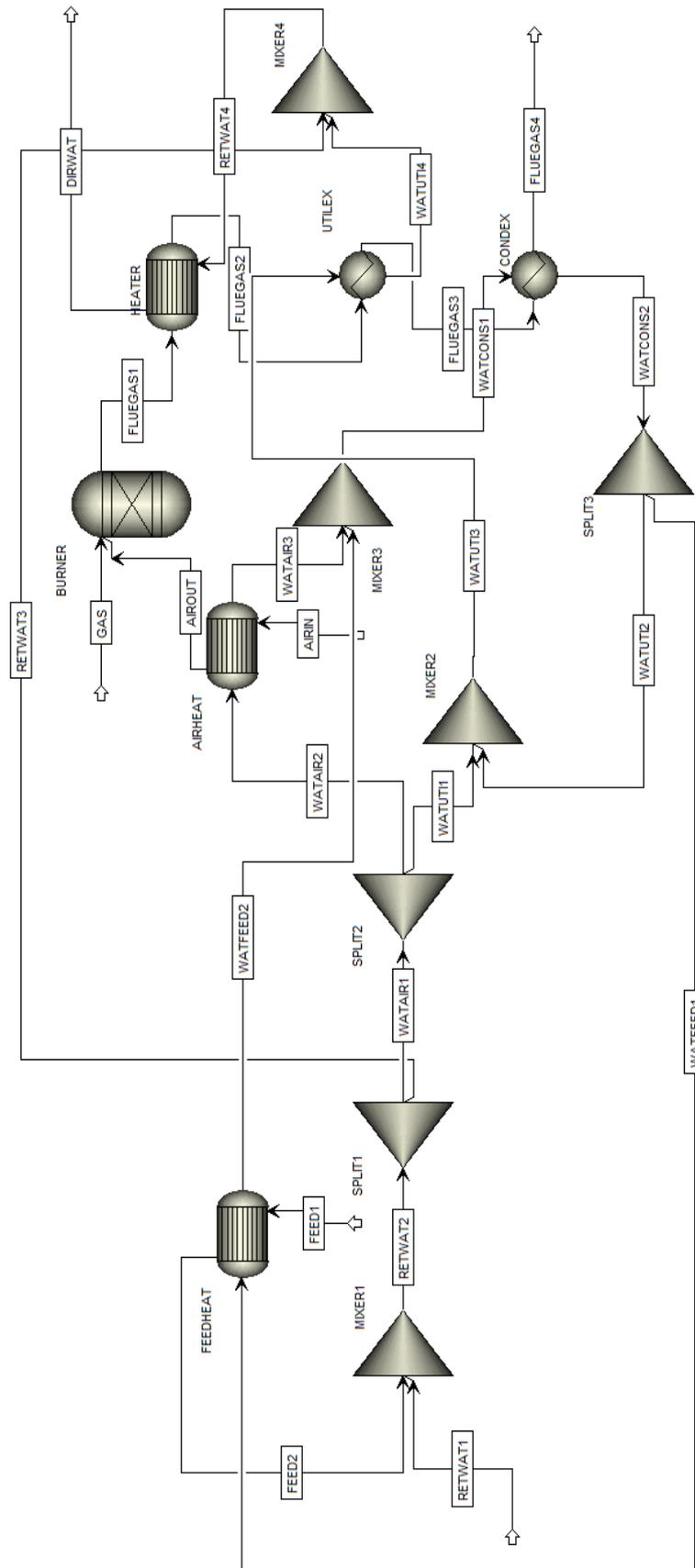
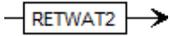
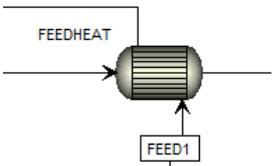
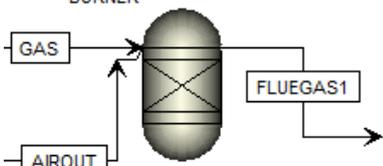
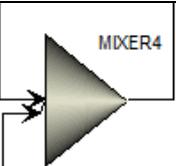
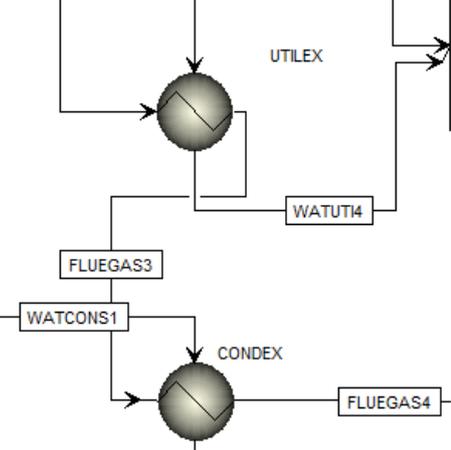


Рис. 1. Установка глубокой утилизации тепла дымовых газов в среде Aspen Plus

На рис. 1 представлена расчетная модель, которая включает в себя следующие позиции (табл. 1).

Расчетные блоки в среде Aspen Plus

№	Элемент	Функция
1		Материальный поток (природный газ, вода, воздух, дымовые газы)
2		Теплообменное оборудование (подогреватель сырой воды, подогреватель воздуха, поверхности нагрева в котельном агрегате).
3		Топка котельного агрегата. Расчет параметров исходящего материального потока основан на минимизации энергии Гиббса для химически реагирующей системы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия.
4		Тройники (смесители) в водяном контуре.
5		Система глубокой утилизации тепла конденсата (два теплообменника для охлаждения дымовых газов и конденсации влаги).

Для моделирования топки водогрейного котельного агрегата достаточно задать следующие условия: расчет фазового и химического равновесия, давление в реакторе (если выставить 0 бар, то программа воспринимает это как отсутствие потерь и ориентируется на давление исходных веществ; задание абсолютного значения строго определит давление на выходе из реактора), тепловой эффект (в данном примере также рассматривается 0 Гкал/ч). Для завершения настройки модели необходимо нанести на схему пять теплообменных аппаратов (подогреватель сырой воды, подогреватель воздуха, поверхности нагрева в котельном агрегате, утилизатор теплоты дымовых газов и конденсатор). Корректный расчет теплообменного оборудования возможен при указании соответствующего критерия расчета, к примеру, температура холодного потока на выходе. Аналогично могут быть выбраны температуры на входе/выходе для любого из потоков, разница температура, фаза и др.

Обсуждение

Непосредственно конденсационная установка, состоящая из двух теплообменных поверхностей, в первом приближении может быть рассмотрена как классический теплообменный аппарат, в котором важно задать соответствующие критерии расчета во вкладке *Exchanger Specification*. В случае если исходных данных недостаточно, программа сигнализирует красным цветом напротив той позиции, которая требует доработки. Расчет в программе возможен только после того, как все красные предупреждения будут заменены на синие «галочки». По окончании ввода всех данных необходимо провести инициализацию системы и запустить расчет нажатием соответствующей кнопки на лицевой панели. Основными результатами проведенного расчета являются $T-Q$ диаграммы для целевых теплообменников (рис. 2 и 3): утилизатор теплоты дымовых газов и конденсатор.

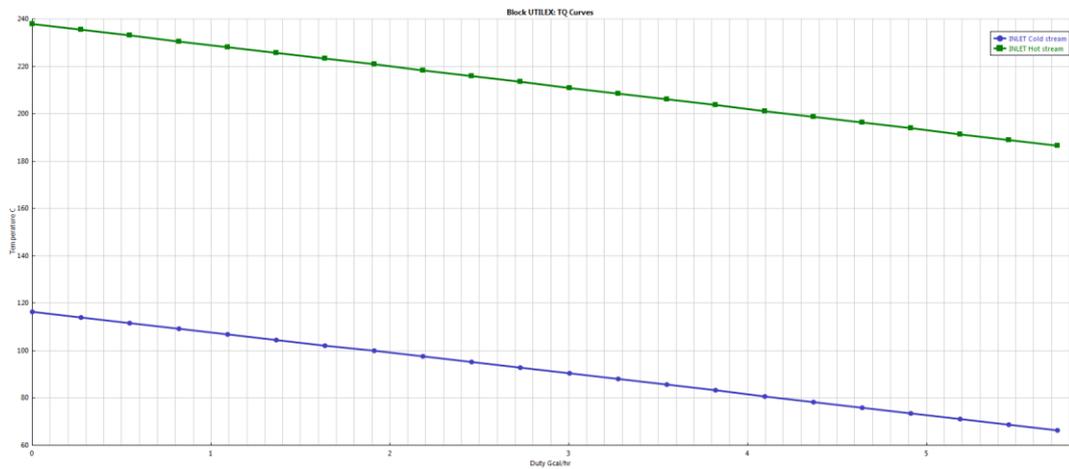


Рис. 2. Диаграмма для утилизатора теплоты дымовых газов

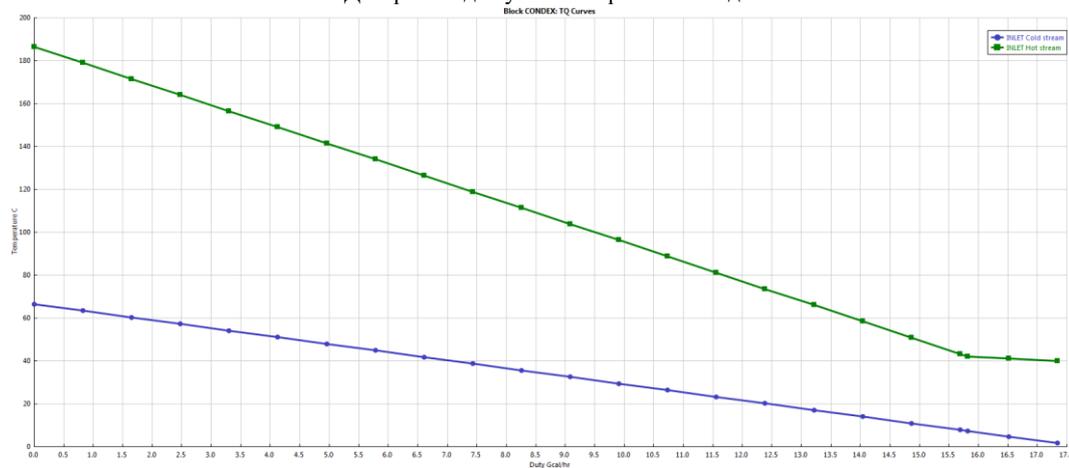


Рис. 3. Диаграмма для конденсатора

Таким образом, с помощью компьютерной программы *Aspen Plus* было выполнено моделирование схемы конденсационной установки на котельном агрегате ПТВМ-100 с уточнением оптимальных режимных параметров материальных потоков и теплообменного оборудования. Кроме того, расчетная модель позволяет в первом приближении оценивать выбросы парниковых газов в пересчете на углекислый газ. В частности, количество углекислого газа, содержащегося в продуктах горения природного газа, в данном случае составило 23569,6 кг/ч (рис. 4).

Main Flowsheet × Results Summary - CO2 Emissions × +		
Summary		
Hierarchy:	PLANT	
Net stream CO2e:	-191224	kg/hr
Utility CO2e:	0	kg/hr
Total CO2e:	-191224	kg/hr
Net carbon fee / tax:	0	\$/hr
Feed stream name		
	Flow	CO2e
	kg/hr	kg/hr
RETWAT1	2.25e+06	0
AIRIN	423487	0
GAS	8591.75	214794
Product stream name		
	Flow	CO2e
	kg/hr	kg/hr
FLUEGAS4	432079	23569.6
DIRWAT	2.4379e+06	0

Рис.4. Анализ эмиссии углекислого газа

Согласно проведенному расчету для котла ПТВМ-100 видно, что в максимальном

режиме эффект от охлаждения дымовых газов соизмерим с эффектом от конденсации. Во всех других случаях эффект от конденсации водяных паров в дымовых газах является наибольшим (рис. 5 и 6).

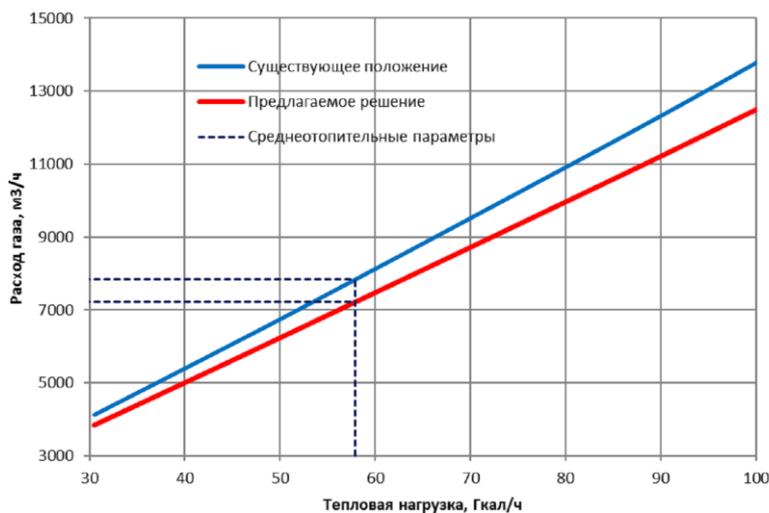


Рис. 5. Сравнительный график расхода топлива котлом

Необходимо отметить, что в данном случае рассмотрен самый распространенный случай с открытой системой теплоснабжения города, где величина подпитки тепловой сети существенна. Как показывают проведенные расчеты доля энергетического эффекта от использования нагрузки горячего водоснабжения (ГВС) в данной схеме составляет в зависимости от нагрузки котла от 50 до 60% от общего технически достигаемого результата, что является существенным фактором при принятии решения о внедрении данной технологии. Данная схема позволяет осуществлять регулировку распределения теплоносителя между элементами схемы, определять загрузку каждого элемента, находить граничные значения, проводить конструктивную и режимную оптимизацию.

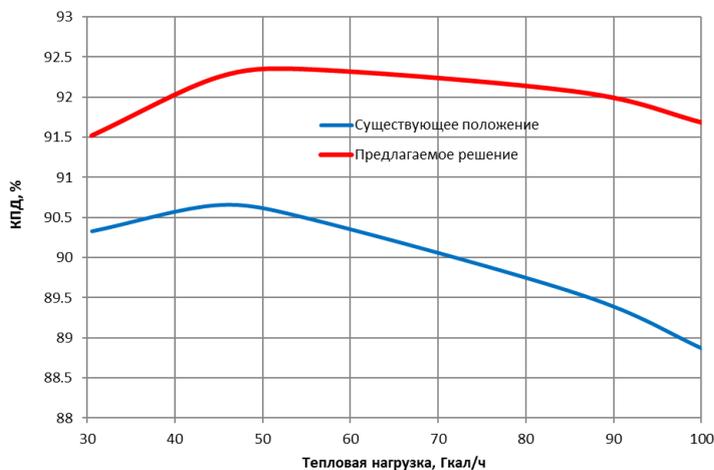


Рис. 6. Сравнительный график КПД котла

Заключение

Верификация расчетной модели выполнена для схемы котла ПТВМ-100 без и с подключенной утилизационной установки при работе в отопительном режиме. В качестве исходных данных приняты результаты проведенного обследования котельных агрегатов. В среднезимнем режиме подключенная отопительно-вентиляционная нагрузка составляет 44,6 Гкал/ч, нагрузка горячего водоснабжения – 7 Гкал/ч. Проведенные расчет показывают, что при использовании конденсационного котла достигается тройной энергетический эффект: используется физическая теплота уходящих газов; используется выделяющаяся при конденсации скрытая теплота парообразования; используется конденсат, выделяющийся из дымовых газов.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. За счет повышения температуры воздуха на горение снижаются потери с уходящими газами, повышается КПД котла.

2. Подогрев обратной воды перед котлом снижает нагрузку на котел и снижается расход топлива.

3. Наибольший эффект имеется при конденсации водяных паров в уходящих газах.

4. Наибольший эффект имеет место в системах с открытой системой теплоснабжения, с высокой нагрузкой на горячее водоснабжение.

Литература

1. Kovacevic M., Lambic M., Radovanovic L, et al. Increasing the Efficiency by Retrofitting Gas Boilers into a Condensing Heat Exchanger, *Energy Sources Pt B-Economics Planning and Policy*. 2017. V.12 (5). pp. 470-479.

2. Vigants G, Galindoms G, Veidenbergs I, et al. Efficiency diagram for district heating system with gas condensing unit. *Energy Procedia*. 2015. V.7. pp. 119-26.

3. Sippula O., Hokkinen, J., Puustinen, H., et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units. *Energy & Fuels*. 2009. N.23. pp. 2974-2982.

4. Grohn, A., Suonmaa, V., Auvinen, A., et al. Reduction of fine particle emissions from wood combustion with optimized condensing heat exchangers. *Environmental Science and Technology*. 2009. V.43. pp. 6269-6274.

5. EPSRC thermal management of Industrial processes // *Review of Industrial Condensing Boilers Technology & Cost*. 2010.

6. Burns, J.M., Tsou J. Modular steam condenser replacements using corrosion resistant high performance stainless steel tubing. 2018.

7. Che D., Liu Y., Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler. *Energy Conversion & Management*. 2004. V.45. pp. 3251-3266.

8. Hasan, A.; Kurnitski, J.; Jokiranta, K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. *Energy and Buildings*. 2009. V.41. pp. 470-479.

9. Satyavada H., Baldi S., Novel A. Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems, *Machines*. 2016. V.4. N. 2 P.10.

10. Хачалов М.А., Юркина М.Ю. Энергосбережение в теплогенерирующих установках за счет глубокого охлаждения продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах. Сб. трудов НИУ «МЭИ», г. Москва, 2007. С. 311-316.

11. Шадек Е., Маршак Б., Крыкин И., и др. Конденсационный теплообменник-утилизатор – модернизация котельных установок // *Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ*. 2014. № 3 (24).

12. Кудинов А. А., Зиганшина С. К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. 374 С.

13. Lazzarin R. The importance of the modulation ratio in the boilers installed in refurbished buildings. *Energy Build* 2014. V.75. pp. 43–50.

14. Dan-Teodor Bălănescu, Vlad-Mario Homutescu Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels. *Procedia Manufacturing*. 2019 .V.32. pp.504-512.

15. Жигурс А., Церс А., Плискачев С. Опыт АО «Ригас Силтумс» в реконструкции водогрейных котлов КВГМ-50 и КВГМ-100 // *Новости теплоснабжения*. 2009, № 4. С. 34-39.

16. Mohammed Amer, Miao-Ru Chen, Uzair Sajjad, et al. For suitability of plastic heat exchangers for dehumidification applications. *Applied Thermal Engineering*. 2019. V.158. P. 113-827.

17. Kevin Michael Smith, Svend Svendsen Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments. *Energy and Buildings*. 2015.V.107 .pp. 1-10.

Авторы публикации

Михин Антон Александрович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия.

Сергеев Виталий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия.

References

1. Kovacevic M, Lambic M, Radovanovic L, et al. *Increasing the Efficiency by Retrofitting Gas Boilers into a Condensing Heat Exchanger, Energy Sources Pt B - Economics Planning and Policy*. 2017;12(5):470-479.

2. Vigants G, Galindoms G, Veidenbergs I, et al. Efficiency diagram for district heating system with gas condensing unit. *Energy Procedia*.2015; 72:119–26.

3. Sippula O, Hokkinen J, Puustinen H, et al. Particle emissions from small wood-fired district heating units. *Energy & Fuels*. 2009;23:2974-2982.
4. Grohn A, Suonmaa V, Auvinen A, et al. Reduction of fine particle emissions from wood combustion with optimized condensing heat exchangers. *Environmental Science and Technology*. 2009;43:6269-6274.
5. EPSRC thermal management of Industrial processes. Review of Industrial Condensing Boilers. *Technology & Cost*. 2010.
6. Burns JM, Tsou J. *Modular steam condenser replacements using corrosion resistant high performance stainless steel tubing*. 2018.
7. Che D, Liu Y, Gao C. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler. *Energy Conversion & Management*. 2004;45:3251-3266.
8. Hasan A, Kurnitski J, Jokiranta K. A combined low temperature water heating system consisting of radiators and floor heating. *Energy and Buildings*. 2009;41:470-479.
9. Satyavada H, Baldi S. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems, *Machines*. 2016;42:10.
10. Khachalov MA, Yurkina MYu. Energy saving in heat generating plants due to deep cooling of combustion products in condensing heat exchangers. *Proceedings of MPEI conference, Moscow, 2007*. pp. 311-316.
11. Shadek E, Marshak B, Krykin I, et al. Condensing heat exchanger-utilizer-modernization of boiler plants. *Promyshlennye i otopitelnye kotelnye i mini-TEZ*. 2014;3 (24).
12. Kudinov AA, Ziganshina SK. *Energy Saving in heat power engineering and heat technologies*. Moscow: Mashinostroenie, 2011. 374 p.
13. Lazzarin R. The importance of the modulation ratio in the boilers installed in refurbished buildings. *Energy Build*. 2014;75:43–50.
14. Dan-Teodor Bălănescu, Vlad-Mario. Homutescu Study on condensing boiler technology potential accounting various fuels. *Procedia Manufacturing*. 2019;32 :504–512.
15. Zhigurs A, Tsers A, Pliskachev S. Experience of JSC "Rigas siltums" in the reconstruction of hot water boilers KVGM-50 and KVGM-100. *Novosti teplosnabgenia*. 2009;4:34-39.
16. Mohammed Amer, Miao-Ru Chen, Uzair Sajjad, et al. Experiments for suitability of plastic heat exchangers for dehumidification applications. *Applied Thermal Engineering*, 2019;158:113-827.
17. Kevin Michael Smith, Svend Svendsen. Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments. *Energy and Buildings*. 2015;107:1-10.

Authors of the publication

Anton A. Mikhin – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Vitaliy V. Sergeev – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

22 ноября 2019 г.



ПРИМЕНЕНИЕ УНИФИЦИРОВАННЫХ БЛОКОВ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.И. Полищук², М.В. Крицкий¹, Д.М. Баннов¹, С.В. Малышев¹

¹Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

г. Барнаул, Россия

polischuk_vi@mail.ru

Резюме: Статья посвящена актуальной тематике, связанной с выявлением дефектов в роторной обмотке электрических машин. В основу положено экспериментальное снятие и цифровая обработка электрических сигналов с контролируемых обмоток. Исследование проведено с использованием двух экспериментальных установок, для асинхронного двигателя и синхронного генератора соответственно. Отличительная особенность предлагаемых исследовательских стендов – в решении задач цифровой обработки и анализа данных на основе применения блока микропроцессорной релейной защиты БМРЗ отечественной разработки. Применен также метод вейвлет-разложения для выделения детализирующей компоненты. Приведены результаты экспериментов для обрыва в стержне короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Показано, что микропроцессорное устройство БМРЗ способно проводить оцифровку с частотой дискретизации, удовлетворяющей требованиям, и в совокупности с алгоритмами обработки данных, осуществляющими селективное определение трудновывяемых дефектов, применимо в задачах диагностики электрических машин.

Ключевые слова: микропроцессорный блок релейной защиты, экспериментальные исследования, лабораторная установка, система диагностики.

Для цитирования: Полищук В.И., Крицкий М.В., Баннов Д.М., Малышев С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 93-100. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100.

APPLICATION OF UNIFIED MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION UNITS IN ELECTRICAL MACHINE DIAGNOSTICS

VI Polishchuk², MV Kritsky¹, DM Bannov¹, SV Malyshev¹

¹Samara State Technical University, Samara, Russia

²Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

polischuk_vi@mail.ru

Abstract: The article concentrates on the topical issue connected with the detection of defects in the rotor winding of electric machines. The experimental sampling and digital processing of electrical signals from controlled windings is in the basis. The authors conducted the research using two experimental units for asynchronous motor and synchronous generator, respectively. A distinctive feature of the proposed research stands is in solving the problems of digital processing and data analysis on the basis of the application of microprocessor relay protection unit BMRZ developed in Russia. The authors applied method of wavelet decomposition to select the detailing component. They also presented the results of experiments for the breakage in the short-circuit rotor of an asynchronous motor and proved

that the microprocessor-based BMRZ device is capable of digitizing at a sampling rate that meets the requirements, and in conjunction with the data processing algorithms that carry out the selective determination of hard-to-detect defects, is applicable in the diagnosis of electrical machines.

Keywords: microprocessor relay protection unit, experimental studies, laboratory installation, diagnostic system.

For citation: Polishchuk VI , Kritsky MV ,Bannov DM , Malyshev SV. Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(6):93-100. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100.

Введение

Роторные цепи электрических машин вследствие своих конструктивных особенностей и условий эксплуатации подвержены возникновению в них трудновывяемых дефектов, что в свою очередь может приводить к выходу их из строя, а значит к нарушениям технологических процессов и существенным финансовым издержкам [1-3]. В связи с этим очень важен вопрос диагностики электрических машин переменного тока, особенно мощных двигателей и генераторов. Интерес специалистов и ученых к вопросам эксплуатационной диагностики в настоящее время высок [4,5]. Однако используемые в России для целей диагностики и защиты технические средства, как правило, не обладают достаточными функциональными возможностями, так, например, стандартные средства РЗА в основном реализуют функции токовой защиты и не осуществляют диагностику неисправностей электрических машин [6-8]. При разработке устройств релейной защиты и систем технической диагностики электроэнергетического оборудования, базирующихся на новых методах обработки цифровой информации, всегда остро стоит вопрос об аппаратных средствах для их реализации, в том числе, чтобы элементная база действующего устройства содержала как можно меньше «дефицитных» и импортных частей или позволяла бы использовать штатную аппаратную часть [9-11].

В настоящее время большинство устройств систем технической диагностики сложных электроэнергетических объектов разрабатывается на микропроцессорной функциональной основе [12]. Диагностические же сигналы получают с измерительных датчиков, как правило, аналоговых. Использование возможностей цифровой обработки диагностических сигналов имеет широкие возможности по качественному выделению полезной информации алгоритмами цифровой фильтрации, алгоритмов корреляционного анализа, спектрального анализа, обратной сверки, специальных алгоритмов линейного предсказания и методов искусственного интеллекта [13, 14].

В рамках решения общей актуальной задачи по разработке технических решений, направленных на своевременное выявление дефектов в роторной обмотке машин переменного тока, нами предлагается применение унифицированного блока микропроцессорной релейной защиты отечественной разработки для цифровой обработки и анализа данных о фазных токах статорной обмотки.

Материалы и методы

Основой для аппаратной реализации выступает микропроцессорный блок БМРЗ, а в качестве алгоритмической основы – вейвлет-преобразование. На рис. 1 представлен алгоритм предлагаемого на этой базе метода обработки данных.

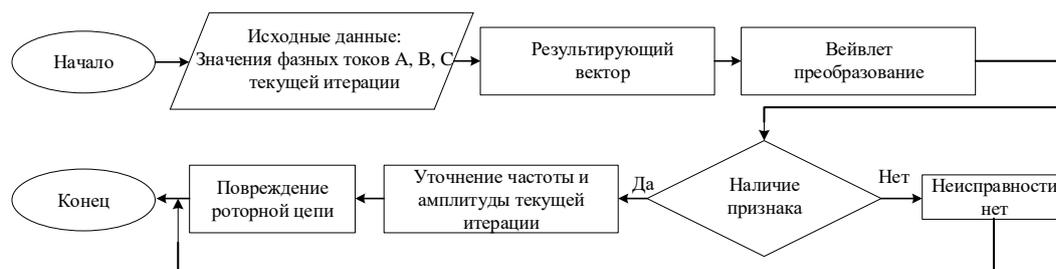


Рис. 1. Алгоритм обработки данных

Обработка сигналов токов осуществляется посредством блока типа БМРЗ-152-2Д-КЛ¹. Информационными сигналами выступают токи и напряжения от стандартных датчиков (трансформаторов тока (ТТ)). На рис. 2 схематично изображена функциональная схема работы микропроцессорного блока, в которой показана последовательность прохождения получаемого аналогового сигнала от ТТ (ТА) с последующим сбором и объединением в единый массив данных мультиплексорным устройством (МПл), их оцифровкой АЦП. Оцифрованные сигналы поступают на входы портов ввода-вывода (ПВВ) для последующей работы процессора. Сигнал о возникновении повреждения вырабатывается арифметико-логическим устройством (АЛУ). АЛУ получает от оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) текущие значения оцифрованных аналоговых величин тока. При возникновении условий – уставки, заложенной в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ), происходит выработка выходного аварийного сигнала (АС). Управление устройством осуществляется обслуживающим персоналом как с клавиатуры (Кл) на лицевой стороне, так и дистанционно с ключа или удаленно по каналам связи RS-485. Основная необходимая информация отображается на дисплее устройства (ЖКИ).

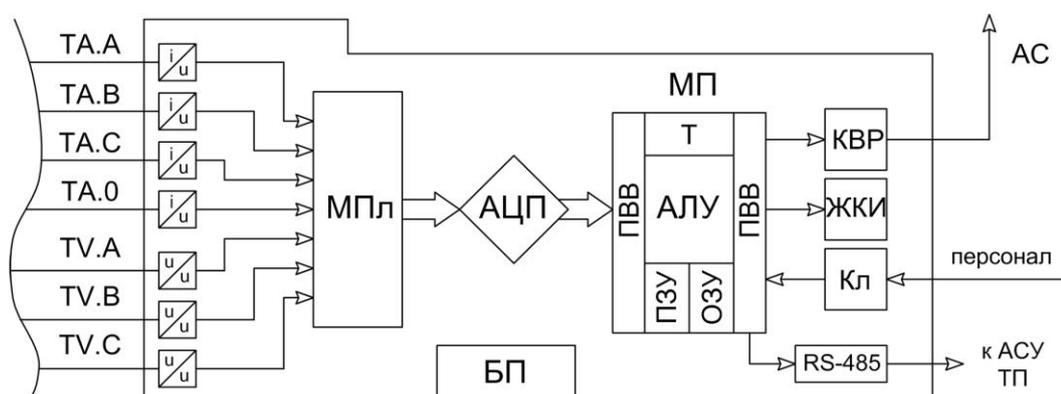


Рис. 2. Функциональная схема работы микропроцессорного устройства РЗА

Обрабатываются временные ряды экспериментально полученных статорных токов, оцифрованных с частотой 2400 Гц с использованием теории вейвлет-преобразования [15]. Вейвлет-анализу подвергается результирующий модуль вектора токов статора АД, определяемый через мгновенные значения фазных токов статора по формуле:

$$I_{OB} = \sqrt{(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)},$$

где I_{OB} – обобщенный вектор токов статора; I_A, I_B, I_C – мгновенные значения токов фаз статора.

Непрерывное прямое вейвлет-преобразование производится на основе следующего выражения:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt,$$

где ψ – вейвлет-коэффициенты; a – параметр масштаба; b – параметр времени; t – базисная функция.

Большие значения a соответствуют низким частотам, а маленькие значения b – высоким. В качестве базисной функции была выбрана функция Хаара. Уровень декомпозиции сигнала определяется десятью вейвлет-компонентами, используемыми при разложении [16].

Выделение диагностических признаков производится на базе разработанных авторами методов для диагностики обмотки ротора синхронного генератора (СГ) [17] и для обмотки ротора асинхронного двигателя АД [18] и, соответственно, используются две экспериментальные установки.

Для анализа работы АД при повреждениях роторной обмотки в различных режимах работы (холостой ход, нагрузка) создана экспериментальная установка со

1. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-152-КЛ-01. Руководство по эксплуатации ДИВГ.648228.039-02.03. НТЦ «Механотроника». 2017. 71 с.

следующим составом оборудования: АД мощностью 3 кВт, 1450 об/мин, максимальный ток 7,4 А; АД мощностью 3 кВт 1350 об/мин, с аппаратурой для выпрямления напряжения; микропроцессорный блок БМРЗ, на зажимы которого подаются исследуемые сигналы. Она представлена на рис. 3.

По аналогичному принципу собрана экспериментальная установка для исследования работы синхронного генератора (СГ) при наличии повреждения в обмотке ротора (витковое замыкание). Её внешний вид приведен на рис. 5. Она включает в себя двухполюсный синхронный генератор мощностью 2 кВА; привод на основе машины постоянного тока 110 В, 3000 об/мин с пусковой аппаратурой; регулируемый возбудитель выпрямленного напряжения для подключения роторной цепи; микропроцессорный блок БМРЗ, на зажимы которого подавались сигналы с датчиков тока и напряжения.

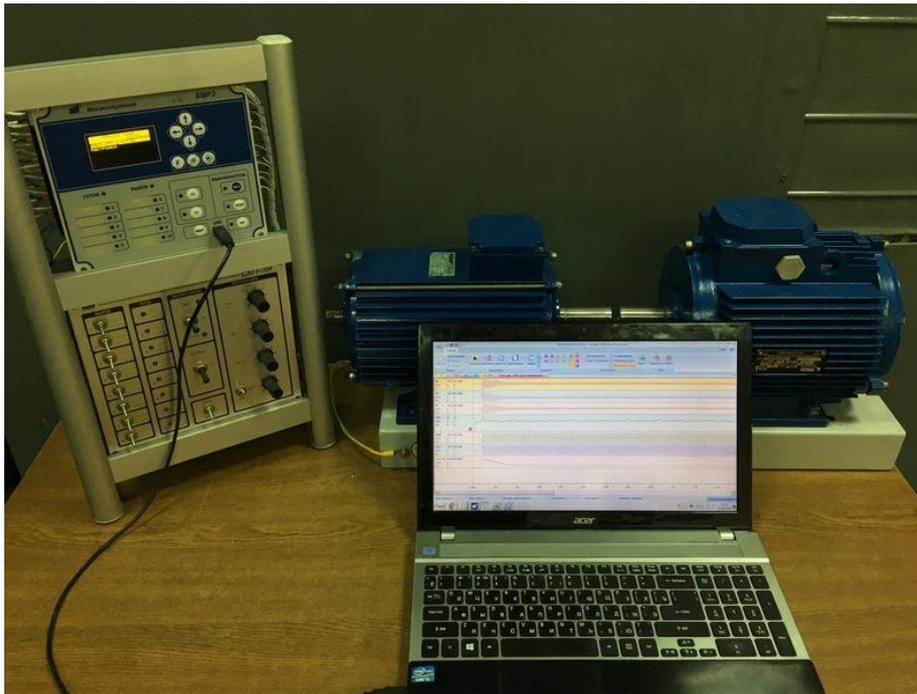


Рис. 3. Лабораторная установка для исследования работы АД

В качестве нагрузки к исследуемому АД посредством соединительной муфты присоединялся другой двигатель с режимом работы «электродинамический тормоз». Такое сочетание асинхронных машин хорошо показало свою пригодность к использованию для решения поставленных задач. Схема подключения испытуемого оборудования представлена на рис. 4

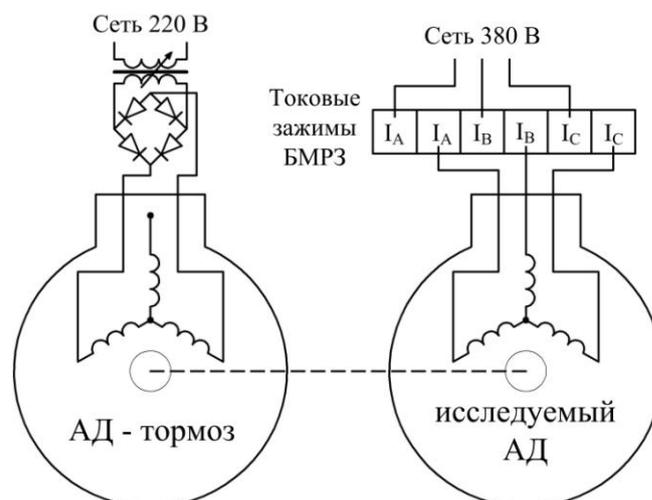


Рис. 4. Схема подключения АД



Рис. 5. Лабораторная установка для исследования работы СГ

Схема подключения синхронного генератора к микропроцессорному блоку показана на рис. 6.

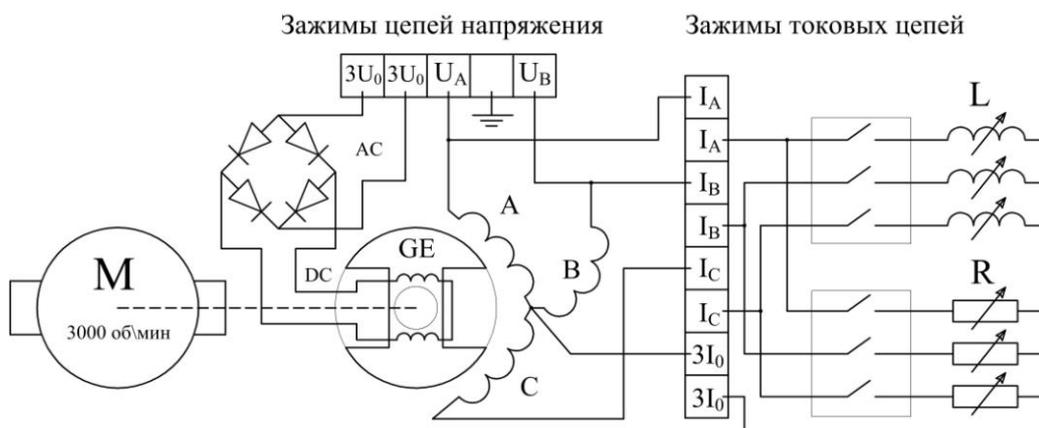


Рис. 6. Схема подключения СГ

Обсуждение результатов

В данной статье остановимся подробнее на результатах, касающихся АД.

Следует отметить, что полученные временные ряды имеют частоту дискретизации 2400 Гц, соответствующую 48 замерам за период, что вполне удовлетворяет требования технической диагностики.

На рис. 7 в качестве примера показана осциллограмма результирующего модуля вектора тока, определяемого через мгновенные значения фазных токов статорной обмотки АД, в режимах пуска, выхода на холостой ход и нагрузки. Полученный в БМР3 сигнал, представленный на рисунке в виде осциллограммы, также может быть открыт с помощью программного пакета *FastView* или в виде таблице *Excel*.

При поиске диагностического признака обрыва в стержне короткозамкнутого ротора АД наиболее информативной оказалась пятая детализирующая компонента (D5). D5-компонента, выделенная из обобщающего вектора тока АД при обрыве одного стержня из тридцати семи, увеличивается примерно в четыре раза, изменения в других компонентах не наблюдаются. С увеличением числа оборванных стержней D5

увеличивается, что свидетельствует о правильности выбора диагностического признака. В переходных режимах D5 также показывает рост, что потребовало отстройки критерия повреждения от переходных режимов.

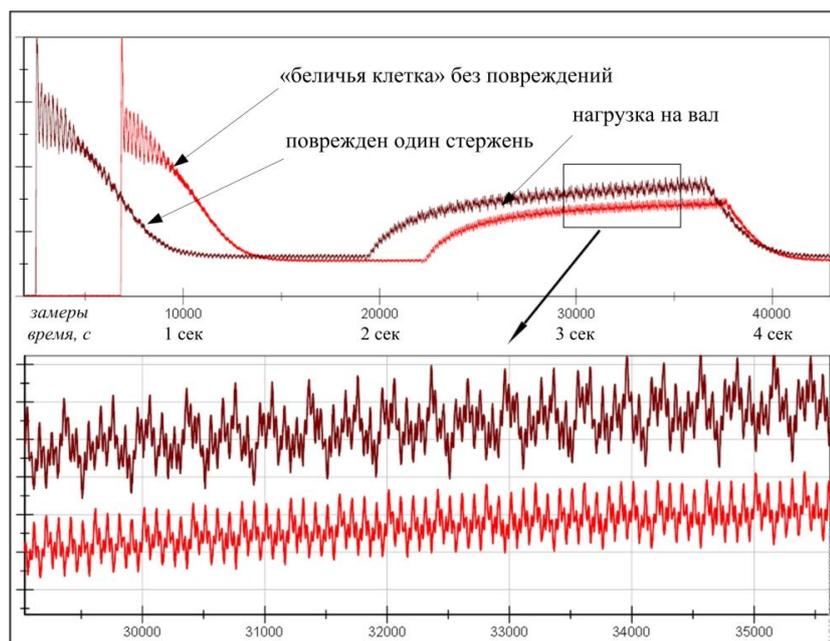


Рис. 7. Полученная от БМР3 осциллограмма результирующего тока статора АД

Заключение

Технические характеристики штатного микропроцессорного устройства релейной защиты БЗРМ дают возможность использовать его в качестве элемента сбора и обработки данных при разработке новых защитно-диагностических устройств синхронных генераторов и асинхронных двигателей. В совокупности с алгоритмами обработки данных, осуществляющими селективное определение трудновывяемого дефекта и идентифицирующими изменение технического состояния электрических машин, унифицированные блоки микропроцессорной релейной защиты применимы для задач технической диагностики электрических машин.

Литература

1. Kurilin S.P., Denisov V. N. The development of topological diagnostic methods of asynchronous electric machines // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Iss. 6. pp. 214-221.
2. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 38-44.
3. Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. V.92 (1-4). pp. 917-928.
4. Mazzoletti M.A. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. V 64. Is. 9. pp. 7218-7228.
5. Коробейников А.Б. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития // *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 1 (26). С. 4-9.
6. Bernat P., Нутка Z., Касор P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field // *Proceedings of the 2015 16th international scientific conference on electric power engineering (EPE)*. 2015. pp. 691-696.
7. Шевчук В.А. Сравнение методов диагностики асинхронного двигателя // *Международный студенческий научный вестник*. 2015. № 3-4. С. 419-423.
8. Сидельников Л.Г. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013. № 7. С. 127-137.
9. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines // *Frontiers in Energy*. 2013.V.7. Is. 3. pp. 271-278.
10. Федоров М.М. Метод диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных

обмотках асинхронных двигателей // Взрывозащищенное электрооборудование. 2011. № 1. С. 168-174.

11. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review // *Electromagnetics*. 2006. V.26. Iss. 7. pp. 543-569.

12. Ковалев А.А, Галкин А.Г. Надежность и техническая диагностика устройств электроэнергетики. Екатеринбург: изд-во УрГУПС. 2014. 105 с.

13. Бушнев Д.В., Романов А.В. Теоретические основы цифровой обработки сигналов. Воронеж: Воронежский государственный технический университет. 2005. 116 с.

14. Дьяков А.Ф., Овчаренко Н.И. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. М.: Издательский дом МЭИ. 2010. 336 с.

15. Глазырина Т.А. Совершенствование методов диагностики асинхронных двигателей на основе анализа потребляемых токов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Томск, 2012. 120 с.

16. Полищук В.И., Глазырин А.С., Глазырина Т.А. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин // *Электричество*. 2012. № 6. С. 42-45.

17. Полищук В.И. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых замыканий обмотки ротора // Патент РФ № 2546131. 10.04.2015. Бюл. №10.

18. Баннов Д.М., Полищук В.И., Разработка усовершенствованного метода диагностирования дефектов роторной обмотки асинхронных двигателей // Международная молодежная научная конференция «Королевские чтения» (Самара 03-05 октября 2017 г.). Самара: Издательство Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. 2017. С. 495-497.

Авторы публикации

Полищук Владимир Иосифович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова.

Крицкий Михаил Викторович – аспирант, Самарский государственный технический университет.

Баннов Дмитрий Михайлович – аспирант, Самарский государственный технический университет.

Малышев Сергей Викторович – аспирант, Самарский государственный технический университет.

References

1. Kurilin SP, Denisov VN. The development of topological diagnostic methods of asynchronous electric machines. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018;6:214-221.

2. Bryakin IV, Bochkarev IV, Kelebaev KK. Diagnostika parametrov elektricheskikh mashin peremennogo toka. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2017;4(37):38-44.

3. Broken rotor bar fault diagnosis using fast Fourier transform applied to field-oriented control induction machine: simulation and experimental study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92 (1-4):917-928.

4. Mazzoletti MA. A model-based strategy for interturn short-circuit fault diagnosis in PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017;6(49):7218-7228.

5. Korobeinikov AB. Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya elektrodvigateli i perspektivy ikh razvitiya. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2015;1(26):4-9.

6. Bernat P, Hytka Z, Kacor P. Indication of failures of rotor bar on induction machine with squirrel cage rotor in its external electromagnetic field. *Proceedings of the 2015 16th international scientific conference on electric power engineering (EPE)*. 2015. pp.691-696.

7. Shevchuk VA. Sravnenie metodov diagnostiki asinkhronnogo dvigatelya. *Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik*. 2015;3-4:419-423.

8. Sidel'nikov LG. Obzor metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei v protsesse ekspluatatsii. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*. 2013;7:127-137.

9. Babaa F. Experimental investigation and comparative study of interturn short-circuits and unbalanced voltage supply in induction machines. *Frontiers in Energy*. 2013;7(3):271-278.

10. Fedorov MM. Metod diagnostirovaniya obryvov i mezhvitkovykh замыканий v statornykh obmotkakh asinkhronnykh dvigatelei. *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovanie*. 2011;1:168-174.

11. Faiz J, Ebrahimi BV, Sharifian MB. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review. *Electromagnetics*. 2006;26(7):543-569.

12. Kovalev AA, Galkin AG. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika ustroystv elektroenergetiki*. Ekaterinburg: izd-vo UrGUPS. 2014. P.105 .
13. Bushnev DV, Romanov AV. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoi obrabotki signalov*. Voronezh: Voronezh. gosudarstvennyi. tekhnicheskii universitet. 2005. P.116 .
14. D'yakov AF, Ovcharenko NI. *Mikroprotsessornaya avtomatika i releinaya zashchita elektroenergeticheskikh sistem*. M.: Izdatel'skii dom MEI. 2010. P. 336.
15. Glazyrina TA. *Sovershenstvovanie metodov diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei na osnove analiza potrebyaemykh tokov*: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.02. Tomsk, 2012. P. 120.
16. Polishchuk VI, Glazyrin AS, Glazyrina TA. Funktsional'naya veivlet-diagnostika sostoyaniya obmotok rotorov trekhfaznykh elektricheskikh mashin. *Elektrichestvo*. 2012;6:42-45.
17. Polishchuk VI. *Sposob zashchity sinkhronnoi elektricheskoi mashiny ot vitkovykh zamykaniy obmotki rotora*. Patent RF № 2546131. Byul. №10.
18. Bannov DM, Polishchuk VI. Razrabotka usovershenstvovannogo metoda diagnostirovaniya defektov rotnoi obmotki asinkhronnykh dvigatelei. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Korolevskie chteniya»* (Samara 03-05 Okt 2017.). Samara: Izdatel'stvo Samarskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta imeni akademika SP.Koroleva, 2017.pp 495-497.

Authors of the publication

Vladimir I. Polishchuk – Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. Email: polischuk_vi@mail.ru.

Mikhail V. Kritsky – Samara State Technical University, Samara, Russia.

Dmitrii M. Bannov – Samara State Technical University, Samara, Russia.

Sergei V. Malyshev – Samara State Technical University, Samara, Russia.

Поступила в редакцию

24 октября 2019г.



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, А.М. Цветкович²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²АО «Татэнерго», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: На этапе проектирования и испытаний электромеханических преобразователей актуальным является анализ влияния параметрических возмущений на динамические свойства объекта с применением теории чувствительности, которая позволяет оценить качество работы машин в зависимости от условий эксплуатации. На основании системы дифференциальных уравнений электромеханического преобразователя постоянного тока получены уравнения чувствительности соответствующих координат по трем параметрам. Сформирована векторная структурная схема модели чувствительности, а также Simulink-модель, с помощью которой проведено моделирование и получены графики функций чувствительности, определяющие дополнительное движение объекта исследования при изменении параметров в заданных пределах. Показано, что наибольшие установившиеся значения функций чувствительности соответствуют изменениям момента инерции и влияние момента инерции на координаты объекта исследования является наиболее значительным. При этом наиболее чувствительной к вариациям параметров координатой является скорость вращения электромеханического преобразователя. Также решена задача статистического анализа погрешностей выходных координат электромеханического преобразователя в предположении нормального распределения параметрических возмущений. Проведено моделирование с вычислением дисперсий и относительных оценок влияния варьируемых параметров и получены графики, позволяющие оценить степень влияния параметрических возмущений.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, параметрические возмущения, анализ динамических свойств, модель чувствительности.

Для цитирования: 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. Т.21. № 6. С.101-110. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110.

FEATURES OF APPLICATION OF SENSITIVITY THEORY FOR ANALYSIS OF INFLUENCE OF PARAMETRIC DISTURBANCES ON DYNAMIC PROPERTIES ELECTROMECHANICAL CONVERTERS

NA Malev¹, OV Pogoditsky¹, AM Cvetkovich²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC "Tatenergo", Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: At the design and testing stage of electromechanical converters, the analysis of the influence of parametric perturbations on the dynamic properties of an object using sensitivity theory, which allows to evaluate the quality of operation of electrical machines depending on operating conditions, is relevant. Based on the system of differential equations of a DC motor, the sensitivity equations of the corresponding coordinates were obtained in three parameters. A vector structural scheme of the sensitivity model has been formed, as well as the Simulink-model, with the help of which sensitivity function plots were obtained, which determine the additional motion of the object of study when parameters change within specified limits. It is shown that the largest steady-state values of the sensitivity functions correspond to changes in the moment of inertia. It is revealed that the influence of the moment of inertia on the coordinates of the object of study is the

most significant. Where in the coordinate most sensitive to variations in parameters is the rotation speed of the electromechanical converter. The problem of statistical analysis of errors of the output coordinates of a DC motor under the assumption of normal distribution of parametric disturbances was also solved. Simulations were carried out and dispersions and relative estimates of the influence of variable parameters were calculated, and graphs were obtained to estimate the degree of influence of parametric disturbances.

Keywords: electromechanical converter, parametric disturbances, analysis of dynamic properties, sensitivity model.

For citation: 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. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-101-110.

Введение

Анализ влияния параметрических возмущений, обусловленных эксплуатационными воздействиями при функционировании электромеханических преобразователей (ЭМП) является актуальной задачей [1], поскольку позволяет заранее, на этапе проектирования оценить степень соответствия реального объекта и его математической модели. Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании и эксплуатации ЭМП, является задача учёта отклонений реальных значений параметров объектов от расчётных и обеспечения требуемого качества функционирования. Поэтому на этапе проектирования и испытаний опытных образцов с точки зрения инженерной практики целесообразным является использование подходов, базирующихся на методах теории чувствительности [2, 3, 4]. Применение методов теории чувствительности позволяет провести качественное и количественное исследование модели электромеханического преобразователя в заданном диапазоне изменения всей совокупности нестабильных параметров. Математический аппарат функций чувствительности – частных производных переменных состояния по соответствующим параметрам – дает возможность решения уравнений чувствительности, полученных непосредственно из известной математической модели электромеханического преобразователя. Предложенный в работе метод, основанный на использовании функций чувствительности, позволяет получить надежную оценку процесса функционирования ЭМП как при строго определенных, так и при стохастических вариациях параметров, выявить из множества нестабильных параметров наиболее влияющие и определить наиболее чувствительные к параметрическим возмущениям фазовые координаты.

Методы

Определим функции чувствительности для ЭМП постоянного тока, который описывается следующей системой дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [u \cdot 1(t) - R_a i(t) - c\omega(t)]; \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} [c i(t) - M_c \cdot 1(t)]. \end{cases} \quad (1)$$

Продифференцируем каждое из уравнений системы (1) по следующим параметрам: активному сопротивлению якоря R_a , индуктивности якоря L_a и моменту инерции J . В результате получим следующую систему уравнений чувствительности [5, 6, 7]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{R_a} = -\frac{1}{L_a} I_0 - \frac{R_a}{L_a} I_{R_a} - \frac{c}{L_a} \omega_{R_a}; \\ \dot{I}_{L_a} = \frac{R_a}{L_a^2} I_0 - \frac{R_a}{L_a} I_{L_a} + \frac{c}{L_a^2} \omega_0 - \frac{c}{L_a} \omega_{L_a} - \frac{1}{L_a^2} u; \\ \dot{I}_J = -\frac{R_a}{L_a} I_J - \frac{c}{L_a} \omega_J; \\ \dot{\omega}_{R_a} = \frac{c}{J} I_{R_a}; \\ \dot{\omega}_{L_a} = \frac{c}{J} I_{L_a}; \\ \dot{\omega}_J = -\frac{c}{J^2} I_0 + \frac{c}{J} I_J + \frac{1}{J^2} M_c. \end{cases} \quad (2)$$

Для приведения системы (2) к векторно-матричной форме

$$\dot{x}_\chi = A_\chi x_\chi + B_\chi u_0, \quad (3)$$

где x_χ – вектор чувствительности; χ – вектор параметров; A_χ – основная матрица системы (матрица Якоби); B_χ – матрица входа; u_0 – вектор номинальных значений входных координат, введем обозначения переменных состояния $x_1 = I_{R_a}; x_2 = I_{L_a}; x_3 = I_J; x_4 = \omega_{R_a}; x_5 = \omega_{L_a}; x_6 = \omega_J$ и перепишем систему (2):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R_a}{L_a} x_1 - \frac{c}{L_a} x_4 - \frac{1}{L_a} I_0; \\ \dot{x}_2 = -\frac{R_a}{L_a} x_2 - \frac{c}{L_a} x_5 + \frac{R_a}{L_a^2} I_0 + \frac{c}{L_a^2} \omega_0 - \frac{1}{L_a^2} u; \\ \dot{x}_3 = -\frac{R_a}{L_a} x_3 - \frac{c}{L_a} x_6; \\ \dot{x}_4 = \frac{c}{J} x_1; \\ \dot{x}_5 = \frac{c}{J} x_2; \\ \dot{x}_6 = \frac{c}{J} x_3 - \frac{c}{J^2} I_0 + \frac{1}{J^2} M_c. \end{cases} \quad (4)$$

Приведем систему дифференциальных уравнений чувствительности (4) к форме (3):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_a}{L_a} & 0 & 0 & -\frac{c}{L_a} \\ \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c}{J} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_a}{L_a^2} & \frac{c}{L_a^2} & -\frac{1}{L_a^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{J^2} & 0 & 0 & \frac{1}{J^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ \omega_0 \\ u \\ M_c \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Полученным соотношениям соответствует структурная схема для исследования влияния вариаций параметров R_a, L_a и J на динамические свойства ЭМП постоянного тока, представленная на рис. 1.

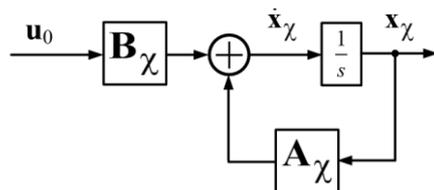


Рис. 1. Структурная схема вычисления вектора чувствительности

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассмотрим двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г [8]. Соответствующая Simulink – модель представлена на рис. 2.

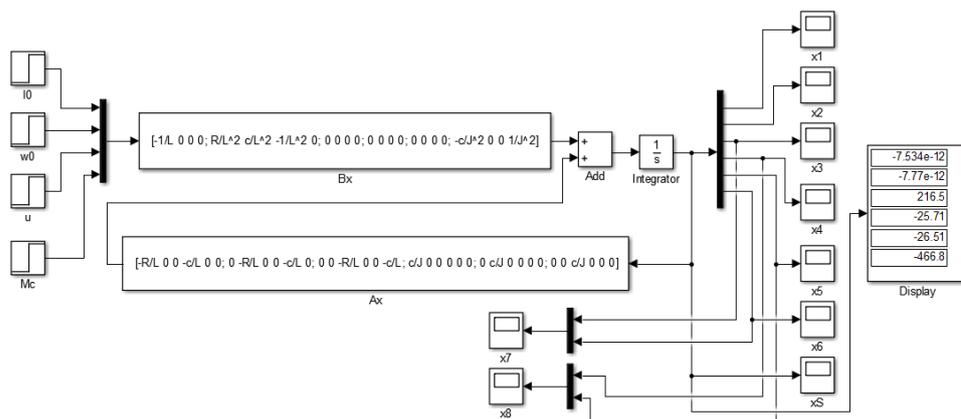


Рис. 2. Simulink – модель вычисления вектора чувствительности

Компоненты вектора входных координат $[I_0 \ \omega_0 \ u \ M_c]^T$ формируются на входе мультимплексора Mux в виде сигналов задания с блоков I0, w0, u, Mc. Блоки Bx и Ax служат для реализации матрицы входа B_χ и основной матрицы системы A_χ . В блоке Display отображаются числовые значения функций чувствительности по окончании переходного процесса. Как следует из рис. 2, координаты $x_1 = I_{Ra}$ и $x_2 = I_{La}$ с течением времени устанавливаются около нуля. Графики функций чувствительности $x_3 = I_J$ и $x_6 = \omega_J$, а также $x_4 = \omega_{Ra}$ и $x_5 = \omega_{La}$ отображаются в регистрирующих блоках x7 и x8 и представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

$$x_3(t), x_4(t)$$

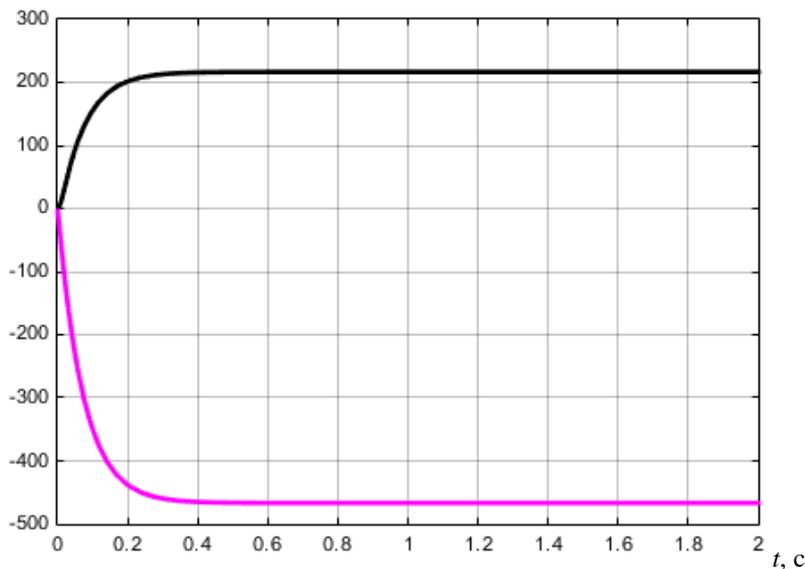


Рис. 3. Графики функций чувствительности $x_3(t)$ и $x_4(t)$

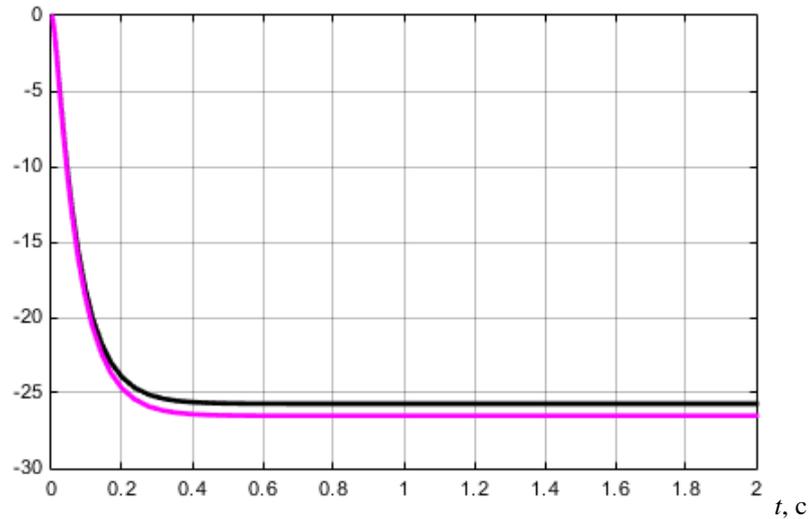


Рис. 4. Графики функций чувствительности $x_5(t)$ и $x_6(t)$

Из анализа полученных зависимостей следует, что переходные процессы завершаются примерно к 0,3 с. Максимальные установившиеся значения функций чувствительности соответствуют изменениям момента инерции (см. рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3, влияние момента инерции на координаты ЭМП является наиболее значительным [9]. Так, скорость вращения ω более, чем в 18 раз чувствительнее к вариациям момента инерции, чем к изменениям сопротивления и индуктивности, а ток якоря – более, чем в 8 раз.

Вариации сопротивления и индуктивности якоря практически не оказывают влияния на ток, как было показано выше, однако вызывают дополнительное движение относительно скорости вращения ω . Соответствующие графики для тока якоря и скорости вращения показаны на рис. 5.

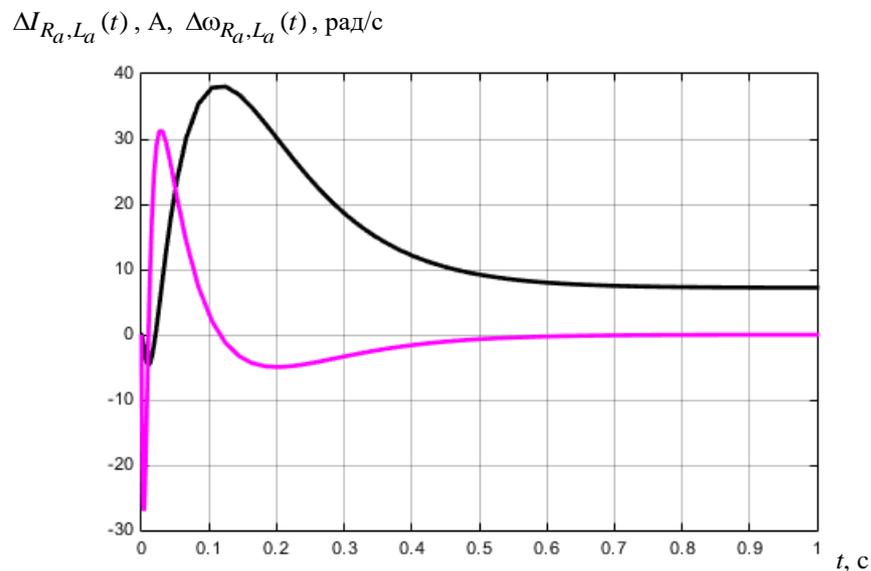


Рис. 5. Графики дополнительного движения $\Delta I_{R_a, L_a}(t)$ и $\Delta \omega_{R_a, L_a}(t)$

Моделирование проводилось при увеличении сопротивления и индуктивности якоря на 20%. Из рис. 5 видно, что дополнительное движение $\Delta I_{R_a, L_a}(t)$ устанавливается около нуля, т.е. вариации R_a и L_a не вносят погрешности в установившееся значение $I(t)$. Величина $\Delta \omega_{R_a, L_a}(t) = 7,2$ рад/с, что говорит о наличии погрешности по скорости вращения при изменении указанных параметров [10].

Следует отметить, что изменения параметров ЭМП являются недетерминированными [11, 12, 13, 14] и аппарат теории чувствительности для анализа динамических свойств ЭМП при случайных параметрических возмущениях является предпочтительным [15].

В инженерной практике для анализа статистических характеристик особое значение имеет гипотеза о нормальном (гауссовском) распределении отклонений параметров [16].

Нормальное распределение предполагает применение правила 3σ, когда среднеквадратическое отклонение σ *i*-го параметра определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{\Delta\chi_i}{3}. \tag{6}$$

Соответственно, дисперсия отклонения параметра Δχ_{*i*} определяется выражением

$$D_{\chi_i} = \sigma_i^2 = \frac{\Delta\chi_i^2}{9}. \tag{7}$$

Суммарная дисперсия выходной координаты для нормального распределения параметров

$$D_{x_i} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n (x_{\chi_i} \Delta\chi_i)^2. \tag{8}$$

Решение задачи оценки влияния каждого из *n* параметров на дополнительное движение может быть сведена к вычислению относительной оценки [17]

$$S_i = \frac{x_{\chi_i}^2 D_{x_i}}{\sum_{i=1}^n x_{\chi_i} D_{x_i}}. \tag{9}$$

Определим графики суммарной дисперсии и относительных оценок, полагая, что отклонения Δ*R_a*, Δ*L_a* и Δ*J* являются случайными и подчиняются нормальному закону распределения, а регистрируемой выходной координатой является скорость вращения ω [18].

Расчет суммарной дисперсии проведем в относительных единицах в форме

$$\Delta\chi_i = \frac{\partial x_i}{\partial \chi_i} \frac{\chi_0}{x_0} \frac{\Delta\chi}{\chi_0} = \frac{\partial x_i}{\partial \chi_i} \frac{\Delta\chi}{x_0}.$$

Схема вычисления относительных дисперсий и относительных оценок в соответствии с выражениями (7), (8), (9) показана на рис. 6.

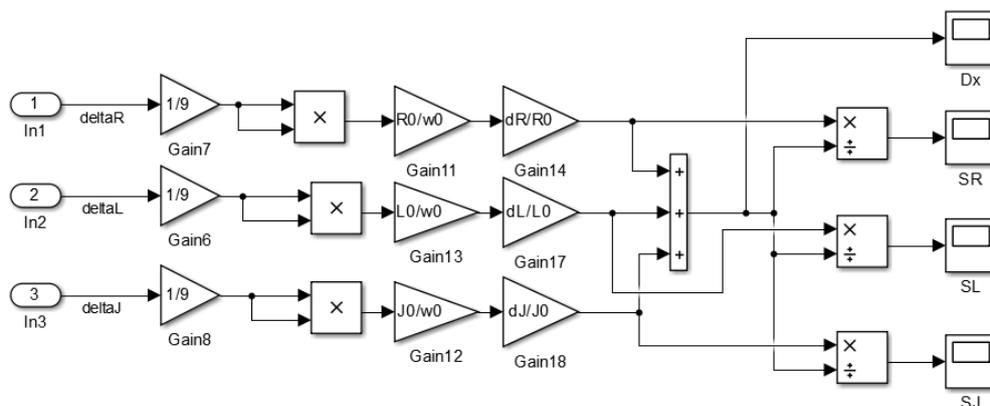


Рис. 6. Simulink – модель вычисления суммарной дисперсии и относительных оценок

Результаты моделирования представлены на рис. 7, 8. Суммарная относительная дисперсия D_x^* определяется переменными состояния $x_4 = \omega_{R_a}$, $x_5 = \omega_{L_a}$, $x_6 = \omega_J$, формируется на выходе сумматора схемы на рис. 6 и регистрируется в блоке *Dx*. В регистрирующих приборах *SR*, *SL*, *SJ* отображаются графики относительных оценок по параметрам *R_a*, *L_a* и *J* соответственно.

$D_x^*, D_{R_a}^*, D_{L_a}^*, D_J^*$, о.е.

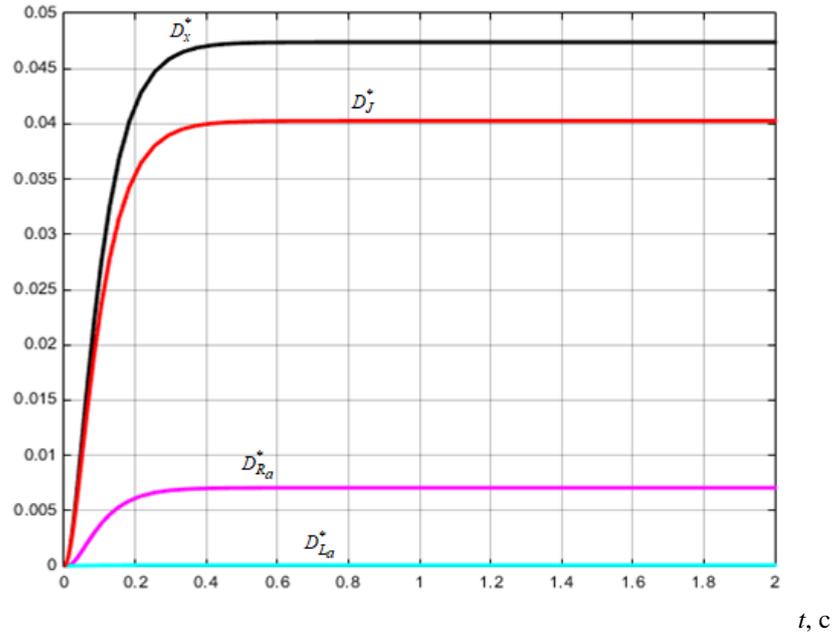


Рис. 7. Графики относительных дисперсий выходной координаты ω

Из анализа рис. 7 следует, что определяющий вклад в график суммарной относительной дисперсии $D_x^* = 0,0474$ о.е. вносит дисперсия при изменении момента инерции D_J^* , установившееся значение которой составляет 0,04 о.е.

S_{R_a}, S_{L_a}, S_J , о.е.

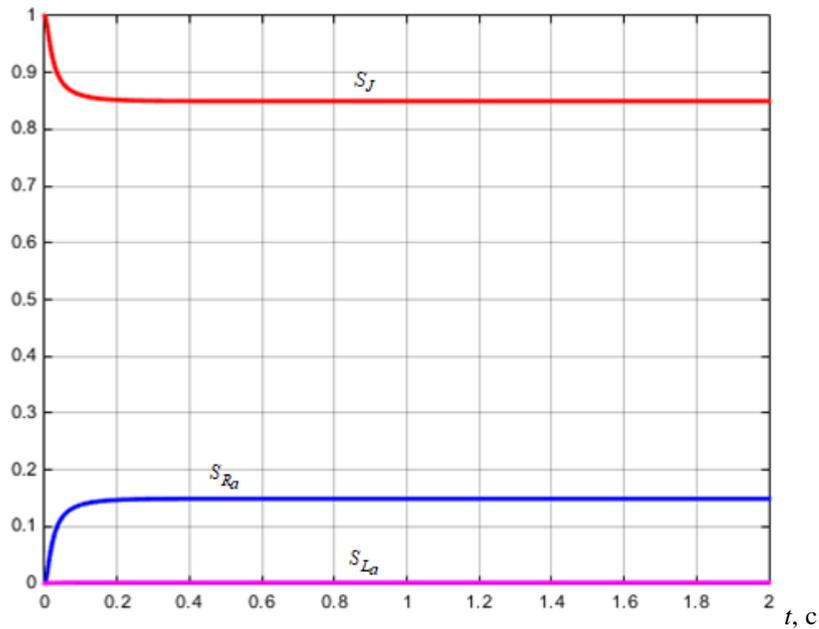


Рис. 8. Графики относительных оценок S_{R_a}, S_{L_a}, S_J

Графики относительных оценок, показанные на рис. 8, характеризуют погрешность, вносимую изменением параметра в отклонение выходной координаты. В установившемся режиме максимальную погрешность, равную 0,85 о.е. вносит изменение момента инерции. Относительная оценка $S_{R_a} = 0,15$ о.е., а $S_{L_a} = 0,0012$ о.е., то есть величина последней пренебрежимо мала.

Выводы

В работе рассмотрены особенности применения теории чувствительности для анализа динамических свойств электромеханических преобразователей при

параметрических возмущениях на примере машины постоянного тока. Сформирована структурная схема вычисления вектора чувствительности и проведено моделирование многомерной системы с вычислением функций чувствительности по току якоря и скорости вращения при изменении активного сопротивления, индуктивности якорной цепи и момента инерции. Моделирование проводилось как при детерминированном характере изменения параметров, так и при случайных изменениях в соответствии с нормальным законом распределения отклонений.

Показано, что наиболее чувствительной к вариациям параметров координатой является скорость вращения, а максимальную погрешность в её отклонение вносит момент инерции. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при решении задач анализа электромеханических преобразователей на этапах проектирования, испытаний опытных образцов, а также эксплуатации в процессе функционирования в составе рабочих комплексов.

Литература

1. Кислицын А.Л. Вопросы теории и проектирования электрических машин. Параметры и характеристики электрических машин в статических и динамических режимах. Сборник научных трудов. Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск: УлГТУ, 2017. 304 с.
2. Юсупов Р.М., Костельцев В.И. Возмущения структуры и функции чувствительности математических моделей при их алгоритмизации. Тезисы докладов. Т. 1 (5 СПб конференция «Региональная информатика – 96»). Санкт-Петербург. 1996.
3. Юсупов Р.М., Громько П.С., Панченко А.Е. Исследование эффективности сложных систем методами теории чувствительности и корреляционного анализа. Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение: Сборник научных трудов, АН СССР, М., 1981.
4. Zorzi M. Multivariate Spectral Estimation based on the concept of Optimal Prediction, IEEE Trans. Automat. Control. 2015. №60. pp. 1647-1652.
5. Levy B.C. and Nikoukhah R. Robust state-space filtering under incremental model perturbations subject to a relative entropy tolerance, IEEE Trans. Automat. Control. 2013. №58. pp. 682-695.
6. Иванов А.Н., Кузнецов П.М. Идентификация динамических систем на основе нелинейного матричного преобразования Ли // Вестник Уфимского гос. авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 2 (63). С. 237-242.
7. 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.
8. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., и др. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. №4. С.113-122.
9. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. №1-2. С.120-130.
10. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
11. Фуртат И.Б. Динамическая компенсация возмущений в условии насыщения сигнала управления // Управление большими системами. 2017. № 65. С. 24-40.
12. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. V.24, N. 17. pp. 2774-2784.
13. Поляк Б.Т., Тремба А.А., Хлебников М.В., и др. Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 6. С. 18-41.
14. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., и др. Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем // Вісник НТУ «ХПИ». 2015. №12(1121). С. 68-71.
15. Ивашин В.В., Пенчев В.П. Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // Электротехника. 2013. №6. С. 42-46.
16. Pabitra Kumar Behera., Manoj Kumar Behera., Amit Kumar Sahoo. Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique // International Journal of Computer Applications. Proceedings on International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication ETCC. 2014. №1. pp. 37-39.
17. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation // 2016 IEEE ANDESCON. 2016. pp. 1-4.

18. Pradeep Kumar, Mandeep Kumar, Surender Dahiya. Sensor Less Speed Control of PMSM using SVPWM Technique Based on MRAS Method for Various Speed and Load Variations // Proceedings of the World Congress on Engineering. 2015 pp. 198-204.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет, Россия. Email: maleev@mail.ru.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственного энергетического университета, Россия.

Цветкович Александр Михайлович – специалист первой категории Управления технического надзора Отдела надежности, охраны труда и пожарной безопасности АО «Татэнерго», г. Казань, Россия.

References

1. Kisilitsyn AL. Questions of the theory and design of electrical machines. Parameters and characteristics of electric cars in static and dynamic modes. *Collection of scientific papers*. Ulyanovsk State Technical University. Ulyanovsk: UIGTU, 2017. 304 p.
2. Yusupov RM, Kosteltsev VI. *Perturbations of the structure and sensitivity functions of mathematical models with their algorithmization. Theses of reports*. V.1. 5 St. Petersburg Conference “Regional Informatics-96”).1996.
3. Yusupov RM, Gromyko PS, Panchenko AE. Investigation of the effectiveness of complex systems by the methods of sensitivity theory and correlation analysis. Questions of cybernetics. *The theory of sensitivity and its application: Sat. scientific papers*. Academy of Sciences of the USSR. 1981.
4. Zorzi M. *Multivariate Spectral Estimation based on the concept of Optimal Prediction, IEEE Trans. Automat. Control*. 2015;60:1647-1652.
5. Levy BC and Nikoukhah R. Robust state-space filtering under incremental model perturbations subject to a relative entropy tolerance, *IEEE Trans. Automat. Control*. 2013;58:682-695.
6. Ivanov AN, Kuznetsov PM. Identification of dynamic systems based on nonlinear matrix Li transformation. *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2014;18:2 (63):237-242.
7. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1(1):88.
8. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):113-122.
9. Malev NA, Pogoditsky OV. Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2019;21 (1-2):120-130.
10. Malev NA, Pogoditsky OV. Research and synthesis of the modal regulator of the two-mass electromechanical system of the crane lifting mechanism. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2018;20(7-8):99-106.
11. Furtat I. Dynamic compensation of disturbances in the condition of control signal saturation. *Control of large systems*. 2017;6:24-40.
12. 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.
13. Polyak BT, Tremba AA, Khlebnikov MV, et al. Large deviations in linear systems with non-zero initial conditions. *Automation and Remote Control*. 2015;6:18-41.
14. Kuznetsov BI, Nikitina TB, Kolomiets VV, et al. Investigation of the influence of nonlinearities and variations in the parameters of the control object on the dynamic characteristics of electromechanical servo systems. *Visnik NTU "KhPI"*. 2015;12(1121):68-71.
15. Ivashin VV, Penchev VP. Features of the dynamics of work and energy diagrams of a pulsed electromagnetic drive with parallel and series connection of the excitation windings. *Electrical Engineering*. 2013;6:42-46.
16. Pabitra Kumar Behera, Manoj Kumar Behera, Amit Kumar Sahoo. Speed Control of Induction Motor using Scalar Control Technique. *International Journal of Computer Applications. Proceedings on International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication ETCC*. 2014;1:37-39.
17. Rojas-Moreno A. Parameter extraction of an induction motor with gearbox for dynamic simulation. 2016 *IEEE ANDESCON*. 2016. pp. 1-4.

18. Pradeep Kumar, Mandeep Kumar, Surender Dahiya. Sensor Less Speed Control of PMSM using SVPWM Technique Based on MRAS Method for Various Speed and Load Variations. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2015. pp. 198-204.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Russia. Email:maleev@mail.ru.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Russia.

Alexander M. Cvetkovich – JSC "Tatenergo", Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

7 октября 2019 г.



ИМПУЛЬСНЫЙ БЛОК ПИТАНИЯ ДЛЯ ПОРТАТИВНОГО ПРОТОННО-МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСНОГО РЕЛАКСОМЕТРА

Нгуен Тъи Киен*, Р.С. Кашаев, О.В. Козелков
Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5679-5442>, nckien@cnd.edu.vn

Резюме: В данной статье речь описан импульсный источник питания (ИИП), который важен для стабильной работы схем электронных устройств. ИИП непосредственно влияет также на режимы работы электрических цепей электронного оборудования. В частности, в этой статье представлена информация о применении ИИП в портативном протонно-магнитном резонансном (ПМР) релаксометре (ПМРР). Особое внимание обращается на метод построения схемы ИИП и сделано сравнение с трансформаторным источником питания. В статье представлена структурная блок-схема ИИП и его принципиальные схемы. Блок питания работает без трансформатора, что уменьшает размеры системы и повышает общую эффективность. Предлагаемая структура схемы основана на двухтактном контроллере, высокочастотном преобразователе с усилителем и схемой умножителя напряжения и стабилизатором напряжения. Результаты моделирования и эксперимента подтверждают предлагаемую конфигурацию ИИП.

Ключевые слова: ПМР-релаксометр; источник питания (ИП); КПД; ИИП.

Благодарности: Авторы благодарны кафедре Приборостроения и мехатроники Казанского государственного энергетического университета за поддержку в создании оборудования.

Для цитирования: Нгуен Тъи Киен, Кашаев Р.С., Козелков О.В. Импульсный блок питания для портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 6. С. 111-117. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-111-117.

THE IMPULSE POWER UNIT FOR A PORTABLE PROTON MAGNET RESONANCE RELAXOMETER

Nguyen Chi Kien*, R.S. Kashaev, O.V. Kozelkov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
nckien@cnd.edu.vn

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5679-5442>, nckien@cnd.edu.vn

Abstract: In this paper described the switching power supply (SPS) unit and represented its importance for electronic circuits in electronic devices. SPS directly affect the operation of electrical circuits and electronic equipment. In particular, this paper describes its use in a portable proton-magnetic resonance (PMR) relaxometer. Especial attention is to the method of constructing the circuit, and also deals with the compare of the SPS with a transformer power source. This article presents the structure of schematic diagram of the SPS. The SPS structure works without a transformer, which reduces the size of the system and increases overall efficiency. The proposed circuit structure is based on a push-pull controller, a high-frequency converter with an amplifier and a voltage multiplier circuit and a voltage stabilizer. The simulation and experiments confirm the proposed configuration of SPS.

Key words: PMR relaxometer; power source (IP); KPD; SPS.

Acknowledgments: The authors are grateful to the Department of Instrument Engineering and Mechatronics of Kazan State Power Engineering University for supporting research equipment.

For citation: Nguyen Chi Kien, Kashaev RS, Kozelkov OV. The impulse power unit for a portable proton magnet resonance relaxometer. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):111-117. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-6-111-117.

Введение

Источник питания (ИП) является очень важной частью какой-либо электрической цепи или электронного устройства. ИП напрямую влияют на режимы работы электронных схем или электрических и электронных устройств. Современное оборудование часто имеет довольно сложную структуру и требует различных напряжений для питания своих отдельных узлов. В случае одного ИП необходимо использовать специальные преобразователи для получения разных уровней напряжения, особенно для получения различных питающих напряжений в портативной аппаратуре [1-3]. Если в оборудовании, питающемся от сети, можно построить блок питания с необходимыми напряжениями, то в портативных аппаратах, работающих от автономных источников энергии, требуемые уровни напряжений можно получить только с использованием ИИП. В настоящее время ИИП чаще всего используется в электрических цепях и автоматизированных электрических системах. ИИП для портативного ПМР-релаксометра, достаточно актуальна в настоящее время.

Материалы и методы

В этом разделе описывается системная характеристика и конструкция ИИП в соответствии со спецификациями ПМР-релаксометра. Традиционный трансформаторный источник питания оснащен линейным стабилизатором, хотя стоимость низкая, и производительность также низкая, стабильность невысокая [5]. В данном случае использованы быть не могут, поскольку предполагается питание не только от сети, но и автономно – от аккумулятора в переносном варианте ПМРР [6].

Для питания электронной аппаратуры, вычислительной техники, схем управления и автоматики широко используются ИИП, которые обладают указанными требованиями. Логично применить ИИП и в нашем случае ввиду его малых габаритов и более высокого коэффициента полезного действия (КПД) $\approx 80-85\%$ по сравнению с КПД $\approx 70\%$, для ИП, например БП-2 Метаком с питанием от сети 220В [3,4,7].

Важными критериями при выборе ИИП является: потребляемый ток, уровень стабилизации напряжений, уровень пульсации напряжений, наличие систем защиты и массогабаритные размеры ИИП. Выход любой из указанных параметров за границы допустимых требований приводит к нарушениям в работе всего устройства. Одной из главных проблем построения ПМРР с питанием от аккумулятора является выбор схемотехники источника питания, который должен обеспечивать необходимую мощность при питании его напряжением аккумулятора (12В/2.3Аh). При этом следует учитывать разрядку аккумулятора и превышение его номинального напряжения непосредственно после его зарядки [4,15].

В составе блоков портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра важную роль занимает ИИП для обеспечения разных номиналов питающих напряжений устройств, входящих в ПМРР усилителей мощности импульсов (передатчика), усилителя сигналов (приемника), генератора импульсных последовательностей. От стабильности работы ИП зависит точность установки амплитуд, длительностей и синхронность возбуждающих сигнал импульсов, интервалов между ними, точность работы процессора в методиках, применяемых для измерений ПМР-релаксации. Поэтому, необходим ИИП, преобразующий выходное напряжение аккумулятора в набор напряжений: +20В/1А для передатчика; +9В/0.5А, -6В/0.5А для приемника, +5В/1А для генератора импульсных последовательностей [8,10].

Целью настоящей работы является разработка и исследование ИИП от аккумулятора для ПМРР с ограничениями по габаритам 45×140 мм.

Обобщенная структурная блок-схема ИИП приведена на рис.1.

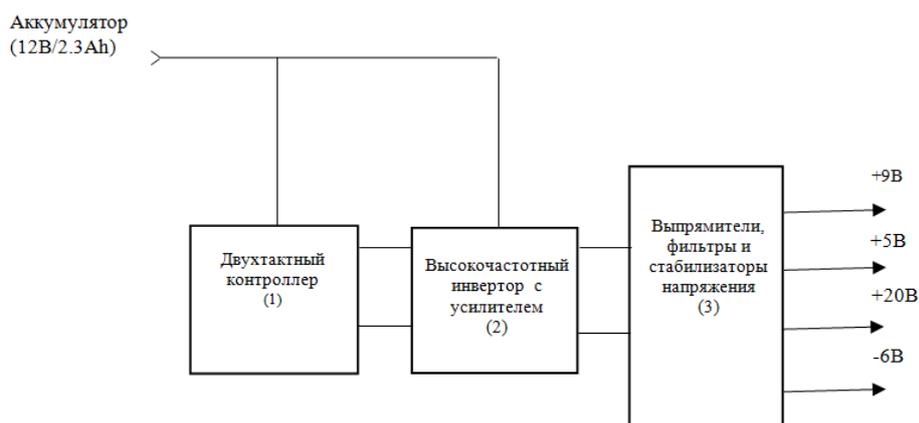


Рис.1. Структурная блок схема ИИП

ИИП состоит из трёх основных блоков:

1. Двухтактного контроллера электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА), имеющих входные выборные частоты и компактный корпус с малым потребляемым мощностью и минимальное количество навесных элементов [12].

2. Высокочастотного инвертора с усилителем, дающего разные уровни напряжения.

3. Выходных выпрямителей с Г-образным фильтром и стабилизаторы напряжения.

На рис. 2 приведена электрическая принципиальная схема разработанного ИИП от аккумулятора на напряжения +20В, +5В, -6В, +9В, необходимые для питания портативного ПМРР.

Основными модулями разработанного ИИП являются:

1. Двухтактный контроллер на микросхеме КР1211ЕУ1 (обозначен как IC1);

2. Два КМОП транзистора IRF7309 (обозначены как IC2 и IC3);

3. Стабилизатор 142ЕН22 для выходного напряжения +20 В (обозначен как IC6);

4. Стабилизатор КР142ЕН8А для выходного напряжения +9 В (обозначен как IC4);

5. Стабилизатор 79L06 для выходного напряжения 6 В (обозначен как IC5);

6. Стабилизатор КР1158ЕН5Г для выходного напряжения +5 В (обозначен как IC7).

Особенностью стабилизаторов является наличие встроенной схемы токовой защиты, защиты от короткого замыкания и ограничения предельной мощности.

Для построения ИИП в качестве широтно-импульсный модулятора (ШИМ) - контроллера была выбрана микросхема КР 1211ЕУ1, которая обеспечивает ВЧ-сигнал в виде меандра. Данная микросхема является двухтактной, то есть в отличие от однотактных, в ней происходит формирование двух последовательностей управляющих импульсов, разделенных между собой регулируемой паузой.

Данная особенность позволяет управлять полевыми транзисторами. Микросхема КР1211ЕУ1 включает в себя задающий генератор, делитель частоты, формирователь импульсов и выходной усилитель [11,12]. Так как в ИИП питающим элементом служит аккумулятор (12В/2.3Аh), напряжение которого может отличаться от номинального по мере зарядки/разрядки, напряжения питания КР1211ЕУ1 стабилизируется стабилитроном D1.

Максимальные токи и напряжения на выходах контроллера КР1211ЕУ1 небольшие, поэтому для исключения выхода из строя контроллера из-за перегрузки необходимо применение драйвера (усилителя мощности импульсов), который выполнен на КМОП транзисторе IRF7309, обозначенном на схеме как IC2/IC3. ВЧ-сигнал усиливается в IC2/IC3 и после эмиттерного повторителя, выполненного на идентичном КМОП транзисторе, поступает в ту часть схемы, где происходит удвоение и инверсия напряжений [1,3,13].

Стабилизация напряжения для выхода +9В происходит на трехвыводном регулируемом линейном стабилизаторе напряжения КР142ЕН8А, стабилизация для выхода -6 В происходит на трехвыводном регулируемом линейном стабилизаторе напряжения 79L06, для выхода +20В стабилизация происходит на трехвыводном регулируемом линейном стабилизаторе напряжения 142ЕН22, для выхода +5В - на трехвыводном регулируемом линейном стабилизаторе напряжения КР1158ЕН5Г [13].

Аккумулятор (12В/2.3Ah)

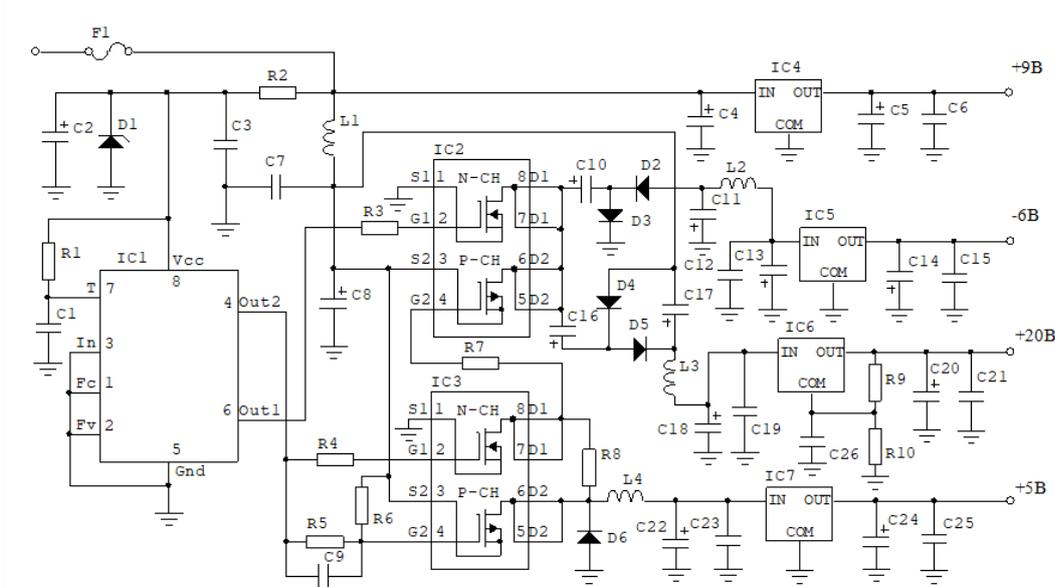


Рис. 2. Принципиальная схема ИИП

Результаты

Характеристики ИИП в виде зависимостей выходных напряжений в зависимости от величины подаваемого входного (номинальный режим от аккумулятора 12 В), представлены на рис.3, предполагая, что после подзарядки напряжение аккумулятора будет превышать номинальное, а после работы будет значительно ниже. Как это видно из графиков, ИИП допускает значительные регулировки в зависимости от напряжения аккумулятора. Так, при подаче на вход ИИП +10 В, на выходе можно получить +20 В, +5 В, - 9 В. При подаче на вход ИИП +15 В, на выходе получим +30 В, +7.5 В, - 14 В. Это гарантирует достаточное превышение напряжений для уверенной их высокой стабилизации.

Выходные характеристики ИИП после стабилизатора напряжений представлены на Рис.4.. Как это видно из графиков, в диапазоне 11-15 В входного напряжения от аккумулятора, ИБП IV обеспечивает стабильные выходные напряжения +20 В на уровне 100.5% для передатчика, +9 В на уровне 99.4±0.01% для ВЧ-генератора, +9 В на уровне 99.3±0.01% для приемника, +5 В и - 6 В на уровне 102±0.1% для микросхем. Данная стабилизация вполне достаточна для питания всех элементов релаксометра.

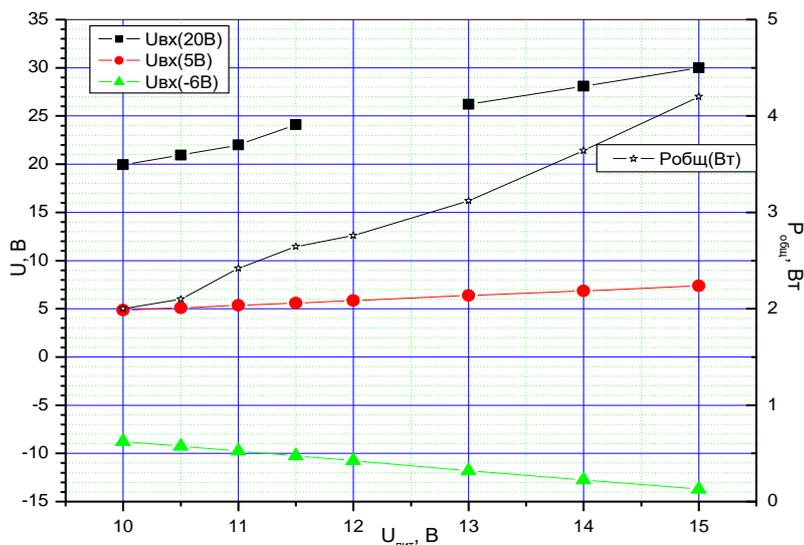


Рис 3. Характеристики преобразователя в виде зависимостей выходных напряжений преобразователя от величины подаваемого входного напряжения с аккумулятора

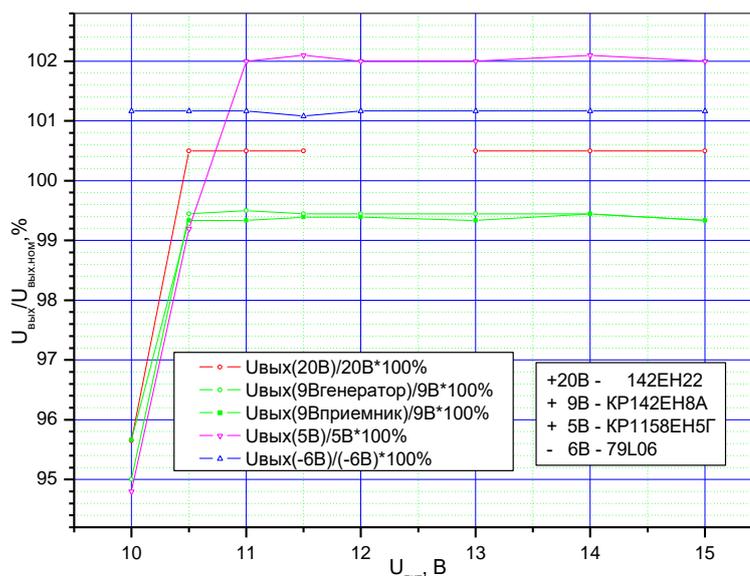


Рис. 4. Выходные характеристики ИИП после стабилизаторов напряжений

Разработан малоразмерный (45x140 мм), питаемый от малогабаритного аккумулятора (12В/2.3Ah) импульсный источник питания на четыре высокостабилизированных напряжения для портативного протонного магнитно-резонансного релаксометра [7,8].

Разводка платы ИИП, выполнена в программе *CircuitMaker*. Распечатанная на глянцевой бумаге с помощью лазерного принтера разводка платы, переносилась на заданный стеклотекстолит для дальнейшего травления платы хлорным железом [15].

В диапазоне от 11 до 15 В входного напряжения от аккумулятора, ИИП гарантирует стабильные выходные напряжения +20В на уровне 100.5% для передатчика, +9В на уровне 99.4±0.01% для ВЧ-генератора, +9 В и – 6 В на уровне 99.3±0.01% для приемника, +5В на уровне 102±0.1% для микросхем. Данная стабилизация вполне достаточна для питания всех элементов релаксометра.

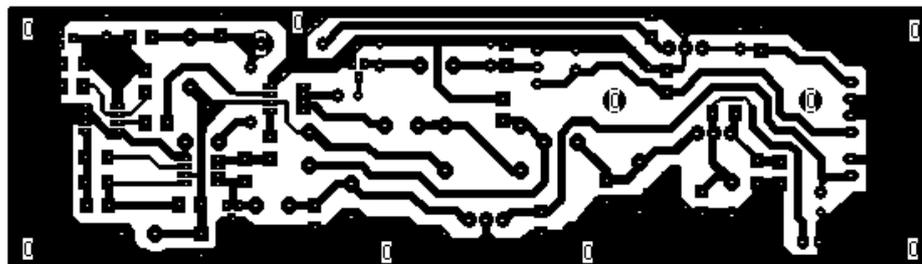


Рис. 5. Разводка платы ИИП

На рис. 5 представлена разводка платы ИИП, выполненная в программе *CircuitMaker*. Распечатанная на глянцевой бумаге с помощью лазерного принтера разводка платы, переносилась на заданный стеклотекстолит для дальнейшего травления платы хлорным железом.

Обсуждение и выводы

Если в оборудовании, питающемся от сети, можно построить блок питания с необходимыми напряжениями, то в портативных аппаратах, работающих от автономных источников энергии, требуемые уровни напряжений можно получить только с использованием ИИП.

ИИП допускает значительные регулировки в зависимости от напряжения аккумулятора. Так, при подаче на вход ИИП +10 В, на выходе можно получить +20В, +5В, -9В. При подаче на вход ИИП +15В, на выходе получим +30В, +7.5В, -13.5В, что гарантирует превышение напряжений для их уверенной высокой стабилизации.

В этой статье представлен ИИП, который применен для портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра (ПМРР). В диапазоне возможных изменений напряжения аккумулятора с 11В до 15В, DC/DC преобразователь гарантирует стабильные выходные напряжения +20В на уровне 100.5% для передатчика, +9В и – 6В на уровне

99.3±0.01% для приемника, +5В на уровне 102±0.1% для генератора импульсных последовательностей, что достаточно для питания всех блоков релаксометра.

Литература

1. Андрей Кашкаров. Импульсные источники питания: Схемотехника и ремонт, 2012. 184 с.
2. Ситников А.В. Электротехнические основы источников питания, 2014. 238 с.
3. Маникгала Санджай. Импульсные источники питания от А до Z, 2014. 256с.
4. Михаил Шустов. Практическая схемотехника: Контроль и защита источников питания, 2007. 184 с.
5. Афшин Одабай. Система питания ПЛИС Altera Arria 10 FPGA и Arria 10 SOC: проверенные решения для управления питанием // Вестник электроники. 2016. №1 (55) С. 42-43.
6. Виктор Алексеев. Изолированные DC/DC-конвертеры TVN 5WI с ультранизкими шумами производства Traco Electronic AG // Вестник электроники. 2016. №2 (56) С. 10-16.
7. Татур В.В. Генераторы высоковольтных импульсов с удвоением выходного напряжения // Известия Томского политехнического университета. 2012. №4 (320). С. 116-119.
8. Кашаев Р.С., Темников А.Н., Тунг Ч.В., и др. Релаксометр протонного магнитного резонанса // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ). 2019. №2. С.145-148.
9. Робертс С. Решения проблемы пульсаций и помех DC/DC-преобразователей: входная и выходная фильтрация // Компоненты и технологии. 2015. № 11.
10. Шамгунов Р.Р., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Блок питания переносного автономного протонно-магнитного резонансного релаксометра // Сборник материалов 3 Поволжской научно-практической конференции. Казань: КГЭУ, 2017. Т 1. С.44-50.
11. Telang A.S., Bedekar P.P. Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow. A Critical Review // Power Research-A Journal of CPRI. June 2016. V.12. N2. pp. 640-647.
12. Hossain M.K. and Ali M.H. Transient stability augmentation of PV/DFIG/SG-based hybrid power system by parallel-resonance bridge fault current limiter // Electr. Power Syst. Res.2016. V.130. pp. 89-102,
13. Dileep. G., Singh S. N. Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system // Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V.76. pp. 1230-1247.
14. Anna Nur Nazilah Chamim., Muhammad Heru Gustaman., NiaMaharaniRaharja. Uninterruptable Power Supply based on Switching Regulator and Modified Sine Wave // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). June 2017. V.7, N. 3. pp 1161-1170.
15. Sekar T., Marappan R. Improving Material Removal Rate of Electrochemical Machining by Using Rotating Tool // Manufacturing Engineering Journal 2008; 8 (2), pp. 60-63.

Авторы публикации

Нгуен Ть Киен – аспирант кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ), Казанский Государственный энергетический университет (КГЭУ).

Кашаев Рустем Султанхамитович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент и заведующий кафедрой «Приборостроение и мехатроника»(ПМ), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Andrei Kashkarov. Impul'snye istochniki pitaniya: Skhemotekhnika i remont, 2012. P. 184.
2. Sitnikov AV. Elektrotekhnicheskie osnovy istochnikov pitaniya, 2014. P. 238.
3. Maniktala Sandzhai. Impul'snye istochniki pitaniya ot A do Z, 2014. P 256.
4. Mikhail Shustov. Prakticheskaya skhemotekhnika: Kontrol' i zashchita istochnikov pitaniya, 2007. P.184.
5. Afshin Odabai. Sistema pitaniya PLIS Altera Arria 10 FPGA i Arria 10 SOC: proverennye resheniya dlya upravleniya pitaniem. *Vestnik elektroniki*. 2016;55(1):42-43.
6. Viktor Alekseev. Izolirovannye DC/DC-konvertery TVN 5WI s ul'tranizkimi shumami proizvodstva Traco Electronic AG. *Vestnik elektroniki*. 2016;56(2):10-16.
7. Tatur VV. Generatory vysokovol'tnykh impul'sov sudvoeniem vykhodnogo napryazheniya. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012;4(320):116-119.
8. Kashaev RS, Temnikov AN, Tung ChV, et al. Relaksometr rotonnogo magnitnogo rezonansa. *Pribory I tekhnika eksperimenta (PTE)*. 2019;2:145-148.

9. Roberts S. Resheniya problem pul'satsii I pomekh DC/DC-preobrazovatelei: vkhodnayaivkhodnayafil'tratsiya. *Komponenty I tekhnologii*. 2015. P. 11.
10. Shamgunov RR, Kashaev RS, Kozelkov OV. Blokpitaniya perenosnogo avtonomnogo protonno-magnitnogo rezonansnogo relaksometra Power supply unito faportable autonomous proton-magnetic resonance relaxometer. *Sbornik materialov 3 Povolzhskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. The collection of materials of the 3 Volga scientific-practical conference; Kazan: KSPEU, 2017. pp.44-50.
11. Telang AS, Bedekar PP. Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow – A Critical Review. *Power Research - A Journal of CPRI*. June 2016.12(2):640-7. doi: 10.33686/pwj.v12i2.142546
12. Hossain MK. and Ali MH. Transient stability augmentation of PV/DFIG/SG-based hybrid power system by parallel-resonance bridge fault current limiter. *Electr. Power Syst. Res.*2016;130:89-102.
13. Dileep G, Singh SN. Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017;76:1230-1247.
14. Anna Nur Nazilah Chamim, Muhammad Heru Gustaman, Nia Maharani Raharja. Uninterruptable Power Supply based on Switching Regulator and Modified Sine Wave. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. June 2017;7(3):161-1170.
15. Sekar T, Marappan R. Improving Material Removal Rate of Electrochemical Machining by Using Rotating Tool. *Manufacturing Engineering Journal*. 2008;8(2):60-63.

Authors of the publication

Chi Kien Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: nckien@cnd.edu.vn.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

17 октября 2019г.

ЭНЕРГЕТИКА

АЛИ Я.С.С., ЧИЧИРОВА Н.Д. Электроэнергетическая система Йемена, ее состав и характеристики. №3-4. С.38-43.

АФАНАСЬЕВ В.В., КОВАЛЕВ В.Г., ТАРАСОВ В.А. Энерготехнологические комплексы как регуляторы работы электроэнергетических систем. №5. С.50-58.

БАДРИЕВ А.И., ВЛАСОВ С.М. Оценка распределения потоков воды и воздуха на лабораторной градирнею. №5. С.71-78.

БАЗЫКИН Д.А., СУХОВ А.И., БАРАКОВ А.В. Разработка теплообменного аппарата-регенератора для высокотемпературного нагрева газообразных сред. №5. С.38-49.

БАРТОЛОМЕЙ П.И., СЕМЕНКО С.И. Развитие метода оценивания состояния для интеграции СВИ и измерений SCADA в ЭЭС. №3-4. С.68-78.

БОЛЬШАНИН Г.А., ПЛОТНИКОВ М.П., ШЕВЧЕНКО М.А. Экспериментальное определение параметров трёхпроводной ЛЭП. №4. С.85-94.

ВАЛИУЛЛИНА Д.М., ИЛЬЯСОВА Ю.К., КОЗЛОВ В.К. Качественные методы спектрального анализа в диагностике трансформаторных масел. №1-2. С.87-92.

ГАВРИЛОВ С.Н., ПЕТРЕНЯ Ю.К. Демпфирование шин как средство повышения вибрационной надежности статоров турбогенераторов. №1-2. С.19-27.

ГАЙНУЛЛИНА Л.Р., ТУТУБАЛИНА В.П. Исследование окисления дибутилсульфида концентрированным раствором пероксида водорода при помощи термограмм. №3-4. С.3-6.

ГАЛЕЕВА Р.У., НАЗАРОВ А.В., ХАСАНШИН А.А. Влияние электромагнитных связей между проводами двухцепной воздушной линии и поверхностью земли на переходные режимы. №1-2. С.67-76.

ГВОЗДЯКОВ Д.В., ЗЕНКОВ А.В., ГУБИН В.Е., ВЕДЯШКИН М.В. Экспериментальные исследования влияния давления суспензионного топлива и воздуха на структуру факела в процессе распыла. №5. С.110-123.

ГЕМЕЧУ Б.Д., ШАРАПОВ В.И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции. №4. С.3-11.

ГРАЧЕВА Е.И., САДЫКОВ Р.Р., ХУСНУТДИНОВ Р.Р., АБДУЛЛАЗЯНОВ Р.Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий. №1-2. С.10-18.

ГРАЧЕВА Е.И., ШАКУРОВА З.М., АБУЛЛАЗЯНОВ Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях. №5. С.87-96.

ЗАМАЛИЕВА А.Т., ЗИГАНШИН М.Г. Усовершенствованная установка фильтрации газа на ТЭС при подготовке топлива для городских энергетических систем. №5. С.124-131.

ЗАРЯНКИН А.Е., ПАДАШМОГАНЛО Т. Разработка и исследование гасителей неравномерности в трубопроводных системах и трактах турбомашин на основе математического моделирования. №1-2. С.93-110.

ЗАРЯНКИН А.Е., ПАДАШМОГАНЛО Т., ПОСТНИКОВА М.С. Исследование способов выравнивания параметров потока во входных патрубках осевых компрессоров. №6. С.72-83.

ЗАЦЕПИНА В.И., ЗАЦЕПИН Е.П., СКОМОРОХОВ П.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения. №5. С.79-86.

ЗИГАНШИН М.Г. Методика оценки эффективности генерации на тепловых электрических станциях с учетом выброса загрязнителей. №6. С. 29-38.

ИВАНОВА В.Р., ИВАНОВ И.Ю., НОВОКРЕЩЕНОВ В.В. Структурный и параметрический синтез алгоритмов противоаварийного управления для реализации адаптивной частотной делительной автоматики электротехнических систем. №4. С.66-76.

ИВАНОВА В.Р., КИСЕЛЕВ И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах. №5. С.59-70.

ИВШИН И.В., САФИН А.Р., ГИБАДУЛЛИН Р.Р., ПЕТРОВ Т.И., ЦВЕТКОВ А.Н., НИЗАМИЕВ М.Ф., КОРНИЛОВ В.Ю. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска. №5. С.3-13.

КИСЕЛЁВ В.Г. Обратимые тепловые двигатели Филиппа и Карно с реальным газом в качестве рабочего тела. №4. С.20-32.

КИСЕЛЕВ В.Г., РУЗИЧ Е.Н. Особенности отечественной нормативной базы,

- регламентирующей катодную защиту тепловых сетей от наружной коррозии в грунте. №1-2. С.77-86.
- ЛАПТЕВ А.Г., БАШАРОВ М.М., ЛАПТЕВА Е.А. Показатели энергосепарационной эффективности газосепараторов капельных аэрозолей. №1-2. С.3-9.
- МАЛАФЕЕВ А.В., ЮЛДАШЕВА А.И. Выбор вариантов реконструкции системы электроснабжения на основе теории нечетких множеств и критериев теории принятия решений. № 3-4. С.59-67.
- МЕЛАМЕД Л.Э., ФИЛИПШОВ Г.А. Концепция турбулентной «вихревой засыпки» - модели и методы. №5. С.97-109.
- МИРОНОВА Н.А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик плодовых косточек. №6. С.19-28.
- МИХИН А.А., СЕРГЕЕВ В.В. Моделирование конденсационной установки в среде ASPEN PLUS. №6. С.84-92.
- МУРАТАЕВА Г.А., МУРАТАЕВ И.А. Разработка метода диагностики электроизоляционной жидкости трансформаторного электрооборудования. №4. С. 41-47.
- МУХАМЕТОВА Л.Р., АХМЕТОВА И.Г., СТРИЕЛКОВСКИ В. Инновации в области хранения энергии. №4. С.33-40.
- НАСЫРОВА Е.В., ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., ЛЕУХИНА О.В., МАЗАРОВ И.Ю. Анализ данных ветромониторинга в Республике Татарстан. №6. С.39-50.
- НГУЕН Д.Т., МИНГАЛЕЕВА Г.Р., САВИНА М.В. Оценка энерго- и ресурсосберегающего эффекта при внедрении гибридных объектов малой распределенной генерации в республике Вьетнам. №5. С.132-140.
- НГУЕН Д.Т., ФАМ Д.Н., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Оценка показателей эффективности паротурбинных мини-ТЭС, работающих на угле. №3-4. С.79-89.
- НИЗАМИЕВ М.Ф., ВЛАДИМИРОВ О.В., ИВШИН И.В., ЦВЕТКОВ А.Н., УСМАНОВ И.К., ГИБАДУЛЛИН Р.Р. Стенд для послеремонтных испытаний асинхронных двигателей напряжением до 1000 В. №3-4. С.52-58.
- ПЛОТНИКОВ Л.В., БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., ГРИГОРЬЕВ Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газовоздушных трактах поршневых двигателей с турбонадувом. №4. С.77-84.
- ПЛОТНИКОВ Л.В., БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., НЕВОЛИН А.М., МИСНИК М.О. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газовоздушных трактах поршневых двигателей. №5. С.22-28.
- РОТАЧ Р.Р., ВАНЬКОВ Ю.В., ЗИГАНШИН Ш.Г., ИЗМАЙЛОВА Е.В. Оптимизация тепловой схемы путем внедрения паровой винтовой машины. №5. С.14-21.
- САЙФУЛЛИН Э.Р., ЛАРИОНОВ В.М., ВАНЬКОВ Ю.В. Численное моделирование стабилизации теплопроизводительности парового котла при сжигании попутного нефтяного газа. №3-4. С.15-21.
- САЛУМ А.А., МАКСИМОВ В.И. Работа водяного теплового насоса в условиях образования льда на поверхности трубки испарителя. №3-4. С.44-51.
- СЕЛИВАНОВ А.А., БАТРАКОВ П.А., МРАКИН А.Н., ВДОВЕНКО И.А., АФАНАСЬЕВА О.В. Математическое описание процесса теплообмена частиц горючего сланца и зольным теплоносителем в условиях полуккоксования во вращающемся барабанном реакторе УТГ. №5. С.51-60.
- СИНЕЛЬНИКОВ Д.С., ЩИННИКОВ П.А. Повышение эффективности теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков тепловых нагрузок. №4. С.12-19.
- СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВА Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии. №4. С.95-103.
- СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ЧЕТОШНИКОВА Л.М., ИГНАТОВ А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии. №6. С.3-10.
- СОСНОВСКИЙ А.Ю., МУРМАНСКИЙ Б.Е., БРОДОВ Ю.М. Исследование универсальных условий устойчивости систем тепловых расширений паровых турбин к внешнему воздействию. №6. С.61-71.
- СОСНОВСКИЙ А.Ю., МУРМАНСКИЙ Б.Е., БРОДОВ Ю.М. Современное состояние и перспективные решения по совершенствованию систем тепловых расширений паровых турбин №1-2. С.28-42.
- СТЕПАНОВ В.С., СТЕПАНОВА Т.Б., СТАРИКОВА Н.В. Определение энергетического потенциала сжатого воздуха для оценки эффективности работы воздушно-аккумулирующей электростанции. №3-4. С.27-37.

СТОГОВ А.Ю., БЕЛЯЕВ А.Н. Повышение динамической устойчивости автономной энергосистемы на основе управления по взаимным параметрам. №1-2. С.55-66.

ТАЙМАРОВ М.А., ИЛЬИН В.К., ОСИПОВ А.Л., ДОЛГОВА А.Н., АХМЕРОВ А.В. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов. №3-4. С.7-14.

ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., АЛИ А.К., АЛЬМОХАММЕД О.А.М., КОРЯКИН А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена. № 4. С.48-57.

ТИМЕРБАЕВ Н.Ф., САФИН Р.Г., ЗИАТДИНОВА Д.Ф., СТЕПАНОВА Т.О. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки. №5. С.29-37.

ФАРАХОВ Т.М., ЛАПТЕВ А.Г. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи на начальном участке обтекаемых тел. №3-4. С. 22-26.

ФЕДОТОВ А.И., АБДУЛЛАЗНОВ Р.Э., МУДАРИСОВ Р.М. Методики оценки устойчивости синхронных двигателей при трехфазных коротких замыканиях в системе внешнего электроснабжения. №3-4. С.90-99.

ШАБУРОВ Е.Л., ДЕРЕВЯНКО О.В., ФЕДЮХИН А.В., СМЯТСКАЯ Ю.А., ПОЛИТАЕВА Н.А. Определение теплотворной способности отработанных сорбентов из остаточной биомассы *Chlorella sorokiniana* и ряски *Lemna minor*. №3-4. С.100-106.

ЭЛЬМОХЛАВИ А.Э., ОЧКОВ В.Ф., КАЗАНДЖАН Б.И. Оценка производительности и энергоэффективности интегрированного солнечного комбинированного цикла электростанции. №1-2. С.43-54.

ЮШКОВА Е.А., ЛЕБЕДЕВ В.А. Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода. №5. С. 58-65.

ЯХЬЯ А.А., ЛЕВИН В.М. Байесовский классификатор как средство повышения эффективности распознавания дефектов в силовых трансформаторах. №6. С.11-18.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

БОРИСОВ А.Н., ШИРИЕВ Р.Р. Светодиодный источник света с повышенной светоотдачей. №1-2. С.111-119.

MAJID ABDULNAMEED ABDULHY AL-ALI, KORNILOV V.YU., GORODNOV A.G. Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing stations) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field. №1-2. С.141-145.

ВАГАПОВ Г.В. Диагностика гололеда на грозозащитных тросах воздушных линий электропередачи. №4. С.104-112.

ЗОЛОТОВ И.И., ШЕВЦОВ А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения. №1-2. С.131-140.

МАЛЁВ Н.А., МУХАМЕТШИН А.И., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ГОРОДНОВ А.Г. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. №4. С.113-122.

МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., ЦВЕТКОВИЧ А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. №6. С.101-110.

МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами нагрузки. №1-2. С.120-130.

НГУЕН ТИЕН., ГИЛЬФАНОВ К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора тм-160/10. №5. С. 141-151.

НГУЕН ТЫИ КИЕН, КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В. Импульсный блок питания для портативного протонно-магнитного резонансного релаксометра. №6. С.111-117.

ПОЛИЩУК В.И., КРИЦКИЙ М.В., БАННОВ Д.М., МАЛЫШЕВ С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин. №6. С.93-100.

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО С.Е., САВЕНКО П.С. Исследование причин и параметров синфазных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. №3-4. С. 107-115.

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ИВАНОВ Д.А., ПОТАПОВ А.А., КРОТОВ В.И.
Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей. №4. С. 123-133.

ЕВДОКИМОВ Ю.К., МОХАММЕД Х.С.А., ХРАМОВ Л.Д. Математическая модель и измерительный алгоритм непрерывно распределенного полупроводникового датчика профиля температуры в неизотермических потоках. №1-2. С. 146-153.

ФИЗИКА

СОЛОВЬЕВ И.А., КАРТАШОВ Э.М. Стохастическая постановка задачи Стефана в гиперболическом представлении. №3-4. С. 116-126.

Сдано в набор 11.11.2019
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ № 5189
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная