

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

2020
Т.22, № 1
Январь-Февраль

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

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.	КОРОВКИН Н.В.	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

2020
Vol. 22, № 1
January-February
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
EDIK K. ARAKELYAN
PETR I. BAROLOMEI
YURY M. BRODOV
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
ALEXANDER V. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
VADIM A. GOLENISHCHEV-
KUTUZOV
FARID M. GUMEROV
LEUKHIN A.N.
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
VLADIMIR K. KOZLOV

VITALIY V. SERGEEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
ALEXANDER I. FEDOTOV
NATALIA D. CHICHIROVA
ANATOLY G. LAPTEV
GUZEL R. MINGALEEVA
RENAT G. MINULLIN
GURGEN G. OLKHOVSKY
IGOR AI. POPOV
PAVEL A. SHCHINNIKOV
ANDREY V. SHCHUKIN
EMIL V. SHAMSUTDINOV
NIKOLAI D. YAKIMOV

BIANCHINI ALESSANDRO
FERRARA GIOVANNI
SIMONI DANIELE
SKODA RADEK
TOMAN PETR
DESHPANDE PRAVIN
VAKKILAINEN ESA
RASSÖLKIN ANTON
BOYADJIEV CHRISTO
BULAT BURGANOVA
NIKOLAI V. KOROVKIN
CHRISTO B. BOYADJIEV
STEFFEN KURTH
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

ДМИТРИЕВ А.В., ЗИНУРОВ В.Э., ДМИТРИЕВА О.С., НГУЕН ВУ Л. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц.	3
ЛАВРИК А.Ю., ЖУКОВСКИЙ Ю.Л., ЛАВРИК А.Ю, БУЛДЫСКО А.Д. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами.	10
НАСЫРОВ Р.Р., АЛЬДЖЕНДИ Р., ХЕРБЕК Т. Применение активного фильтра для нормализации качества электроэнергии в электрической сети, Сирийской Арабской Республики.	18
ХАЛЫБЕВ И., ГИЛЬФАНОВ К.Х. Снижение стоимости теплонасосной системы теплоснабжения путем замены коллектора первого контура.	28
САФИН А.Р., ИВШИН И.В., ГРАЧЕВА Е.И., ПЕТРОВ Т.И. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами.	38
ХАЙБУЛЛИНА А.И., ЗИННАТУЛЛИН Н.Х., ИЛЬИН В.К. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки.	49
ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТВАЛЕЕВА Л.В., БАСЫРОВ Р.Ш., ВАГАПОВ Г.В., ФЕДОТОВ Е.А. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю.	58
GORODNOV AG., KORNILOV VYU., ABDULHAMEED ABDULHY AL-ALI MAJID. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers.	69
ИВАНИЦКИЙ М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла КЕ-25-14С.	77
НАУМОВ А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии.	85
ОМОРОВ Т.Т., ТАКЫРБАШЕВ Б.К., ОСМОНОВА Р.Ч. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети.	93
ГУЖОВ С.В. Об объединении детерминированного и стохастического подходов при прогнозировании теплового баланса здания для занятий водными видами спорта.	103
ТЮРИНА Э. А., МЕДНИКОВ А. С., ЕЛСУКОВ П. Ю. Модульные установки комбинированного производства электроэнергии и жидких топлив на основе древесной биомассы.	113

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ДЕБИЕВ М.В. Развитие энергетики Чеченской Республики.	128
САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях.	136

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

DMITRIEV AV, ZINUROV VE, DMITRIEVA OS, NGUYEN VUL. Cleaning of gas emissions of boiler installations of solids	3
LAVRIK AY, ZHUKOVSKY YL, LAVRIK AY, BULDYSKO AD. Features of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators.	10
NASYROV RR, ALJENDY R, KHERBEK T. Power quality assurance in the electrical network of the Syrian Arab Republic, using the active power filter.	18
HALLYEV I, GILFANOV KH. DECREASING Cost of heat pump heat supply system by changing first circuit collector	28
SAFIN AR, IVSHIN IV., GRACHEVA EI, PETROV TI. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets	38
HAIBULLINA AI, ZINNATULLIN NX, ILYIN VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning.	49
FEDOTOV AI, AKHMETVALEEVA LV, BASYROV RS, VAGAPOV GV, FEDOTOV EA. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault.	58
GORODNOV AG, KORNILOV VYU, ABDULHAMEED ABDULHY AL - ALI MAJID The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers.	69
IVANITSKIY MS. Toxicity of exhaust gasessolid fuel boiler KE-25-14S.	77
NAUMOV AA. The required quality of electrical energy provision	85
OMOROV TT, TAKYRBASHEV BK, OSMONOVA RCH To the problem of mathematical modelling of the three-phase asymmetrical distribution network	93
GUZHOV S.V. About combining determinated and stochastic approaches for prediction of the heating balance of the building for water sports.	103
TYURINA EA, MEDNIKOV AS, ELSUKOV PYU. Modular plants for combined biomass-based production of electricity and synthetic liquid fuel.	113

ELECTRICAL ENGINEERING

DEBIEV MV. Energy development in the Chechen Republic	128
SAVENKO AE, SAVENKO PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants	136



ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

А.В. Дмитриев*, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ву Л. Нгуен

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Резюме: Высокоэффективная очистка газового потока от твердых частиц малого диаметра при малых потерях давления в аппарате является одним из основных показателей при выборе очистительного устройства. В статье предлагается разработанный авторами прямоугольный сепаратор для эффективной очистки газовых выбросов котельных установок от твердых частиц. Произведен сравнительный анализ сепаратора с циклоном ЦН-11-400. Определены оптимальные размеры элементов внутри прямоугольного сепаратора. Построена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного геометрического коэффициента, на ней определен глобальный минимум и соотношение размеров дуэлавровых сепарационных элементов, при которых достигаются минимальные энергетические затраты. Для различных значений длины дуэлавровых элементов получены результаты по эффективности работы предлагаемого сепарационного устройства. В частности, показано, что с уменьшением длины дуэлавровых элементов увеличивается эффективность сепарации частиц небольшого диаметра. В результате численного эксперимента определено, что при длине дуэлавровых элементов равной 13 мм достигается наибольшая эффективность. При объемном расходе $Q = 0,444 \text{ м}^3/\text{с}$ эффективность сепаратора в среднем на 52% выше эффективности циклона ЦН-11-400 при сепарации газа от частиц диаметром до 8 мкм.

Ключевые слова: циклон, осаждение частиц, улавливание твердых частиц, газификация твердого топлива, продукты сгорания, сепаратор.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК–616.2020.8.

Для цитирования: Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Ву Л. Нгуен. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 3-9. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.

CLEANING OF GAS EMISSIONS OF BOILER INSTALLATIONS OF SOLIDS

AV Dmitriev*, VE Zinurov, OS Dmitrieva, VuL Nguyen

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

Abstract: High performance cleaning of a gas stream of solids of small diameter at small pressure losses in the device is one of key indicators at the choice of the abstersive device. In article, the rectangular separator developed by authors for efficient cleaning of gas emissions of boiler installations of solids is offered. The comparative analysis of a separator with the cyclone CN-11-400 is made. The dependence of hydraulic resistance coefficient from dimensionless geometric factor, it determined the global minimum and the ratio of beam separation elements, which are achieved with minimal energy costs. Results on the efficiency of the proposed separation device are obtained for different values of the length of I-beam elements. In

particular, it is shown that with a decrease in the length of I-beam elements, the efficiency of separation of small-diameter particles increases. As a result of the numerical experiment, it was determined that when the length of I-beam elements is equal to 13 mm, the highest efficiency is achieved. At a volume flow rate of $Q = 0.444 \text{ m}^3/\text{s}$, the efficiency of the separator is on average 52% higher than that of the cyclone CN-11-400 when separating gas from particles up to 8 microns in diameter.

Keywords: cyclone, deposition of particles, catching of solids, gasification of solid fuel, products of combustion, separator.

Acknowledgments: The reported study was funded by grant of the President of the Russian Federation, project number MK–616.2020.8.

For citation: Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, Nguyen VuL. Cleaning of gas emissions of boiler installations of solids. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):3-9. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-3-9.

Введение. Литературный обзор

Мероприятия, осуществляемые для сепарации газовых потоков от мелкодисперсных твердых частиц до 10-20 мкм, становятся более значимыми в настоящее время. Ужесточение экологических требований к предельно допустимым выбросам вредных веществ в атмосферный воздух и увеличение производственных мощностей предприятий, как следствие, использование оборудования на предельных мощностях или подключение дополнительных агрегатов требуют от предприятий более тщательной очистки газовых выбросов [1]. Данная проблема особо актуальна для котельных установок, которые являются основными стационарными источниками вредных веществ на тепловых электростанциях. В ходе горения органического топлива образуются различные вредные вещества, негативно влияющие на организм человека и окружающую среду: оксиды углерода, серы, азота и др. Поэтому проблема очистки эмиссионного газового потока от вредных веществ при сжигании различных видов топлив чрезвычайно актуальна [2, 3].

В настоящее время для высокоэффективной очистки газов от содержащихся в нем твердых частиц используются различные модификации инерционных пылеуловителей, фильтров, электрофильтров, мокрых пылеуловителей и пр. [4-6]. При использовании фильтров, электрофильтров, мокрых пылеуловителей большое значение имеют параметры газа: температура, влажность, напряженность электрического поля, движение частиц в электрическом поле, абразивность твердых частиц и др. Такая тщательная подготовка запыленного газа к очистке требует больших экономических вложений, больших площадей и увеличение персонала для настройки и ремонта дополнительного оборудования. Как правило, в реальных условиях осуществить это практически невозможно. Поэтому при выборе очистительного устройства особое внимание уделяется следующим критериям: степень очистки газового потока, ремонтпригодность, малое количество механизмов в аппарате, легкость в использовании, компактность, малая металлоемкость, низкое гидравлическое сопротивление. Наиболее распространенными устройствами, используемыми практически на всех предприятиях и удовлетворяющими большинству данных критериев, являются инерционные пылеуловители. Среди них в большей степени распространены циклоны [7-9], которые характеризуются относительно высокой степенью очистки газового потока до 95-99,7%, простотой устройства и эксплуатации, надежной работой при высоких температурах до 500°C. Основными недостатками циклонов являются низкая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц до 10-20 мкм в зависимости от модификации циклона и высокое гидравлическое сопротивление, достигающее 1250-1500 Па [10-12].

Целью работы является исследование очистки газовых выбросов от мелкодисперсных твердых частиц до 10 мкм. Вследствие возрастания количества выбрасываемых вредных веществ в окружающую среду при сжигании природного топлива и малой эффективности очистки данных выбросов от частиц диаметром менее 10-20 мкм циклонами, возникает необходимость в применении дополнительных очистительных аппаратов. Для решения данной проблемы авторами статьи предлагается использовать разработанный прямоугольный сепаратор. Также данный сепаратор можно рассматривать как замену циклонам, вследствие высокоэффективного очищения газов от

мелкодисперсных твердых частиц диаметром в диапазоне 10–300 мкм на 99,8–100% [13, 14].

Методы исследования

Прямоугольный сепаратор состоит из нескольких рядов двутавровых балок, собранных в прямоугольный корпус (рис. 1). Для обеспечения высокой степени фиксации двутавровых элементов внутри аппарата к его стенкам используются поперечные пластины [15]. Они крепятся к стенкам сепаратора и двутавровым балкам. Принцип работы устройства заключается в следующем: при движении многофазного потока между элементами устройства возникает центробежная сила, отбрасывающая частицы пыли к двутавровым балкам, отделяя их от структурированного потока. Скорость осевших частиц после контакта с двутавровыми элементами становится равной 0 м/с, под собственной силой тяжести они собираются на дне аппарата. Через определенные промежутки времени в зависимости от запыленности газового потока, дно аппарата очищается от осевших частиц при помощи открытия специальных отверстий, сделанных в нижней части корпуса сепаратора.

Исследования проводились для сепаратора, состоящего из пяти рядов стальных балок длиной 192 мм, в каждом из которых находится m двутавров. Корпус аппарата имеет следующие геометрические размеры: ширина – 104 мм, высота – 192 мм, длина – 50-100 мм. Длина и толщина двутаврового элемента принималась 13 и 0,5 мм соответственно. В ходе процесса улавливания мелкодисперсных частиц диаметром до 10 мкм использовался метод конечных элементов в программном комплексе *AnsysFluent*, модель турбулентности – *SST*.

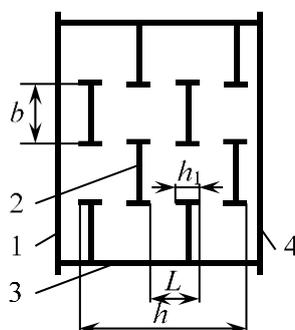


Рис. 1. Двухмерная модель прямоугольного сепаратора (вид сверху): 1 – входной патрубок, соединяющий газопровод с прямоугольным сепаратором, 2 – двутавровый элемент внутри сепаратора, 3 – корпус устройства, 4 – выходной патрубок сепаратора

Для проведения сравнительного анализа циклона и прямоугольного сепаратора по эффективности улавливания частиц и по гидравлическому сопротивлению были заданы одинаковые параметры: площадь входного патрубка, объемный расход газа на входе в аппарат, термодинамические параметры окружающей среды – давление и температура, одинаковые теплофизические свойства рабочего тела – воздуха и частиц, находящихся в нем. Среди циклонов был выбран ЦН-11-400 без улитки. Данный аппарат является одним из самых распространенных устройств, используемых на предприятиях, для очистки воздуха. Входной патрубок аппарата ЦН-11-400 имеет прямоугольную форму высотой 192 мм и шириной 104 мм, который присоединяется к газопроводу, по которому движется запыленный газ с объемным расходом Q . Вследствие этого прямоугольный сепаратор получил такие же геометрические размеры внешнего корпуса, как и у рассматриваемого циклона. При исследованиях принималось, что сепаратор присоединяется к линии подачи воздуха, заменяя циклон. Таким образом, движущийся многофазный поток газа входил в сепаратор через входной патрубок, по мере движения газа внутри сепаратора, обтекая и контактируя с двутавровыми элементами, газ очищался и выходил из устройства через выходной патрубок (рис. 1).

Ранее проведенные исследования показали, что для высокоэффективной очистки газа достаточно 5 рядов двутавровых балок. Для повышения эффективности сепарации газа двутавровые элементы расположены внутри аппарата таким образом, чтобы достигалось максимальное значение центробежной силы, действующей на частицы, при прохождении газа между двумя соседними рядами балок. Для этого необходимо выполнение следующего условия: окружность, проведенная из центра двутавра, должна проходить через крайние

точки выступов двутавровых элементов соседних рядов. Иными словами, расстояние между соседними рядами двутавровых элементов L можно определить по формуле:

$$L = \frac{b(k+1)}{2}, \quad (1)$$

где b – длина двутавра, м; k – безразмерный коэффициент, зависящий от размеров двутавра.

Безразмерный коэффициент k был введен для удобства оценки влияния размеров двутаврового элемента на потери давления в аппарате и на его эффективность:

$$k = \frac{h_1}{b}, \quad (2)$$

где h_1 – длина выступа двутаврового элемента, м.

В ходе исследований параметры окружающей среды на выходе из устройств были заданы нормальными: атмосферное давление 101325 Па, температура воздуха 273,15 К. Также постоянными оставались такие параметры, как начальная скорость частиц $w_0 = 0$ м/с; число частиц, находящихся в газе, $n = 1000$; массовый расход частиц $G = 10$ г/с. Для получения зависимостей изменялся объемный расход на входе в устройства $Q = 0,05-0,444$ м³/с, диаметр частиц, находящихся в газе, $a = 1-10$ мкм.

Эффективность E улавливания мелкодисперсных частиц на пяти рядах балок прямоугольного сепаратора определялась по формуле:

$$E = \frac{n - n_k}{n}, \quad (3)$$

где n_k – число, осевших частиц на двух рядах балок. Эффективность циклона определялась по этой же формуле, под n_k принималось количество частиц, уловленных циклоном.

Коэффициент гидравлического сопротивления в прямоугольном сепараторе рассчитывалось по формуле:

$$\xi = \frac{1}{2} \Delta p \frac{b}{h} \frac{1}{\rho w^2}, \quad (4)$$

где Δp – потери давления в сепараторе, Па; h – расстояние между первым и последним рядом двутавровых элементов, м (рис. 1); ρ – плотность газа, кг/м³; w – скорость в сужении прямоугольного сепаратора, м/с.

Изменение расположения двутавровых элементов, их количество в одном ряду, длина и ширина каждого двутавра может влиять на эффективность сепарации газового потока и на гидравлическое сопротивление аппарата. В связи с этим также были произведены исследования для определения оптимальных параметров b , k и числа двутавров в одном ряду. При этом ширина и высота входного патрубка всегда оставались постоянными.

Результаты и их обсуждение

Результаты численных исследований были представлены графически на рис. 2-4. Проведенные численные исследования показали, что использование прямоугольного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц диаметром 1-10 мкм позволяет очистить многофазный газовый поток эффективнее циклона. При этом сепаратор обладает меньшим гидравлическим сопротивлением относительно циклона.

На рис. 2 проиллюстрирована зависимость эффективности сепарации газа циклоном и прямоугольным сепаратором для разного диаметра частиц. При объемном расходе $Q = 0,444$ м³/с эффективность сепаратора в среднем на 52% выше эффективности циклона ЦН-11-400 при сепарации газа от частиц диаметром до 8 мкм. Для частиц диаметром более 9 мкм эффективность сепаратора и циклона практически одинакова 99,7-100%. Уменьшение объемного расхода Q от 0,888 до 0,222 м³/с влечет существенное снижение эффективности сепарации газового потока циклоном до 15%. Поддержание высоких значений объемного расхода на входе в циклон нерентабельно, вследствие высокого гидравлического сопротивления в аппарате. Поэтому для повышения эффективности циклона и уменьшения его гидравлического сопротивления используют батарейные циклоны – аппараты, состоящие из нескольких параллельно включенных циклонов. Однако использование

батарейных циклонов влечет увеличение занимаемых производственных площадей, также повышается металлоемкость аппарата и его стоимость. Уменьшение входного объемного расхода Q с 0,444 до 0,05 м³/с в прямоугольном сепараторе уменьшает его эффективность сепарации всего на 4 %, при этом существенно снижается гидравлическое сопротивление аппарата, потери давления составляют 360 Па. При прочих аналогичных параметрах потери давления в циклоне составляют 540 Па.

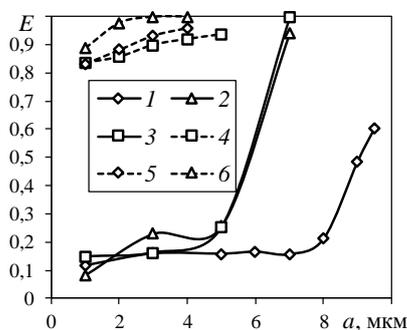


Рис. 2. Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц от их диаметра при Q , м³/с: 1 – 0,222, 2 – 0,444, 3 – 0,888, 4 – 0,05, 5 – 0,111, 6 – 0,444; штрих пунктирные линии – прямоугольный сепаратор, сплошные линии –циклон

Прямоугольный сепаратор можно использовать по принципу батарейного циклона. Для этого несколько сепараторов собираются в одном корпусе, где включаются параллельно друг другу. Такая компоновка позволит достичь высокой эффективности улавливания твердых частиц при низком гидравлическом сопротивлении. При этом габариты данного устройства будут в несколько раз меньше габаритов батарейного циклона.

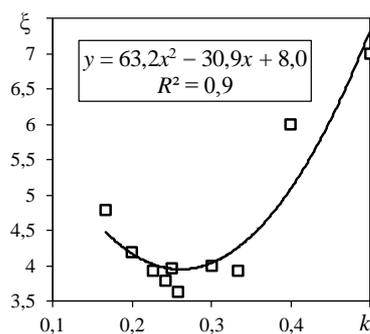


Рис. 3. Коэффициент гидравлического сопротивления прямоугольного сепаратора при разных значениях безразмерного коэффициента

Серия численных исследований позволила установить, что размеры выступов двутавровых элементов существенно влияют на гидравлические потери в прямоугольном сепараторе и на его эффективность. При $k = 0,24$ достигается наименьшее значение коэффициента гидравлического сопротивления сепаратора $\xi = 3,8$ (рис. 3). По формуле (2) можно определить, что оптимальными размерами двутаврового элемента являются: $h_1 = 3,12$ мм при $b = 13$ мм.

Установив, оптимальное значение безразмерного коэффициента $k = 0,24$ (рис. 3), было произведено исследование для нахождения оптимальной длины двутаврового элемента при данном значении k (рис. 4). Таким образом, при необходимости сепарации газового потока от мелкодисперсных частиц любого диаметра максимальная эффективность прямоугольного сепаратора достигается при значении длины двутаврового элемента $b = 13$ мм. Стоит отметить, что в ходе данного исследования (рис. 4), для изменения длины двутаврового элемента изменялось количество двутавров в одном ряду, чтобы сохранить неизменность геометрических размеров внешнего корпуса прямоугольного сепаратора. Это позволило сопоставить прямоугольный сепаратор с циклоном ЦН-11-400. Установлено, что использование прямоугольного сепаратора позволяет улавливать до 100% частиц малого диаметра в диапазоне 1-10 мкм.

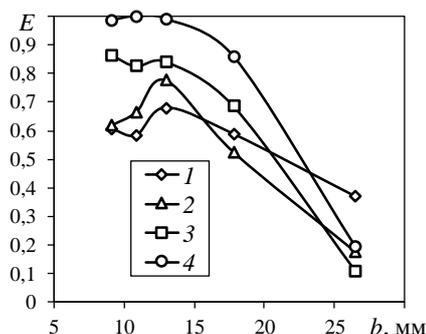


Рис. 4. Эффективность прямоугольного сепаратора от длины балки двутаврового элемента при a , мкм:
1 – 1, 2 – 3, 3 – 5, 4 – 7

Заключение

Вследствие высокой эффективности очистки газового потока от мелкодисперсных частиц диаметром до 10 мкм прямоугольным сепаратором и его низкого гидравлического сопротивления, его можно использовать как альтернативу циклону, либо в качестве дополнительного устройства для первичной очистки газов. Максимальные значения эффективности сепаратора и минимальные значения его гидравлического сопротивления достигаются при длине двутаврового элемента $b = 13$ мм и при длине его выступов $h_1 = 3,12$ мм. Достоинства прямоугольного сепаратора: малая металлоемкость, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц, простота изготовления.

Литература

1. Yu B., Shen C. Environmental regulation and industrial capacity utilization: An empirical study of China // Journal of Cleaner Production. 2020. V.246. pp. 118986.
2. Fan S., Wang X., Lang X., et al. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant // Natural Gas Industry B. 2017. N6. pp. 470-476.
3. Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с.
4. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., et al. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications // Journal of Aerosol Science. 2017. V.110. pp. 53-69.
5. Ren H., Koshy P., Chen W.-F., et al. Photocatalytic materials and technologies for air purification // Journal of Hazardous Materials. 2017. V.325. pp. 340-366.
6. GacJ M., Jackiewicz A., Werner L., et al. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters // Separation and Purification Technology. 2016. V. 170. pp. 234-240.
7. Иванков Д.И., Гритчин Р.Д., Тюрин А.Н. Анализ работы циклонов для пылеулавливания // Молодой ученый. 2016. №13(117). С. 165-168.
8. Фадин Ю.М., Богданов В.С., Юрьева М.В., и др. Возвратно-поточные циклоны истоки возникновения и направления совершенствования // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2017. №5. С. 104-109.
9. Веригин А.Н., Федоров В.Н., Малютин М.С. Конструкция современных циклонов для пылеулавливания. СПб:Издат. С.-Петербургского университета, 2000. 336с.
10. Асламова В.С., Асламов А.А., Ляпустин П.К., Гендин Д.В. Промышленные испытания группового прямооточного циклона с промежуточным отбором пыли // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2007. № 2-1 (30). С. 6-8.
11. Baltrenas P., Pranskevicius M., Venslovas A. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency // Energy Procedia. 2015. V.72. pp. 188-195.
12. Беляева Г.И., Замалиева А.Т. Исследование возвратно-поточного элемента мультициклона для очистки газа на газораспределительных станциях // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 118-122.
13. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 78-80.
14. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., и др. Устройство для тонкой пылегазоочистки. Патент РФ на полезную модель № 171615. 07.06.2017. Бюл. № 16. Доступно по: https://www1.fips.ru/ofpstorage/BULLETIN/IZPM/2017/06/10/INDEX_RU.HTM
15. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Данг С.В., и др. Сепаратор для улавливания мелкодисперсных капель из газовых потоков промышленных предприятий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. Т.55. № 4. С. 37-39.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, заведующий кафедрой Теоретические основы теплотехники, Казанский государственный энергетический университет.

Зинуров Вадим Эдуардович – магистрант, Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры Теоретические основы теплотехники, Казанский государственный энергетический университет.

Нгуен Ву Линь – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Yu B, Shen C. Environmental regulation and industrial capacity utilization: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 246:118986. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118986.
2. FanS, WangX, LangX, et al. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant. *Natural Gas Industry B*. 2017;(6):470-6. doi: 10.1016/j.ngib.2017.09.009.
3. Strauss W. *Industrial gas cleaning*. Oxford, USA; New York, USA: University of Melbourne, Pergamon Press, 1976(Russ. ed.: Straus V. Promyshlennaya ochestka gazov. Moscow: Himiya Publ.,1981; 616 p.
4. Sagot B, Forthomme A, Ait Ali Yahia L, et al. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications. *Journal of Aerosol Science*. 2017; 110:53-69. doi: 10.1016/j.jaerosci.2017.05.009.
5. Ren H, Koshy P, Chen W-F, et al. Photocatalytic materials and technologies for air purification. *Journal of Hazardous Materials*. 2017; 325:340-66. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.08.072.
6. Gac JM, Jackiewicz A, Werner L, et al. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Separation and Purification Technology*. 2016; 170:234-40. doi: 10.1016/j.seppur.2016.06.057
7. Ivankov DI, Gritchin RD, Tyurin AN. Analiz raboty ciklonov dlya pyleulavlivaniya. *Molodojuchenyj*. 2016;117(13):165-8.
8. Fadin YM, Bogdanov VS, Yur'eva MV, et al. Vozvratno-potochnyeciklony. Istok i voznikoveniya i napravleniya sovershenstvovaniya. *Vestnik BGTU imeni V.G. Shuhova*. 2017;(5):104-9. doi: 10.12737/article_590878fb4a9c99.71247127.
9. Verigin AN, Fedorov VN, Malyutin MS. *Konstrukciya sovremennyh ciklonov dlya pyleulavlivaniya*. Sankt-Peterburg: Izdat. S.-Peterburgskogouniversiteta; 2000.
10. Aslamova VS, Aslamov AA, Lyapustin PK, et al. Promyshlennye ispytaniya gruppovogo pryamotchnogo ciklona s promezhutochnym otborom pyli. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007;30(2-1):6-8.
11. Baltrenas P, Pranskevicius M, Venslovas A. Optimization of the new generation multichannel cyclone cleaning efficiency. *Energy Procedia*. 2015; 72:188-95. doi: 10.1016/j.egypro.2015.06.027.
12. Belyaeva GI, Zamalieva AT. Issledovanie vozvratno-potochnogo elementa mul'ti tsiklona dlya ochestki gaza na gazoraspredeitel'nykh stantsiyakh. *Gazovaya promyshlennost'*. 2017;753(6):118-22.
13. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ulavlivanie chastic iz dymovyh gazov pryamougol'nymi separatorami. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017;20(15):78-80.
14. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Madyshev IN, et al. *Ustrojstvo dlya tonkoj pylegazoochestki*. Patent RUS N 171615. 07.06.2017. Byul. N16. Available at: https://www1.fips.ru/ofpstorage/BULLETIN/IZPM/2017/06/10/INDEX_RU.HTM.
15. Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Dang SV, et al. Separator for separation of finely dispersed droplets from gas flows generated by industrial enterprises. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019;55(4):37-39. doi: 10.1007/s10556-019-00623-8.

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: iremiada@gmail.com.

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Oksana S. Dmitrieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vu Linh Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

10 апреля 2018 г.



ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ВЕТРО-СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ДИЗЕЛЬНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

А.Ю. Лаврик^{*1}, Ю.Л. Жуковский¹, А.Ю. Лаврик², А.Д. Булдыско^{*1}

¹Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID^{*}: <https://orcid.org/0000-0001-8481-8034>, lavrik.alexander@gmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-0019>, [spm_i_energo@mail.ru](mailto:spmi_energo@mail.ru)

Резюме: в статье приведены результаты одноцелевой оптимизации состава гибридного комплекса, включающего ветро-солнечную и дизельную электростанцию, по критерию минимальной себестоимости выработанной электроэнергии для небольшого населённого пункта в заданных географических условиях. Дана оценка влиянию учёта дополнительного критерия ограничения капитальных затрат на результат решения задачи оптимизации. Показано, что соотношение долей солнечной и ветровой электростанции непостоянно при изменении располагаемых капитальных затрат и меняется вплоть до исключения одного из возобновляемых источников энергии из состава комплекса.

Ключевые слова: гибридная электростанция, ветро-солнечная станция, состав, возобновляемые источники энергии, оптимизация.

Благодарности: Работа выполнена в рамках исследований по Государственному заданию 13.3746.2017/ПЧ «Разработка научно обоснованных методов и средств синтеза структуры и реализации централизованных, автономных и комбинированных систем электроснабжения повышенной надежности с использованием альтернативных и возобновляемых источников для бесперебойного энергообеспечения предприятий с непрерывным технологическим циклом на основе логико-вероятностных оценок».

Для цитирования: Лаврик АЮ., Жуковский ЮЛ., Лаврик АЮ., Булдыско АД. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 10-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.

FEATURES OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF A WIND-SOLAR POWER PLANT WITH DIESEL GENERATORS

AY Lavrik^{*1}, YL Zhukovsky¹, AY Lavrik², AD Buldysko¹,

¹Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

²ITMO University, Saint Petersburg, Russia

ORCID^{*}: <https://orcid.org/0000-0001-8481-8034>, lavrik.alexander@gmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-0019>, [spm_i_energo@mail.ru](mailto:spmi_energo@mail.ru)

Abstract: The article presents the results of a single-purpose optimization of the composition of the hybrid complex consist of the wind-solar and diesel power plants, according to the criterion of the minimum cost of electricity for a small settlement in given geographical conditions. An estimation of the impact of an additional criterion for the total investment cost limitation on a result of solving an optimization problem is given. It is shown that the ratio of the proportions of the solar and wind power plants is not constant when total investment cost changes and it changes to the exclusion of one of the renewable energy sources from the complex.

Keywords: hybrid power plant, wind-solar plant, composition, renewable energy sources, optimization.

Acknowledgments: The work was performed as part of research on the State Task 13.3746.2017 / PC "Development of scientifically based methods and means of synthesizing the structure and

implementation of centralized, autonomous and combined power supply systems of increased reliability using alternative and renewable sources for uninterrupted energy supply to enterprises with an uninterrupted technological cycle based on logic-probability estimates.

For citation: Lavrik AY, Zhukovsky YL, Lavrik AY, Buldysko AD. Features of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):10-17. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.

Введение

Согласно данным Росстата, по состоянию на 2017 г. в России эксплуатировалось порядка 36 тысяч малых электростанций мощностью до 25 МВт, а совокупная мощность объектов распределенной генерации оценивалась в 13 ГВт. Около 70% из них расположено в зоне децентрализованного энергоснабжения [1]. Порядка 1 тысячи электростанций имеют мощность более 0,5 МВт, в то время как средняя мощность оставшихся 35 тысяч составляет около 30 кВт. Сейчас на долю возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приходится 8% этих объектов.

В последние десятилетия установившийся тренд на децентрализацию и использование ВИЭ отражается в выборе состава генерирующих комплексов многих развитых стран [2]. Данная стратегия закреплена и Министерством энергетики РФ – целевой показатель доли ВИЭ (за исключением гидроэлектростанций с установленной мощностью более 25 МВт) в производстве и потреблении электроэнергии страны к 2024 г. должен составить 4,5%¹. Установленную мощность объектов генерации на основе ВИЭ к этому времени планируется довести до 5,9 ГВт.

Стоит отметить, что всё большее распространение в мире получают гибридные электростанции, включающие в себя два и более возобновляемых источника, как правило – солнечную (СЭС) и ветряную (ВЭС) электростанцию. Несмотря на специфику становления возобновляемой энергетики в России, обусловленную большими запасами углеводородов, такие гибридные комплексы актуальны и для нашей страны. Прежде всего их применение целесообразно рассматривать в районах, где энергоснабжение традиционно осуществляется дизельными электростанциями (ДЭС), работающими на привозном топливе, для электроснабжения населённых пунктов и вахтовых посёлков [3], геологоразведочных и метеорологических станций, аппаратуры трубопроводов [4, 5] и др.

Важным направлением исследований гибридных комплексов на базе двух и более ВИЭ является изучение вопросов выбора их оптимального состава. Данной тематике посвящён ряд работ иностранных авторов [6-9], а также отечественные работы [4-5, 10]. Вместе с тем, сложность задачи оптимизации объясняет большое количество нерассмотренных или нерешённых вопросов, в частности – влияние учёта различных критериев на результат решения задачи.

Методы многокритериального поиска

В настоящее время известно большое количество методов определения оптимального состава гибридных комплексов [11]: классические (итерационные, аналитические, графические, линейные), современные (искусственные и гибридные), компьютерные (генетические алгоритмы). Часть из них предполагает широкое использование усреднённых статистических данных об уровне инсоляции, скорости ветра, суточном графике нагрузки и т.д.

Некоторые методы, например, компьютерные, позволяют увеличить детализацию расчётов. Они предполагают использование ретроспективных данных об инсоляции и скорости ветра через малые промежутки времени (вплоть до каждого часа года), а также набор усреднённых суточных графиков нагрузки [12]. Техничко-экономические параметры рассчитываются для каждого промежутка времени на протяжении всего периода эксплуатации гибридной электростанции [6]. К недостаткам такого подхода можно отнести необходимость наличия большой детализированной базы метеорологических данных за предшествующие годы, а к преимуществам – возможность моделирования работы комплекса на любом этапе эксплуатации, что позволяет оптимизировать режимы его работы. Отказ от использования большого числа средних значений можно оценивать по-

¹Об утверждении Основных направлений государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года (с изменениями на 15 мая 2018 года): Распоряжение Правительства РФ от 8 янв. 2009 г. N 1-р // Собрание законодательства РФ. 2009. №4. С. 515.

разному: с одной стороны, появляется отклонение от статистически выверенного типового описания метеоусловий, с другой – могут быть учтены изменения климата и в целом снижена вероятность использования устаревшей и неактуальной статистической информации.

Большая часть классических методов используют одноцелевую оптимизацию, в то время как более современные методы позволяют определить оптимальный состав комплекса на основе нескольких критериев. Как правило, главным критерием выбирается себестоимость электроэнергии, однако оптимизация может вестись и с учётом других критериев – стоимости жизненного цикла, суммы капитальных затрат, эмиссии CO₂, вероятности потери источника питания, количеству бросовой энергии (энергии дампа) и т.д.

Например, в работе [6] для определения оптимальной структуры автономного гибридного комплекса ветро-солнечной электростанции с резервированием ДЭС и аккумуляторами использовался генетический алгоритм, а оптимизация велась по критериям себестоимости электроэнергии, надёжности и экологичности. На основе математического описания, представленного в работе [6], был определён оптимальный состав гибридного комплекса для выбранной местности – посёлка Нижнеянк республики Саха (Якутия).

В качестве исходных данных были взяты 12 типовых графиков электрической нагрузки, а также почасовые значения инсоляции и скорости ветра за последний год. С целью упрощения расчётов значения массива метеоданных были распространены на весь расчётный срок эксплуатации станции, взятый по паспортному сроку службы СЭС – 25 лет. Программа расчёта была реализована в программе *MO Excel* и его приложении *VBA*. Поиск решения вначале осуществлялся по единственному критерию наименьшей себестоимости электроэнергии, что позволило использовать метод подбора вместо сложнее реализуемого генетического алгоритма.

Первым шагом было оптимизировано количество ветрогенераторов выбранного типа (*Condor Air WES 380/50-50*, установленная мощность 50 кВт), следующим шагом – количество фотоэлектрических преобразователей (монокристаллические панели Квант КСМ 200, номинальная мощность 200 Вт), после чего установленную мощность ВЭС снова было необходимо корректировать; данные итерации повторялись до нахождения решения задачи.

После получения решения анализировалось влияние на него учёта дополнительного ограничивающего критерия – капитальных затрат.

Математическое моделирование

Вырабатываемая фотоэлектрическим преобразователем (ФЭП) мощность определялась выражением (1).

$$P_{\text{ФЭП}} = S_{\text{ФЭП}} \times H \cdot \eta_{\text{ФЭП}} \quad (1)$$

где $S_{\text{ФЭП}}$ – полезная площадь ФЭП, м²; H – суммарная солнечная радиация на наклонную поверхность, кВт/м²; $\eta_{\text{ФЭП}}$ – КПД ФЭП.

Вырабатываемая ветроэнергетической установкой (ВЭУ) мощность определялась выражением (2).

$$P_{\text{ВЭУ}} = \begin{cases} 0 & V < V_{\text{вкл}} \\ \eta_{\text{ВЭУ}} \times P_{\text{н ВЭУ}} \left(\frac{V^3 - V_{\text{вкл}}^3}{V_{\text{ном}}^3 - V_{\text{вкл}}^3} \right) & V_{\text{вкл}} < V < V_{\text{ном}} \\ \eta_{\text{ВЭУ}} \times P_{\text{н ВЭУ}} & V_{\text{ном}} < V < V_{\text{откл}} \\ 0 & V > V_{\text{откл}} \end{cases} \quad (2)$$

где V – скорость ветра на высоте гондолы ВЭУ, м/с; $V_{\text{вкл}}$ – скорость ветра, при которой происходит включение ВЭУ, м/с; $V_{\text{откл}}$ – скорость ветра, при которой происходит отключение ВЭУ, м/с; $V_{\text{ном}}$ – номинальная скорость ветра, м/с; $\eta_{\text{ВЭУ}}$ – КПД ВЭУ.

Для учёта затрат на преобразовательную технику были выбраны гибридные инверторы с мощностью одного устройства 60 кВт.

Потребление топлива ДЭС определялось по формуле (3) [13].

$$F = (0,246 \times E_{\text{д}}) + (0,08415 \times P_{\text{н,ДГУ}}), \quad (3)$$

где $P_{\text{н,ДГУ}}$ – номинальная мощность дизель-генераторной установки (ДГУ), кВт; 0,246 и 0,08415 – эмпирические коэффициенты, л./кВт [13]; $E_{\text{д}}$ – дефицит электроэнергии, определяемый как разность вырабатываемой мощности ВИЭ и мощности нагрузки, потребляемой в рассматриваемый час.

Принятая продолжительность жизненного цикла СЭС и инверторного оборудования принята равной 25 годам [7], ВЭУ – 15 годам [6], ДГУ – 25280 ч [6]. При этом капитальные

затраты приняты следующими: ФЭП – 19,5 тыс. руб./ед., ВЭУ – 2500 тыс. руб./ед., инвертор – 1,38 тыс. руб./ед., ДГУ – 21 руб./кВт установленной мощности [7]. Стоимость арктического дизельного топлива принята равной 45 тыс. руб./т, а с учётом транспортного коэффициента, методика определения которого дана в работе [14] – 63 тыс. руб./т.

Таким образом, в экономическом расчёте учитывались капитальные затраты, в том числе на замену оборудования с истекшим сроком эксплуатации, а также эксплуатационные затраты, учитывающие закупку и доставку дизельного топлива. Дисконтирование денежных средств в течение срока эксплуатации комплекса не учитывалось.

В ходе исследований была поставлена задача одноцелевой оптимизации, при которой главным критерием выбрана себестоимость электроэнергии (*COE – Cost of Electricity*), рассчитываемая по формуле

$$COE = \frac{LCC}{E_{\text{сумм}} - D}, \quad (4)$$

где *LCC* – стоимость жизненного цикла (*LCC – Life Cycle Cost*), руб.; $E_{\text{сумм}}$ – количество выработанной электроэнергии за весь жизненный цикл комплекса, кВт·ч; *D* – бросовая электроэнергия (энергия дампа), кВт·ч.

Результаты

В ходе исследования были рассмотрены различные варианты построения комплекса:

- ДЭС без использования ВИЭ;
- Ветро-дизельная электростанция;
- Солнечно-дизельная электростанция;
- Ветро-солнечная электростанция с резервированием ДЭС.

Для данных вариантов определен оптимальный состав генерирующего комплекса. Установленные мощности оборудования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальная установленная мощность оборудования электростанций при различных вариантах построения комплекса, кВт

Часть генерирующего комплекса		Варианты построения генерирующего комплекса			
		ДЭС	ДЭС+СЭС	ДЭС+ВЭС	ДЭС+СЭС+ВЭС
ДЭС	ДГУ 1	240	260	260	260
	ДГУ 2	140	125	125	125
	ДГУ 3	70	65	65	65
СЭС		-	920	-	288
ВЭС		-	-	2050	1850

Были определены различные технико-экономические параметры указанных вариантов².

На рис. 1 приведены капитальные затраты *C* и стоимость жизненного цикла *LCC* рассмотренных вариантов.

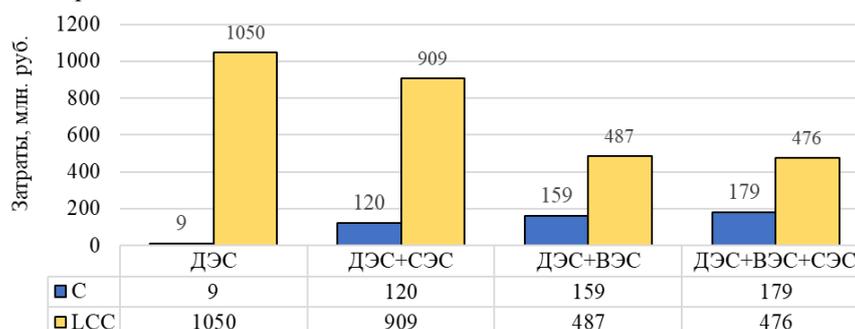


Рис. 1. Капитальные затраты и стоимость жизненного цикла

² В исследовании не учитывались мощности аккумуляторных батарей.

Минимальный показатель LCC достигается при значительных капиталовложениях. Вместе с тем стоит отметить, что для каждой топологии определены оптимальные варианты, т.е. дальнейшее наращивание мощности и, следовательно, капитальных затрат повлечёт увеличение LCC .

На рис. 2 приведено потребление ДТ.

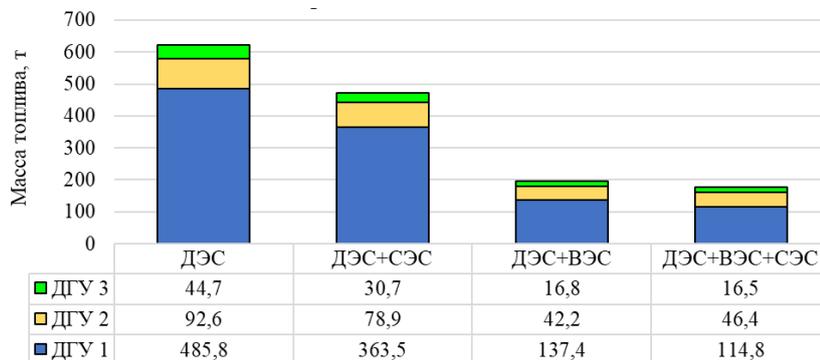


Рис. 2. Потребление дизельного топлива различных вариантов

Из рис. 2 видно, что варианту №4 соответствует наименьший расход требуемого ДТ. В табл. 2 приведена себестоимость электроэнергии.

Таблица 2

	Себестоимость электроэнергии			
	Варианты построения генерирующего комплекса			
	ДЭС	ДЭС+СЭС	ДЭС+ВЭС	ДЭС+СЭС+ВЭС
Себестоимость электроэнергии, руб.	16,58	14,36	7,70	7,51

Наименьшая себестоимость электроэнергии составляет 7,51 руб./кВт·ч и относится к варианту №4. Так как основным критерием оптимизации была определена себестоимость электроэнергии, вариант №4 (ДЭС+СЭС+ВЭС) можно считать оптимальным при заданных условиях.

Обсуждение

На рис. 3 показана зависимость стоимости жизненного цикла от капитальных затрат для вариантов №2 и №3 – при наличии в составе комплекса только ВЭС или только СЭС.

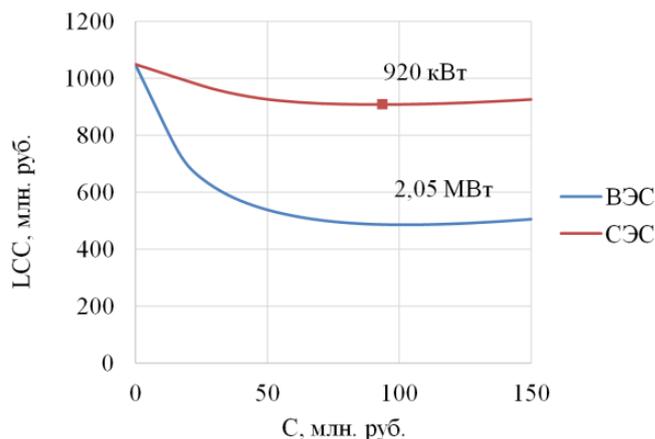


Рис. 3. Зависимость стоимость жизненного цикла от капитальных затрат

Стоимость жизненного цикла в рассматриваемом случае является функцией от величины капитальных затрат:

$$LCC = f(C). \quad (5)$$

Тогда производная данной функции покажет скорость изменения LCC с увеличением капитальных затрат C (рис. 4).

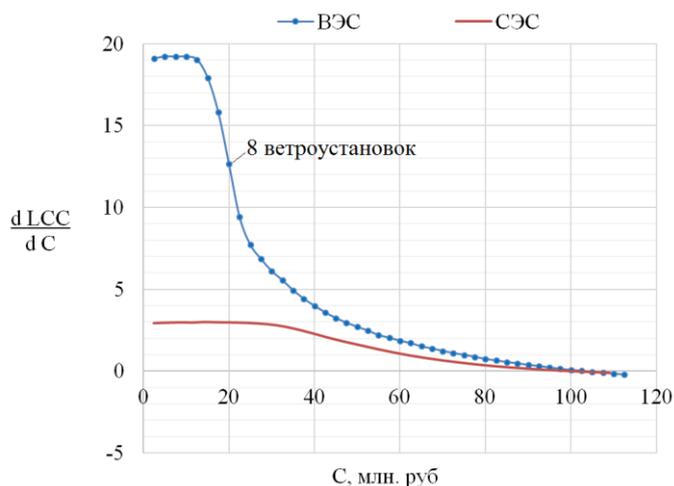


Рис. 4. Скорость изменения стоимости жизненного цикла в зависимости от величины капитальных затрат на СЭС (вариант №2) или на ВЭС (вариант №3)

Анализ кривой ВЭС на рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что включение в состав гибридной электростанции первых 5 ВЭУ с большой эффективностью снижает стоимость жизненного цикла (точки на кривой ВЭС соответствуют количеству ВЭУ). С каждой следующей ВЭУ уменьшение LCC будет оказываться всё меньше, пока величина LCC не начнёт расти – кривая производной пересечёт ось абсцисс и уйдёт в область отрицательных значений.

Аналогичным образом ведёт себя кривая СЭС на рис. 4. Однако существенно то, что включение в состав гибридного комплекса ФЭП изначально даёт меньший эффект в сравнении с ветрогенераторами. Из этого следует важный вывод: в результате оптимизации состава гибридного комплекса ВСЭС с учётом критерия капитальных затрат соотношение между долями ВЭС и СЭС будет иным, нежели при оптимизации без учёта капитальных затрат.

Например, при ограничении капиталовложений в ВИЭ в составе комплекса на уровне 20 млн. руб. (без учёта сетевых инверторов), оптимальной конфигурацией гибридного комплекса будет являться ДЭС и ВЭС из 8 ВЭУ (рис. 4). В то же время как включение в состав ФЭП даст меньший эффект, чем наращивание мощности ВЭС, и является нецелесообразным. Однако при увеличении лимита капитальных затрат на внедрение ВИЭ и достижения им определённого уровня, отслеживаемого на рис. 4, в состав комплекса становится целесообразным включение ФЭП.

Выводы

Определение оптимального состава гибридного комплекса ВСЭС в соответствии с выбранными критериями является необходимым условием эффективности его работы. Одним из самых распространённых критериев оптимизации является себестоимость вырабатываемой комплексом электроэнергии, т.к. этот параметр учитывает как капитальные, так и эксплуатационные затраты (т.е. и стоимость жизненного цикла). Вместе с тем, в реальной практике требуется учёт дополнительных критериев: устанавливается верхний предел капитальных затрат, либо других экономических критериев (например, нижний предел окупаемости инвестиций).

В ходе анализа результатов однокритериальной оптимизации состава гибридного комплекса для посёлка Нижнеянк республики Саха (Якутия) было проанализировано влияние критерия ограничения капитальных затрат на результат решения задачи. Показано, что соотношение между долями ВЭС и СЭС, рассчитанное методом однокритериальной оптимизации и равное 6,4/1, не постоянно и меняется в зависимости от уровня располагаемых инвестиций.

Важно отметить, что комбинирование различных источников ВИЭ в ряде случаев демонстрирует улучшенные технико-экономические показатели [15], однако целесообразности такого технического решения должна быть дана комплексная оценка.

Литература

1. Маркова ВМ. Возможности повышения эффективности и оптимизации структуры энергетики: роли «большой» и «малой» генерации // Мир экономики и управления. 2017. №3 (17). С. 62-84.

2. Яковлева ЭВ., Сизякова, Ю.Л. Жуковский и др. Анализ перспектив регионального развития интеллектуальных энергетических систем // Российский экономический интернет-журнал. 2018. №2. С. 107-120.
3. Попель ОС. Перспективные технологии малой и возобновляемой энергетики для освоения и развития арктической зоны Российской Федерации // Государственный аудит. Право. Экономика. 2017. №1. С. 44-52.
4. Суслев КВ., И.Н. Шушпанов, Д.В. Воронцов. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №1-2. С. 70-79.
5. Туровин ОА., Огнев ЕН., Кочнев АЕ. Применимость ветро-солнечной энергетики в качестве альтернативного источника электроснабжения нефтяных объектов компании // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2017. №2. С. 69-74.
6. Ogunjuigbe, ASO., Ayodele TR., Akinola OA. (). Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. Applied Energy. 2016. V.171. pp. 153-171.
7. Bernal-Agustin JL., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso, D.M. (2006). Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. Renewable Energy. 31 (14), 2227-2244.
8. Abdel-Karim D., Ismail M., Kukhun W., et al. (). Simulation of a hybrid power system consisting of wind turbine, PV, storage battery and diesel generator: design, optimization and economical evaluation. International Journal of Energy Engineering. 2011.V.1. pp. 56-61.
9. Palival P., Patidar N., Nema RK. (). Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization. Renewable Energy. 2014. V.63. pp. 194-204.
10. Марченко ОВ., Соломин СВ. Анализ совместного использования энергии солнца и ветра в системах автономного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2016. №9. С. 39-43.
11. Al-falahi Monaaf DA., Jayasinghe SDG., Enshaei, H. (). A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. Energy Conversion and Management. 2017. V.143. pp. 252-274.
12. Соснина ЕН., Солнцев ЕБ., Липужин ИА. Анализ характеристик возобновляемых источников энергии и факторов влияющих на себестоимость выработки электроэнергии / Е.Н. Соснина, Е.Б. Солнцев, И.А. Липужин // Возобновляемая энергетика 21век: энергетическая и экономическая эффективность: материалы 4 Международного конгресса REENCON-XXI. М.: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2018. С. 114-120.
13. Ayodele TR, Ogunjuigbe ASO. (2015). Increasing household solar energy penetration through load partitioning based on quality of life: the case study of Nigeria. Sustainable Cities and Society 2015. V.18. pp. 21-31.
14. Дубровин ЕР., Дубровин ИР. Как снизить затраты на углеводородное топливо в Арктике // Энергетика и промышленность России. 2018. №01-02. С. 32-33.
15. Чижма СН., Молчанов СВ., Захаров АИ. Критерии выбора типа ветроустановок для мобильных ветро-солнечных электростанций // Вестник Балтийского федерального университета им. И.Канта. 2018. №1. С. 53-62.

Авторы публикации

Лаврик Александр Юрьевич – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет.

Жуковский Юрий Леонидович – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет.

Лаврик Анна Юрьевна – студент кафедры, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО.

Булдыско Александра Дмитриевна – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет.

References

1. Markova VM, Churashev VN. Opportunities to improve the efficiency and optimization of the energy structure: the role of "big" and "small" generation. *Mir ekonomiki i upravleniya*. 2017;3 (17)62-84.
2. Yakovleva EV, Sizyakova EV, Zhukovsky YuL, et al. Analysis of prospects for regional development of smart energy systems. *Rossiiskii ekonomicheskii internet-zhurnal*. 2018;2:107-120.
3. Popel OS. Perspective technologies of small and renewable energies for the development of the Arctic zone of the Russian Federation. *Gosudarstvennyi audit. Pravo. Ekonomika*. 2017;1:44-52.

4. Suslov KV, Shushpanov IN, Vorontsov DV. Use of renewable energy sources to power the pipeline's own need. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20(1-2):70-79.
5. Turovin OA, Ognev EN, Kochnev AE. Applicability of wind-solar energy as a renewable energy source of power supply for the company's oil facilities. *PRONEFT. Professional'no o nefti*. 2017;2:69-74.
6. Ogunjuyigbe ASO, Ayodele TR, Akinol OA. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Applied Energy*. 2016;171:153-171.
7. Bernal-Agustin J.L., Dufo-Lopez R., Rivas-Ascaso, D.M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy*. 2006;31 (14):2227-2244.
8. Abdel-Karim D, Ismail M, Kukhun W, et al. Simulation of a hybrid power system consisting of wind turbine, PV, storage battery and diesel generator: design, optimization and economical evaluation. *International Journal of Energy Engineering*. 2011;1:56-61.
9. Palival P, Patidar N., Nema RK. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using Particle Swarm Optimization. *Renewable Energy*. 2014; 63, 194-204.
10. Marchenko OV, Solomin SV. Analysis of the combined use of solar and wind energy in autonomous power supply systems. *Promyshlennaya energetika*. 2016;9:39-43.
11. Al-falahi Monaaf DA, Jayasinghe SDG., Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*. 2017;143:252-274.
12. Sosnina EN, Solntsev EB, Lipuzhin IA. Analysis of the characteristics of renewable energy sources and factors affecting the cost of electricity generation. *Renewable Energy 21st Century: Energy and Economic Efficiency: materials of the IV International Congress REENCON-XXI*. Moscow.: Ob'edinennyi institut vysokikh temperatur Rossiiskoi akademii nauk. 2018:114-120.
13. Ayodele TR, Ogunjuyigbe ASO. Increasing household solar energy penetration through load partitioning based on quality of life: the case study of Nigeria. *Sustainable Cities and Society*. 2015;18:21-31.
14. Dubrovin ER, Dubrovin IR. How to reduce hydrocarbon fuel costs in the Arctic. *Energy and Industry of Russia*. 2018;01-02:32-33.
15. Chizhma SN, Molchanov SV, Zakharov AI. Criteria for choosing the type of wind turbines for mobile wind-solar power station. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I.Kanta*. 2018;1:53-62.

Authors of the publication

Alexander Y. Lavrik – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia. Email: lavrik.alexander@gmail.ru.

Yuri L. Zhukovsky – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Anna Yu. Lavrik – ITMO University, Saint Petersburg, Russia.

Alexandra D. Buldysko – Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Поступила в редакцию

10 апреля 2019г.



ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Насыров¹ Р.Р., Альдженди² Р., Хербек³ Т.

^{1,2}Московский энергетический институт, г. Москва, Россия

³Тишрин университет, г. Латакия, Сирия

nasirov.rinat@gmail.com, aljendy_raseel@yahoo.com, dr.tarekkherbek@tishreen.edu.sy

Резюме: Совокупность характеристик, обуславливающих качество электроэнергии (КЭ) может быть использовано для описания состояния и эффективности работы системы электроснабжения с точки зрения влияния электромагнитных помех. Воздействие электромагнитных помех на электротехническое оборудование проявляется в сокращении времени безотказной работы, дополнительных потерях активной мощности, потерях данных т.д. Наиболее распространенными источниками помех в современных условиях являются электроприемники потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Данный вид электроприемников создает искажение формы кривой тока и напряжения. Ввиду широкого распространения таких электроприемников в быту и промышленности необходимо уделять особое внимание вопросам гармонических искажений. В данной статье представлены результаты измерений и анализа качества электроэнергии, а также показан эффект применения активного фильтра (АФ) с целью обеспечения качества электроэнергии в распределительной сети (66/20 кВ) города Латакия Сирийской Арабской Республики. Дано определение оптимальной емкости звена постоянного тока АФ с помощью метода роя частиц с целью минимизации суммарного коэффициента несинусоидальности тока и напряжения в исследуемой электрической сети.

Ключевые слова: качество электроэнергии, суммарный коэффициент несинусоидальности тока и напряжения, активный фильтр, метод роя частиц.

Для цитирования: Насыров РР., Альдженди Р., Хербек Т. Применение активного фильтра для нормализации качества электроэнергии в электрической сети, Сирийской Арабской Республики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-18-27.

POWER QUALITY ASSURANCE IN THE ELECTRICAL NETWORK OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC, USING THE ACTIVE POWER FILTER

RR Nasyrov¹, R Aljendy², T Kherbek³

^{1,2}Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

³Tishreen University, Latakia, Syria

nasirov.rinat@gmail.com, aljendy_raseel@yahoo.com, dr.tarek.kherbek@gmail.com

Abstract: The set of characteristics that determine the power quality (PQ) can be used to describe the state and efficiency of the power supply system in terms of the influence of electromagnetic interference. The impact of electromagnetic interference on electrical equipment is manifested in the reduction of uptime, additional losses of active power, data loss, etc. The most common sources of interference in modern conditions are consumers with non-linear volt-ampere characteristics. This type of electrical receivers creates a distortion of the current and voltage waveform. In view of the widespread use of these power consumers in daily life and industry, special attention should be paid to the problems of harmonic distortion. This article presents the results of measurements and analysis of the quality of electricity, and also shows the effect of applying an active filter (AF) to ensure the quality of electricity in the distribution network (66/20 kV) of the city of Lattakia in the Syrian Arab Republic. The definition of the optimal capacitance of

the AF dc link using the particle swarm method is given in order to minimize the total non-sinusoidal current and voltage in the studied electrical network.

Keywords: power quality, Total harmonics distortion (THD), Active power filter, Optimization, Particle swarm optimization.

For citation: Nasyrov RR, Aljendy R., Kherbek T. Power quality assurance in the electrical network of the syrian arab republic, using the active power filter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-18-27.

Введение

Качество электроэнергии влияет на производительность работы потребителей. Поэтому одна из задач работы системы электроснабжения может быть сформулирована как обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей напряжением, установленного качества [1-5].

В условиях роста числа потребителей и широкого распространения электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой, бурно развиваются средства компенсации высших гармоник. В последние годы АФ, как средство компенсации высших гармоник, стал растущей областью исследований благодаря усовершенствованию силовых электронных преобразователей [6-8]. Активные фильтры используют в качестве шунтирующих устройств для уменьшения гармоник, которые создаются нелинейными нагрузками и компенсируют реактивную мощность. В этой статье АФ используются для ослабления гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой в исследуемой электрической сети. Немаловажная роль играет определение оптимального значения емкости конденсатора фильтра (С), поскольку это значение, в свою очередь, влияет на работу АФ в целом. В данной работе для определения оптимального значения емкости конденсатора АФ использовался метода роя частиц (РЧ).

Краткая характеристики системы электроснабжения Сирии

Национальная электрическая сеть Сирии объединяет в синхронную работу всю территорию страны. Цепи переменного тока с номинальной частотой 50 Гц используются для передачи электроэнергии от генерации к потребителям. Номинальные уровни напряжения в системе образующей сети 400 кВ и 230 кВ, средний уровень напряжения 66 и 20 кВ [1-5]. Структура генерации электроэнергии в сирийской энергетической системе в период с 2010 до 2016 года представлены на рис.1 [1].

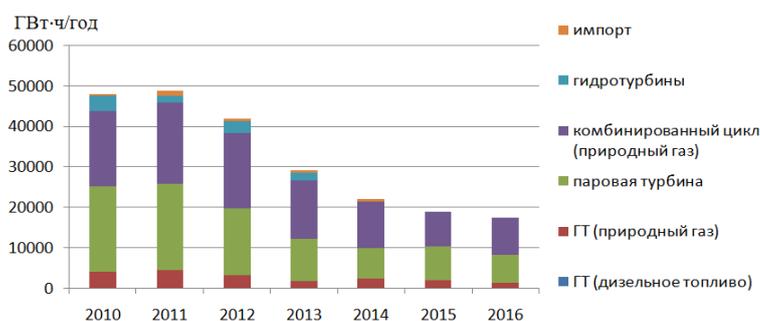


Рис.1 Структура генерации электроэнергии в сирийской энергетической системе.

Для Сирии характерен дефицит генерирующих мощностей. Со второй половины 80-х годов, вследствие осложнившейся политической обстановки, производство электроэнергии снизилось, спрос на нее не мог быть удовлетворен в полном объеме. К 1993 году баланс между производством и спросом на электроэнергию достиг максимального значения: при общей мощности генерации 1879 МВт, потребность в активной мощности в режиме наибольших нагрузок составляла 2376 МВт. Среди причин возрастания спроса на электроэнергию можно выделить относительно высокий прирост населения (3,36% в 1993 году), относительно быстрые темпы экономического роста (8,4% в период с 1990 по 1993 год) и потенциальный спрос со стороны горнодобывающей отрасли [1].

Все потребители электроэнергии условно делятся на следующие группы: коммунально-бытовые; промышленные; производственные потребители сельского хозяйства; прочие потребители. Распределение электроэнергии по типам потребителей в сирийской электрической системе на 2009 год представлено в табл.1.

Распределение электроэнергии по типам потребителей	
Тип потребителей	Процент потребления от общего объема
Коммунально-бытовые	51,6%
Промышленность	23,49%
Сельское хозяйство	7,02%
Обслуживание	10,08%
Добывающая промышленность и переработка нефти	2,77%
Государственные органы, храмы и уличного освещения	4,01%
Изделия ручной работы и другие	1,02%

Как видно из приведенной выше таблицы, промышленный сектор является вторым по объему потребляемой электроэнергии в Сирийской Арабской Республике, где большинство городов являются промышленными, например, Дамаск, Алеппо и Латакия [4].

Анализ состояния качества электроэнергии в городе Латакия

Исследуемая электрическая сеть г. Латакия состоит из 12 трансформаторных подстанций 66/20 кВ. Нагрузка представляет собой промышленные предприятия, коммунально-бытовые нагрузки и мелкая промышленность. Схема электроснабжения г. Латакия представлена на рис.2.

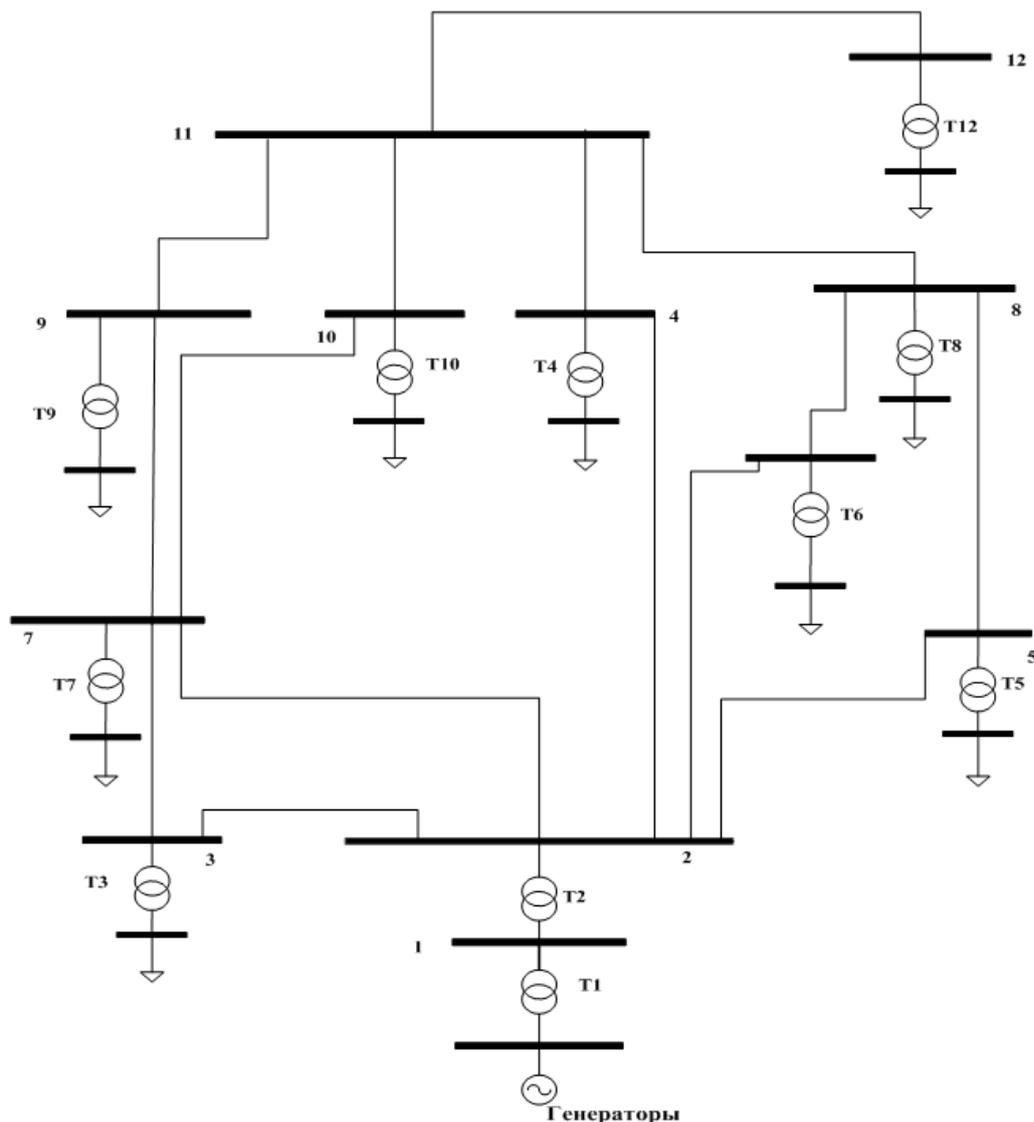


Рис.2. Распределительная схема электрической сети в Латакии (66/20 кВ)

Мощность и число трансформаторы в каждом подстанции представлены в табл.2.

Таблица.2

Мощность и число трансформаторов

	число трансформаторов	Мощность (МВА)
3 – Жилой квартал	2	30
4 – Тишрийн Университет	2	20
5 – Жилой квартал	2	30
6 – Завод автомобилей	2	20
7 – Порт	2	30
8 – Текстильный завод	2	20
9 – Жилой квартал	2	30
10 – Спортивный город	2	20
12 – Жилой квартал	2	20

Морской порт Сирии и военная морская база (ВМБ), расположенные в г. Латакия, находятся на побережье Средиземного моря и включают в себя рейд, внешнюю гавань, защищенную молотом, и 2 внутренних бассейна. ВМБ и порт Латакии доступны для кораблей и судов с осадкой до 8 м. Длина причального фронта около 2 км с глубинами 3,3-9,5 м. Суммарный оборот морских грузоперевозок порта около 2,4 млн. т [1].

Порт Латакии был основан 12 февраля 1950 г. В соответствии с Декретом № 38 поручено развивать морской порт. Порт способствует обслуживанию национальной экономики, внешней торговли Сирии и международной транзитной службы.

В силу наличия нелинейной нагрузки порта, провиделись исследования КЭ на подстанции порта. Искажения напряжения характеризуются коэффициентом искажения синусоидальной формы кривой напряжения, обозначает в Российской литературе K_U , однако в английской литературе обозначает U_{thd} , а I_{thd} (*Total Harmonic Distortions*) для характеристики искажения синусоидальной формы кривой тока (в России не нормируется для сетей общего назначения). В некоторых докладах порта Латакии указывается, что суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает 12%, что приводит к увеличению потерь, выходу из строя конденсаторов средств компенсации реактивной мощности, а также ряд нарушений в работе электроприемников порта.

Результаты измерений показывают, что нарушение требований стандарта *IEEE-519* по гармоническим составляющим происходит только в узле 7. Спектр высших гармоник напряжения в узле 7 (порт города) и гармоник суммарного тока низкой стороны подстанции 7 представлены на рис.3, суммарный коэффициент несинусоидальности тока и напряжения (THD_I и THD_U) составляют, соответственно 10,71% и 12,16%.

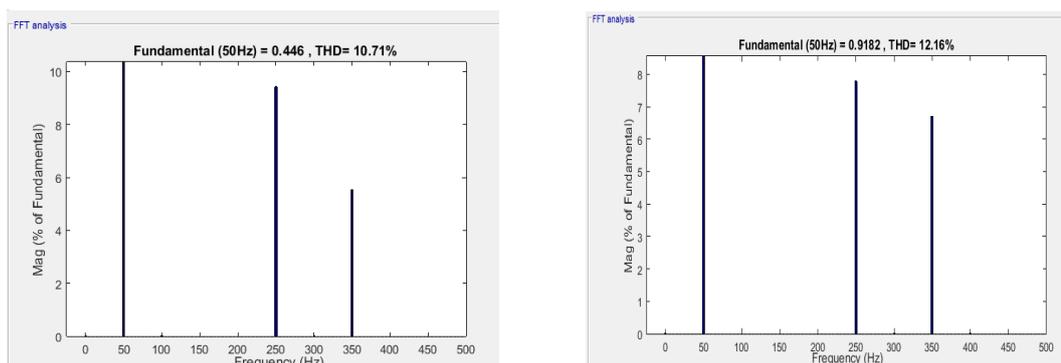


Рис.3 Коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения THD_I и THD_U , а) для тока б) для напряжения

Применение активных фильтров

Фильтрокомпенсирующие устройства являются одним из универсальных способов снижения токов и напряжений высших гармоник в системах электроснабжения. Фильтры гармоник подразделяются на пассивные, активные, и гибридные фильтры [1-2]. В качестве средства компенсации высших гармоник в исследуемой сети рассматривается АФ. Активные фильтры применялись с конца 1990-х годов и в настоящее время относительно широко применяются в промышленных приложениях для компенсации гармоник и

реактивной мощности. Активный фильтр состоит из трех основных частей: силовой части, системы управления и накопительного элемента. Силовая часть, представляет собой быстродействующий трехфазный, многоуровневый инвертор на транзисторах типа *IGBT*. Система управления определяет последовательность, длительность и моменты зажигания транзисторов. Накопительный элемент представляет собой емкость [9-12].

Определение оптимального значения емкости конденсатора АФ является непростой задачей для исследователей. В работах, связанных с выбором параметров АФ, не раскрывается подход к определению этого значения [13-16]; есть работы, в которых используется очень сложное математическое описание [17], что затрудняет их использование из-за наличия большого числа входных данных, определение которых также не всегда доступно для решения проектных задач. В данной работе применен метод оптимизации РЧ для определения оптимального значения емкости АФ.

В основе методе РЧ лежит представление о наборе частиц, перемещающихся в пространстве поиска. Алгоритм начинается с создания исходных частиц и назначения им начальных (исходных) скоростей. Метод позволяет определить значение целевой функции выбора емкости АФ в каждой точке, где побывала частица, и определяет наилучшее (минимальное) значение функции и наилучшее местоположение частиц. Затем алгоритм итеративно корректирует текущую координату каждой частицы и ее скорость. Итерации продолжаются до тех пор, пока критерий остановки не выполнится [18-19]. Блок схема метода РЧ представлен на рис.4.



Рис.4 Блок схема метод РЧ

Целевая функция для достижения оптимальных значений емкости конденсатора, при которой значение коэффициента искажения синусоидальной формы кривой тока минимально, задавалась так:

$$\text{Minimize}(C) = \int_0^{\infty} t^* \text{THD}_i^2 dt \quad (1)$$

где t - время моделирования

В результате применения метода РЧ было определено оптимальное значение емкости конденсатора, которое составляет 8300 мкФ.

Активный фильтр применен для смягчения гармоник на шине 7 исследуемой сети. Уровень искажений тока и напряжения снизился. Результаты моделирования показали, что уровень высших гармоник тока с АФ уменьшился с 10,71% до 1,67%, а коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения уменьшился с 12,16% до 2,59% (см. рис. 5).

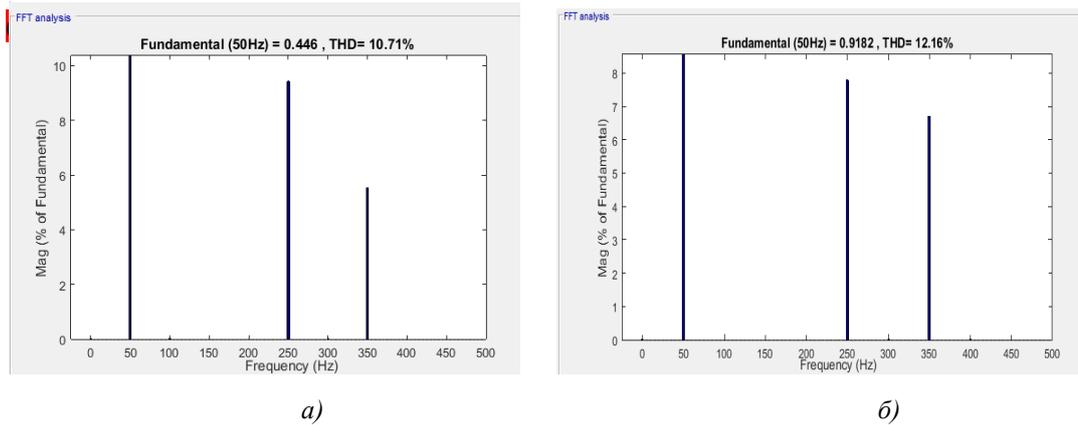


Рис.5 Коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения THD_i и THD_U , а) для тока б) для напряжения при использовании активного фильтра

5. Численный пример использования алгоритма РЧ

Требуется найти значение x , определяющее максимум $f(x)$ с помощью алгоритма РЧ

$$f(x) = -x^2 + 5x + 20, \quad (2)$$

$$-10 \leq x \leq 10. \quad (3)$$

Решение:

1. Выберем случайным образом исходную популяцию, состоящую из 9 частиц с начальными позициями, представленными ниже: номер итерации = 0

$$x_1^0 = -9, 6; x_2^0 = -6; x_3^0 = -2, 6;$$

$$x_4^0 = -1, 1; x_5^0 = 0, 6; x_6^0 = 2, 3;$$

$$x_7^0 = 2, 8; x_8^0 = 8, 3; x_9^0 = 10.$$

По формуле (2) рассчитываем значения целевой функции (ЦФ) для каждой частицы:

$$f_1^0 = -120, 16; f_2^0 = -46; f_3^0 = 0, 24,$$

$$f_4^0 = 13, 29; f_5^0 = 22, 64; f_6^0 = 26, 21,$$

$$f_7^0 = 26, 16; f_8^0 = -7, 39; f_9^0 = -30.$$

Установите начальные скорости каждой частицы на ноль:

$$v_1^0 = v_2^0 = v_3^0 = v_4^0 = v_5^0 = v_6^0 = v_7^0 = v_8^0 = v_9^0 = 0.$$

Шаг 2: Номер итерации $t = t + 1 = 0 + 1 = 1$.

Шаг 3: Нахождение лучшего решения для каждой частицы по следующей формуле:

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^{t+1} & \text{если } f_i^{t+1} > P_{best,i}^{t+1} \\ x_i^{t+1} & \text{если } f_i^{t+1} \leq P_{best,i}^{t+1} \end{cases}$$

таким образом:

$$P_{best,1}^1 = -9,6, P_{best,2}^1 = -6, P_{best,3}^1 = -2,6,$$

$$P_{best,4}^1 = -1,1, P_{best,5}^1 = 0,6, P_{best,6}^1 = 2,3,$$

$$P_{best,6}^1 = 2,8, P_{best,7}^1 = 8,3, P_{best,8}^1 = 10.$$

Шаг 4: Нахождение лучшего решения среди всех частиц по следующей формуле:

$$G_{best} = \max\{P_{best,i}\},$$

где G_{best} – глобальная позиция частицы, в которой целевая функция достигает своего максимального значения в пространстве решений, в нашем случае $G_{best}=2.3$ где значение ЦФ =26.21,

Шаг 5: Корректировка скорости частицы по следующей формуле:

$$v_i^{t+1} = v_i^t + c_1 r_1 [P_{best,i}^t - x_i^t] + c_2 r_2 [G_{best,i}^t - x_i^t] \quad (3)$$

где r_1, r_2 – случайные значения в интервале $[0, 1]$, c_1, c_2 : коэффициенты ускорения частицы, отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения, либо сохранить свое, их общая сумма равна 2.

Учитывая что, $c_1, c_2=1$ и $r_1=0,213, r_2=0,876$

Таким образом:

$$v_1^1 = 0 + 0,213(-9,6 + 9,6) + 0,876(2,3 + 9,6) = 10,4244,$$

$$v_2^1 = 7,2708, v_3^1 = 4,2924, v_4^1 = 2,9784, v_5^1 = 1,4892,$$

$$v_6^1 = 0, v_7^1 = -0,4380, v_8^1 = 5,256, v_9^1 = -6,7452.$$

Шаг 5: определение новую позицию частицы по формуле (4), где новая позиция частицы зависит от ее предыдущего позиция и скорости:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}, \quad (4)$$

где $i=1,2,3,4,5,6,7,8,9$.

Таким образом:

$$x_1^1 = 0,8244, x_2^1 = 1,2708, x_3^1 = 1,6924,$$

$$x_4^1 = 1,8784, x_5^1 = 2,0892, x_6^1 = 2,3,$$

$$x_7^1 = 2,362, x_8^1 = 3,044, x_9^1 = 3,2548.$$

Шаг 6: Расчет значения целевой функции для каждой новой частицы:

$$f_1^1 = 23,4424, f_2^1 = 24,7391, f_3^1 = 25,5978,$$

$$f_4^1 = 25,8636, f_5^1 = 26,0812, f_6^1 = 26,21,$$

$$f_7^1 = 26,231, f_8^1 = 25,9541, f_9^1 = 25,6803.$$

Шаг 7: На шаге 7 происходит проверка успешности выполнения алгоритма. Выполнение алгоритма считается успешно завершенным, если он сошёлся, т.е. позиция всех частиц совпали.

В случае, если позиция всех частиц не сходятся, то итерации продолжаются $t=t+1$ и все шаги от 3-6 повторяются до тех пор, пока критерий остановки не выполнится.

Заключение

Электроэнергетика в Сирийской Арабской Республике является дефицитной. Растущая потребность в электроэнергии связывается, в том числе с развитием промышленности. В одном из промышленных центров Сирии, городе Латакия, работает порт, имеющий стратегическое значение для страны. Систематические нарушения качества электроэнергии на подстанции, питающий этот порт, приводят к технологическим нарушениям и ущербам. Предлагаемое решение компенсации гармоник в виде установки

активного фильтра позволило уменьшить коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока до допустимых значений: с 10,71% до 1,67%, а коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения уменьшить с 12,16% до 2,59%. При выборе емкости активного фильтра, которая составила 8300 мкФ, использовался оптимизационный метод роя частиц.

Литература

1. Nasyrov R., Aljendy R., Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia-Syria // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2018. pp.712-718.
2. Geena Sh., Kanchan J. Harmonic Reduction using Shunt Active Power Filter. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016.V. 5, Issue 6.
3. Diab AZ, Selim SA, Elnaghi BE. Particle swarm optimization based vector control of permanent magnet synchronous motor drive // NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus NW), Russia, IEEE Conf. 2016. pp.740-746.
4. Motta L., Faúndes N. Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends // 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2016. pp.657-662.
5. Ullah A., Ul Hasan Sheikh I., Arshad Sh., et al. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System // 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST).2019. pp.384-388.
6. Deepak C., Bhonsle, Ramesh B., et al. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. Energy. 2016. V. 115. pp. 830-839.
7. Dash R., Paikray P., Swain SC. Active power filter for harmonic mitigation in a distributed power generation system // Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). 2017. pp. 1-6.
8. Arun Shankar VK, Senthil Kumar N. Implementation of Shunt Active Filter for Harmonic Compensation in a 3 Phase 3 Wire Distribution Network // Energy Procedia. 2017. V. 117.pp.172-179.
9. Jadhav PP., Patil AS. Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter // International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). 2016. pp.653-656.
10. Liu C., Yuqing He., Ke Dai. Industrial power distribution system harmonic resonance problem and solution with shunt active power filter // 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. pp.1243-1248.
11. Moussa H., Martin Jean-Ph., Pierfederici S., et al.Voltage harmonic distortion compensation with non-linear load power sharing in low-voltage islanded microgrid // Mathematics and Computers in Simulation. 2019. V. 158. pp. 32-48.
12. Gaurava DS., Rajendrakumar DK. Design, simulation and analysis of Shunt Active Power Filter using instantaneous reactive power topology // International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), 2017.
13. Vijayakumar G, Nitin G, Gupta R. Improved dynamic performance of shunt active power filter using particle swarm optimization // IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), 2017.
14. Nasyrov R., Aljendy R., Diab A. Zaki. Adaptive PI controller of active power filter for compensation of harmonics and voltage fluctuation based on particle swarm optimization (PSO) // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) 2018 IEEE Conference of Russian. 2018. pp. 719-724.
15. Nasyrov R., Aljendy R. Comprehensive comparison between hybrid fuzzy-PI and PSO-PI controllers based active power filter for compensation of harmonics and reactive power under different load conditions // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) 2018 IEEE Conference of Russian. 2018. pp. 725-730.
16. Xiaoyue Z., Xinyan Zh. Artificial Intelligence Applications in Power System // 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering. 2016. pp.158-161.
17. Wu Cao., Mumu Wu., Jianfeng Zh., et al. An improved current-limiting strategy for shunt active power filter (SAPF) using particle swarm optimization (PSO) // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2018. pp.494-498.
18. Yonggang Ch., Lixiang Li., Haipeng P., et al. Particle swarm optimizer with two differential mutation // Applied Soft Computing. 2017. V.61. pp. 314-330.
19. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Dynamic multi-swarm differential learning particle swarm optimizer. Swarm and Evolutionary Computation. 2018.V.39. pp. 209-221.
20. Kwang Y. Lee and Jong-Bae P, Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem Advantages and Disadvantages // IEEE, 2010.

Авторы публикации

Насыров Ринат Ришатович – канд.техн.наук. доцент, кафедры «Электроэнергетические системы», НИУ Московский энергетический институт.

Альдженди Расил – аспирант, НИУ Московский энергетический институт.

Хербек Тарэк – канд. техн. наук, профессор, кафедры электроэнергетических систем, Тишринский университет, Латакия, Сирия.

References

1. Nasyrov R, Aljendy R, Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia-Syria. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. 2018. pp.712-718.
2. Geena ShKanchan, J. Harmonic Reduction using Shunt Active Power Filter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2016;5(6).
3. Diab AZ, Selim SA, Elnaghi BE. Particle swarm optimization based vector control of permanent magnet synchronous motor drive. *NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus NW), Russia, IEEE Conf 2016*. pp. 740-746.
4. Motta L, Faúndes N. Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends. *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2016. pp.657-662.
5. Ullah A, Ul Hasan Sheikh I, Arshad Sh, Saleem F . Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System. *16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. 2019. pp.384-388.
6. Deepak C. Bhonsle, Ramesh, et al. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*. 2016;115:830-839.
7. Dash R, Paikray P, Swain S. C. Active power filter for harmonic mitigation in a distributed power generation system. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2017. pp. 1-6.
8. Arun Shankar V.K, Senthil Kumar N. Implementation of Shunt Active Filter for Harmonic Compensation in a 3 Phase 3 Wire Distribution Network. *Energy Procedia*. 2017;117:172-179.
9. Jadhav PP, Patil AS. Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter. *International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*. 2016. pp.653-656.
10. Liu C, Yuqing He, Ke Dai, et al. Industrial power distribution system harmonic resonance problem and solution with shunt active power filter. *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. pp.1243-1248.
11. Moussa H, Martin Jean-Ph, Pierfederici S, et al. Voltage harmonic distortion compensation with non-linear load power sharing in low-voltage islanded microgrid. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019;158:32-48.
12. Gaurava DS, Rajendrakumar DK. Design, simulation and analysis of Shunt Active Power Filter using instantaneous reactive power topology. *International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2017.
13. Vijayakumar G, Nitin G, Gupta R. Improved dynamic performance of shunt active power filter using particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 2017.
14. Nasyrov.R, Aljendy R, Diab A. Zaki. Adaptive PI controller of active power filter for compensation of harmonics and voltage fluctuation based on particle swarm optimization (PSO). *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) 2018 IEEE Conference of Russian*. 2018. pp. 719-72.
15. Nasyrov.R, Aljendy R. Comprehensive comparison between hybrid fuzzy-PI and PSO-PI controllers based active power filter for compensation of harmonics and reactive power under different load conditions. *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) 2018 IEEE Conference of Russian*. 2018. pp. 725-730.
16. Xiaoyue Z, Xinyan Zh. Artificial Intelligence Applications in Power System. *2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering*. 2016. pp.158-161.
17. Wu Cao, Mumu Wu, Jianfeng Zh, et al. An improved current-limiting strategy for shunt active power filter (SAPF) using particle swarm optimization (PSO). *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2018. pp.494-498.
18. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Particle swarm optimizer with two differential mutation. *Applied Soft Computing*. 2017. V.61. pp.314-330.

19. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Dynamic multi-swarm differential learning particle swarm optimizer. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018. V.39. pp. 209-221.

20. Kwang Y. Lee and Jong-Bae P. *Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem Advantages and Disadvantages*. IEEE, 2010.

Authors of the publication

Rinat R. NasYROV – National research University "Moscow power engineering Institute» Moscow, Russia.
Email: nasirov.rinat@gmail.com.

Raseel Aljendy – National research University "Moscow power engineering Institute», Moscow, Russia.
Email: aljendy_raseel@yahoo.com.

Tarek Kherbek – Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.tarek.kherbek@gmail.com.

Поступила в редакцию

10 июля 2019г.



СНИЖЕНИЕ СТОИМОСТИ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ЗАМЕНЫ КОЛЛЕКТОРА ПЕРВОГО КОНТУРА

И. Халлыев, К.Х. Гильфанов

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

Резюме: Целью данной работы является снижение стоимости теплонасосной системы теплоснабжения путем использования солнечного коллектора в первичном контуре теплового насоса. Известно, что цена материала и монтаж коллектора первичного контура составляет 30% от общей стоимости теплонасосной системы теплоснабжения. Использование солнечного коллектора в первом контуре теплового насоса исключает необходимость бурения или подземного монтажа коллектора низкопотенциальной тепловой энергии. Отказ от классических видов коллекторов: горизонтальные коллекторы и вертикальные зонды, оказывает также положительный экологический эффект на почву. Комбинированное использование солнечного коллектора и теплового насоса добавит вариативности в компоновке теплонасосной системы теплоснабжения. В статье представлены результаты теоретического исследования целесообразности эксплуатации солнечных коллекторов на широтах Республики Татарстан. Приведен сравнительный анализ различных видов теплового насоса и солнечного коллектора, исходя из которого были подобраны основные компоненты комбинированной системы. Работа включает в себя расчеты необходимой мощности и площади поверхности поглощения солнечного коллектора. Приведены результаты сравнительного анализа производительности солнечного коллектора в зависимости от угла падения солнечных лучей и среднего уровня инсоляции. В результате работы, было определено, что использование солнечного коллектора в первичном контуре теплового насоса будет дешевле в 2 раза по сравнению с горизонтальными коллекторами и в 4 раза по сравнению с вертикальными зондами.

Ключевые слова: тепловой насос, система теплоснабжения, солнечный коллектор, площадь поглощения, инсоляция, низкопотенциальная энергия.

Для цитирования: Халлыев И, Гильфанов КХ. Снижение стоимости теплонасосной системы теплоснабжения путем замены коллектора первого контура // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 28-37. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-28-37.

DECREASING COST OF HEAT PUMP HEAT SUPPLY SYSTEM BY CHANGING FIRST CIRCUIT COLLECTOR

I Hallyyev, KH Gilfanov

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

Abstract: The aim of this work is to reduce the cost of the heat pump heating system by using a solar collector in the primary circuit of the heat pump. It is known that the price of material and installation of the primary circuit collector is 30% of the total cost of the heat pump heating system. The use of a solar collector in the primary circuit of a heat pump eliminates the need for drilling or underground installation of a low-potential thermal energy collector. The rejection of the classic types of collectors: horizontal collectors and vertical probes, also has a positive environmental effect on the soil. The combined use of a solar collector and a heat pump will add variability in the layout of the heat pump heating system. The article presents the results of a theoretical study of the feasibility of operating solar collectors at the latitudes of the Republic of Tatarstan. A comparative analysis of various types of heat pump and solar collector is given,

based on which the main components of the combined system were selected. The work includes calculations of the required power and surface area of the absorption of the solar collector. The results of a comparative analysis of the performance of the solar collector are presented, depending on the angle of incidence of sunlight and the average level of insolation. As a result of the work, it was determined that the use of a solar collector in the primary circuit of a heat pump will be twice cheaper compared to horizontal collectors and 4 times compared to vertical probes.

Keywords: heat pump, heat supply system, solar collector, absorption area, insolation, low potential energy.

For citation: Hallyyev I, Gilfanov KH. Decreasing cost of heat pump heat supply system by changing first circuit collector. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):28-37. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-28-37.

Введение

В условиях современной реальности делается значимый акцент на развитие возобновляемой энергетики, которая уже не является энергетикой будущего, а считается энергетикой настоящего (рис.1). В мировой практике давно используют альтернативные источники тепловой энергии – воздух, грунтовые воды, воды водоемов и энергию солнца. Извлекается тепловая энергия из окружающей среду с помощью теплонасосной системы теплоснабжения (ТСТ), основным компонентом которой является тепловой насос. Главными преимуществами данной системы является эгологичность и экономичность.



Рис. 1. Пропорциональное распределение потребления энергии в мире

Тепловой насос функционирует аналогично холодильной машине. Теплота отбирается от источников низкопотенциальной энергии, повышается её температура и передается к менее нагретому телу (рис. 2). В качестве источников низкопотенциальной энергии, в классических теплонасосных системах, используются грунт, вода и воздух [1].

Исходя из типа источника низкопотенциальной энергии и агрегатного состояния теплоносителя в третьем контуре теплового насоса, различают несколько видов теплонасосной системы теплоснабжения:

1. Грунт-вода
2. Грунт-воздух
3. Вода-вода
4. Вода-воздух
5. Воздух-воздух

Повышение температуры достигается благодаря воздушному компрессору, а соотношение температурных значений на входе теплового насоса и на его выходе называется коэффициентом преобразования температуры. Коэффициент преобразования температуры у различных тепловых насосов варьируется от 1,2 до 3.



Рис. 2. Структурная схема и основные компоненты геотермального теплового насоса

Камнем преткновения в оперативном развитии ТСТ и её всеобщему использованию является дороговизна монтажа коллектора первого контура. Коллектор первого контура служит для отбора низкопотенциальной тепловой энергии из первичных источников, и представляет собой изолированные трубки, горизонтально смонтированные в глубине не менее 1,5 метров, или вертикальные зонды, для монтажа которых необходимо бурение до 20 метров (рис.3). В силу запрета на бурение во многих местностях, горизонтальные коллекторы являются более популярными. Вопреки своей популярности, горизонтальные коллекторы наносят экологический вред почве, так как почва над коллекторами со временем становится непригодной для растительности [2].



Рис. 3. Классические виды коллекторов теплового насоса. Горизонтальный коллектор и вертикальный зонд

С целью исключения экологического вреда и дорогостоящего монтажа коллекторов, предлагается использовать солнечный коллектор в первом контуре теплового насоса. В данной системе источником возобновляемой «низкопотенциальной» энергии является солнце. Если реализовать систему теплоснабжения только на солнечных коллекторах, то для удовлетворения тепловых нужд среднего коттеджного дома, необходимо установить солнечные коллекторы с общей площадью поглощения 180 м². Учитывая, что оптимальной позицией для установки солнечного коллектора без уменьшения КПД является крыша дома, то монтаж столь большого количества солнечных коллекторов является невозможным [3].

После проведения теоретического сравнительного анализа между двумя разными видами солнечного коллектора, было решено использовать в первом контуре теплового насоса вакуумный солнечный коллектор (рис.4).

Преимущества вакуумного солнечного коллектора по сравнению с плоским:

- Высокий КПД 90-98%, который достигается благодаря лучшей тепловой изоляции – вакууму;
- Устойчивость к механическим природным воздействиям;
- Отсутствие необходимости в чистке от снега;
- Относительно низкая стоимость;
- Легкость в масштабировании;

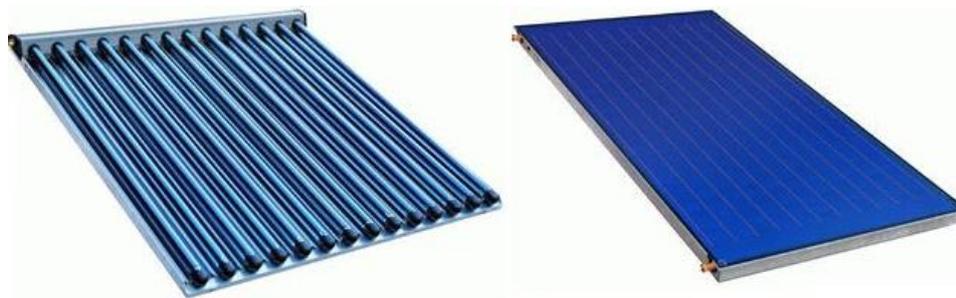


Рис. 4. Виды солнечных коллекторов. Вакуумный и плоский солнечные коллекторы.

Методы исследования

В данной работе были использованы теоретический и математический методы исследования. Исходя из теоретического анализа выявлено, что оптимальным видом теплового насоса для данной комплексной системы является тепловой насос «Грунт - вода», а для отбора тепла использовать вакуумный солнечный коллектор.

Для прикладного математического анализа, в первую очередь необходимо определить тепловые нужды целевого помещения. При расчете тепловых нужд помещения учитываются объем помещения, обобщенный коэффициент теплопередачи здания и разница между температурами [4].

Расчет тепловых нужд Q помещения:

$$Q = k \cdot V \cdot \Delta T$$

где k – обобщенный коэффициент теплопередачи здания. Для стены из кирпича в один слой $k = 1,5$; V – объем отапливаемого помещения; ΔT – разница между наружной и внутренней температурами.

Необходимо учитывать самую низкую возможную наружную и целевую внутреннюю температуры:

$$k = 1,5$$

$$V = S \cdot h = 100 \cdot 3 = 300 \text{ м}^3$$

$$\Delta T = |T_{\text{вн}} - T_{\text{внт}}| = |-35 - 25| = 60^\circ\text{C}$$

$$Q = 1,5 \cdot 300 \cdot 60 = 27 \text{ кВт}$$

Исходя из величины тепловых нужд, подбирается тепловой насос, который способен удовлетворить данные нужды, и обладает необходимой производительностью. Был выбран тепловой насос с мощностью 27 кВт, и произведен расчет для определения требуемой мощности от коллектора.

Расчет получаемой (необходимой) тепловой мощности от коллектора:

$$Q_o = Q_{wp} - P$$

где Q_o – необходимая тепловая мощность солнечного коллектора; Q_{wp} – тепловая мощность теплового насоса; P – электрическая мощность, затрачиваемая на работу компрессора (нагрев фреона).

Для

$$Q_{wp} = 27 \text{ кВт} \Rightarrow P = 7,3 \text{ кВт}$$

$$Q_o = 27 - 7,3 = 19,7 \text{ кВт}$$

После определения необходимой тепловой мощности, получаемой от коллектора первого контура, производим расчет площади поглощающей поверхности солнечного коллектора.

Расчет площади поглощающей поверхности солнечного коллектора:

$$P = P_m \cdot \eta \cdot S$$

где: P – производительность солнечного коллектора; η – коэффициент полезного действия; Производители указывают от 0,9 до 0,98; S – площадь поглощения коллектора

$$P_m = \sin(\alpha) \cdot P_{ins}$$

Если солнечный коллектор установлен перпендикулярно к лучам солнца:

$$\sin(90^\circ) = 1 \Rightarrow P_m = P_{ins}$$

где P_{ins} – средняя дневная инсоляция.

Для Республики Татарстан: $P_{ins} \approx 3,6 \frac{\text{ч}}{\text{сутки}}$

$$P = P_{ins} \cdot \eta \cdot S \Rightarrow S = \frac{P}{P_{ins} \cdot \eta} = \frac{19,7}{3,6 \cdot 0,95} = 7,43 \text{ м}^2,$$

$$\eta = 0,95 \Rightarrow S = 7,43 \text{ м}^2.$$

Результаты

С использованием математического метода исследования, исходя из тепловых нужд экспериментального помещения с объемом $V=300 \text{ м}^3$, были получены следующие результаты расчета:

Объем тепловых нужд Q помещения:

$$Q = 1,5 \cdot 300 \cdot 60 = 27 \text{ кВт.}$$

Получаемая (необходимая) тепловая мощность коллектора с учетом затрачиваемой энергии на работу компрессора теплового насоса:

$$Q_o = 27 - 7,3 = 19,7 \text{ кВт.}$$

Площадь поглощающей поверхности солнечного коллектора:

$$S = 7,43 \text{ м}^2$$

Исходя из формулы расчета поглощающей поверхности и производительности солнечного коллектора, можно построить графики их зависимости от среднего уровня инсоляции и угла падения солнечных лучей на поверхность солнечного коллектора.

Изменение требуемой величины площади поглощающей поверхности солнечного коллектора для генерации фиксированной тепловой мощности P в зависимости от средней инсоляции (рис. 5):

$$S = \frac{P}{P_{ins} \cdot \eta}$$

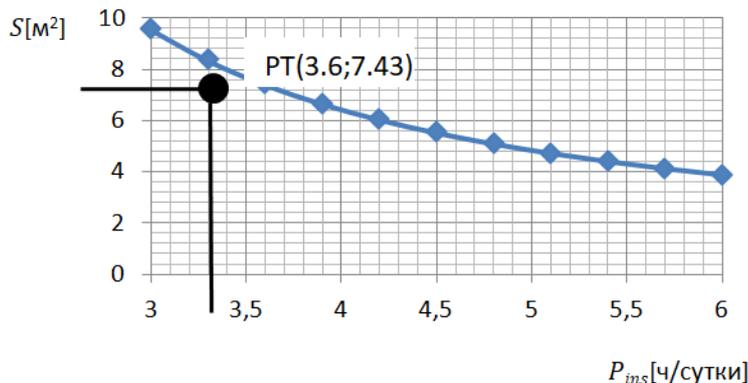


Рис. 5. График зависимости площади поглощающей поверхности солнечного коллектора от средневесенней инсоляции

Зависимость производительности солнечного коллектора от угла падения солнечных лучей при постоянной площади поглощающей поверхности и неизменной средневесенней инсоляции (рис. 6).

$$P = \sin(\alpha) \cdot P_{ins} \cdot \eta \cdot S.$$

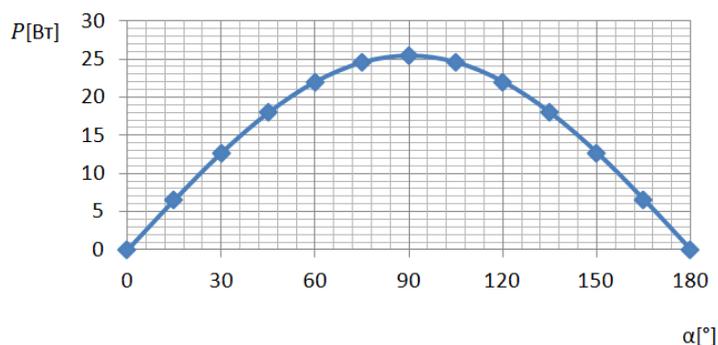


Рис. 6. График зависимости производительности солнечного коллектора от угла падения солнечных лучей

Обсуждение

Представленные выше графики наглядно иллюстрируют эффективность использования солнечного коллектора и изменение его производительности в зависимости от климатических условий местности и правильности монтажа [6].

График зависимости площади поглощающей поверхности солнечного коллектора от средневенной инсоляции местности необходим для определения целесообразности эксплуатации солнечного коллектора в ТСТ. Исходя из карты инсоляции России, можно определить, что в регионах с уровнем инсоляции менее 1700 час/год, использование солнечного коллектора является не целесообразным (рис.7).



Рис. 7. Карта инсоляции регионов России

Исходя из показаний графика зависимости производительности солнечного коллектора от угла падения солнечных лучей, можно прийти к очевидному выводу, что производительность будет наилучшим, если коллектор установлен перпендикулярно к солнечным лучам. При падении солнечных лучей на поверхность коллектора под прямым углом, производительность солнечного коллектора будет равной его номинальной мощности (рис. 8). Основной проблемой является то, что на протяжении календарного года высота солнца над горизонтом не остается неизменным [7].

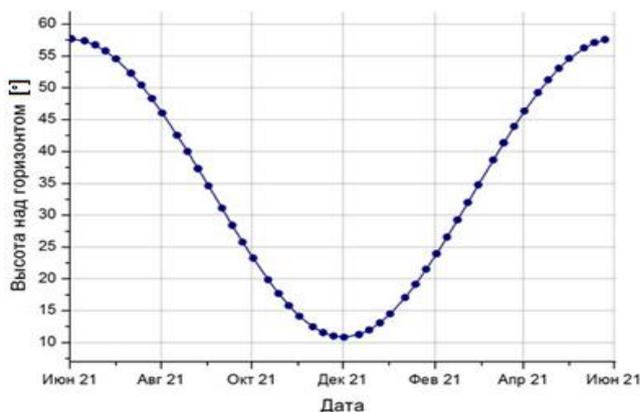


Рис. 8. Динамика высоты солнца над горизонтом на протяжении календарного года

Исходя из данного условия, наилучшим решением является установка солнечного коллектора на динамичной конструкции, и оборудовать базовой системой слежения за уровнем солнца, которая будет «ловить» оптимальный угол падения солнечных лучей [8]. В случае необходимости установки большого количества солнечных коллекторов (более 50 вакуумных трубок), то альтернативным вариантом достижения положительного баланса является установка под таким углом, чтобы в самое холодное время года солнечные лучи падали под углом 90° [9].

При получении необходимой среднегодовой инсоляции и правильном монтаже солнечного коллектора, такая замена в первичном контуре теплового насоса может привести к значительному снижению стоимости всей теплонасосной системы теплоснабжения [10].

Сравнительный анализ использования в первичном контуре теплового насоса солнечного и классических видов коллектора

Исходя из требуемого значения мощности, можно рассчитать стоимость коллектора и его монтажа для трех вариантов: горизонтальный коллектор, вертикальный зонд и солнечный коллектор [11].

Необходимая (получаемая) мощность от коллектора:

$$Q_o = Q_{wp} - P = 27 - 7,3 = 19,7 \text{ кВт.}$$

Расчет стоимости горизонтального коллектора:

Съем тепла с каждого метра трубы зависит от многих параметров: глубины укладки, наличия грунтовых вод, качества грунта и т.д. Ориентировочно можно считать, что для горизонтальных коллекторов он составляет 20 Вт/м. Более точно: сухой песок – 10, сухая глина – 20, влажная глина – 25, глина с большим содержанием воды – 35 Вт/м [12].

Суммарная длина труб коллектора L и общая площадь участка под него A рассчитываются по формулам:

$$L = \frac{Q_o}{q} = \frac{19,7}{0,02} = 985 \text{ м}$$

где: q – удельный (с 1 м трубы) теплосъем. $q = 20$ Вт/м.

$$A = L \cdot da = 985 \cdot 0,75 = 738,75 \text{ м}^2,$$

где: da – расстояние между трубами (шаг укладки), $da = 0,75$ м.

Общая стоимость горизонтального коллектора [13]:

Цена металлопластиковой трубы с внешним диаметром 32 мм для горизонтального коллектора равна 250 руб/м. Стоимость необходимой длины составит 246 250 рублей.

Монтаж горизонтального коллектора будет стоить 155 рублей за метр, и для общей длины равен 152 675 рублей.

Итоговая стоимость материала для горизонтального коллектора и его монтаж составит 398 925 рублей.

Расчет стоимости вертикального зонда:

При использовании вертикальных скважин глубиной от 20 до 100 м в них погружаются U-образные металлопластиковые или пластиковые (при диаметрах выше

32 мм) трубы. Как правило, в одну скважину вставляется две петли, после чего она заливается цементным раствором. В среднем удельный теплосъем такого зонда можно принять равным 50 Вт/м [14].

Аналогичным образом, но с учетом изменения удельного теплосъема, проводим расчет необходимой длины коллектора:

$$L = \frac{Q_o}{q} = \frac{19,7}{0,05} = 394 \text{ м.}$$

Для установки коллектора необходимо пробурить четыре скважины глубиной по 100 м. В каждой из них размещаем по две петли из металлопластиковой трубы. Учитывая принцип U-образной установки вертикальных зондов, всего устанавливаются 4 контура по 200 м [15].

Общая стоимость вертикального зонда:

стоимость 100 метровой U-образной трубы для использования в качестве вертикального зонда равна 25 350 рублей. Стоимость трубы на 394 м будет равна 101 400 рублей.

Стоимость бурения скважин в Республике Татарстан ориентировочно равна 1500 руб/ погонный метр. Общая стоимость бурения 4 скважин глубиной по 100 м составит 600 000 рублей.

Итоговая стоимость материала для вертикального зонда и его монтажа составит 701 400 рублей.

Расчет стоимости солнечного коллектора

В пункте 2.3 было определена площадь поглощающей поверхности солнечного коллектора равная $S = 7,4 \text{ м}^2$. Цена солнечного коллектора SCH-30 с площадью поглощения $39,6 \text{ м}^2$ (30 вакуумных трубок) равна 45 000 рублей. Для удовлетворения расчетных требований понадобятся 2 коллектора типа SCH-30, стоимость которых составит 90 000 рублей.

Для монтажа солнечных коллекторов понадобятся:

- металлопластиковые трубы с диаметром 20 мм, длина которых зависит от места монтажа солнечного коллектора и теплового насоса, и варьируется от 20 до 50 метров;
- различные соединительные элементы, фитинги и переходники;
- расширительные баки. К каждому коллектору монтируется по одному расширительному баку;

Стоимость всех необходимых компонентов для монтажа солнечных коллекторов не превышает 30 000 рублей.

Стоимость монтажа солнечного коллектора зависит от мощности оборудования, его комплектации и условий работ и составляет от 25% от его стоимости. В нашем случае стоимость монтажа составит 22 500 рублей.

Итоговая стоимость солнечного коллектора, необходимых для монтажа компонентов и услуг по монтажу составит 142 500 рублей (табл).

Таблица

Анализ стоимости разных видов коллектора первичного контура

Тип коллектора	Стоимость материала, руб.	Стоимость монтажа, руб.	Общая стоимость, руб.
Горизонтальный коллектор	246 250	152 675	398 925
Вертикальный зонд	101 400	600 000	701 400
Солнечный коллектор	120 000	22 500	142 500

Заключение

В данной работе были проведены теоретическое и математическое исследование для определения целесообразности использования солнечного коллектора в первом контуре теплонасосной системы теплоснабжения. В результате исследований были изучены и подобраны оптимальные виды теплового насоса и солнечного коллектора для совместной эксплуатации. В работе представлены результаты расчетов мощности теплового насоса и площади поверхности солнечного коллектора для удовлетворения тепловых нужд целевого помещения. Исходя из расчетных формул и результатов, построены графики зависимости

площади поглощающей поверхности солнечного коллектора от средней дневной инсоляции и его производительности от угла падения солнечных лучей.

В результате изучения карты инсоляции России и динамики высоты солнца над горизонтом, были предложены методы определения целесообразности использования солнечного коллектора и варианта его монтажа для достижения оптимальных результатов.

Результаты стоимостного анализа для разных типов коллектора:

- стоимость горизонтального коллектора: 398 925 рублей;
- стоимость вертикального зонда: 701 400 рублей;
- стоимость солнечного коллектора: 142 500 рублей.

Выводы:

1.Использование солнечного коллектора в первичном контуре теплового насоса приводит к уменьшению затрат на монтаж коллектора низкопотенциальной энергии как минимум в 2,5 раза. Затраты на монтаж коллектора первичного контура составляют 30% от общей стоимости теплонасосной системы теплоснабжения.

2.Классические коллекторы, в частности вертикальные зонды, могут быть использованы не во всех регионах России, в силу запрета на бурение.

3.Исключение необходимости в подземном монтаже не только сокращает длительность монтажа всей системы, но и также позволяет избежать вреда почве, которая становится не пригодной для растительности, если использовать классические виды коллекторов. Почта становится не пригодной для растительности из-за повышения среднегодовой температуры грунта.

В дальнейшем планируется провести анализ зависимости производительности данной системы от видов используемых теплоносителей и хладагентов.

Литература

1. Кристиан Винтелер.11-я Конференция МЭА по тепловым насосам 2014 / тепловые насосы, системы солнечной энергии и хранения льда - моделирование и сезонные характеристики / Монреаль (Квебек).IEA-ETSA Pand IRENA Technology Brief E17. Thermal Energy Storage/.AndreasHauer, Канада: 2014. 20-25 стр.
2. Andreas Hauer. Modeling of combined solar thermal, heat pumps, ice storage systems and heat recovery in wastewater // Proceedings of the EuroSun 2014 conference. Bayern: 2013. pp. 5-8.
3. Carbonell D., Philippen D., Granzotto M. Simulation of Combined Solar Thermal, Heat Pump, Ice Storage and Waste Water Heat Recovery Systems // Conference Proceed ings EuroSun 2014. Rapperswil, Switzerland: 2014. pp.63-80.
4. Халлыев И., Таначев Н. Теплонасосная система с использованием солнечного коллектора // 25 Международная научно–техническая конференция студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". Москва: 2019. С. 23-30.
5. Халлыев И., Таначев Н. Комбинированная система теплоснабжения тепловой насос - солнечный коллектор // ЭНЕРГИЯ–2019 14 всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: 2019. С. 30-33.
6. Гришков АА. Совершенствование режимных и технологических характеристик систем теплоснабжения малоэтажных жилых зданий при использовании источников низкопотенциальной теплоты. Пермь: 2010. С. 53-55.
7. Елистратов С.Л.Комплексное исследование эффективности тепловых насосов. Новосибирск: 2010. С. 78-80.
8. Alves-Filho O. Heat Pump Dryers: Theory, Design and Industrial Applications // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. С. 30-50.
9. Хавьер Ф. Урчегуя. Возобновляемое отопление и охлаждение // Политехнический университет Валенсии: 2016. С.13-20.
10. ВоротницкийВ.Э. Системы рекуперации тепла трансформаторов и автотрансформаторов 220-750 кВ энергии одной сети. Издание Наука и технология. Центр ФСК ЕЭС (Москва). 2016. № 6. С. 32-42.
11. Сёдлов А. Анализ эффективности; использования парокомпрессионных теплонасосных установок в-теплофикационных системах // Энергосбережение и водоподготовка. 2015.С. 20-30.
12. Бурков АИ., Гришков АА., Кротов ВМ. Исследовательская установка для определения энергетического потенциала грунтового массива и заглубленных строительных конструкций при использовании теплонасосных систем в целях климатизации зданий. Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Материалы 7 Междунар. науч. конф. Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. С. 83-90.
13. С.Дж. Рис. Приемущества наземных системах тепловых насосов // Издательство Woodhead

2016. С.78-80.

14. Определение оптимальных параметров оборудования и работы систем теплоснабжения с применением тепловых насосов // Качество внутреннего воздуха и окружающее среды. Материалы 7 Международной научной конференции. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. 2009. С. 55-60.

15. Применение тепловых насосов в системах теплоснабжения жилых зданий – один из путей снижения энергозатрат // Строительство и образование. 2009. С. 33-40.

Авторы публикации

Халлыев Ишанберды – аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский Государственный Энергетический Университет.

Гильфанов Камил Хабибович – д-р. техн. наук., профессор кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Казанский Государственный Энергетический Университет.

References

1. Christian Winteler. 11th IEA Heat Pump Conference 2014 / *heatpump, solar energy and ice storage systems - modelling and seasonal performance*. Montréal (Québec) Canada: 2014. 20-25 p.
2. Andreas Hauer. IEA-ETSAP and IRENA Technology Brief E17. *Thermal Energy Storage*. Bayern: 2013. pp. 5-8 p.
3. Carbonell D, Philippen D, Granzotto M. Conference Proceedings EuroSun 2014. *Simulation of Combined Solar Thermal, Heat Pump, Ice Storage and Waste Water Heat Recovery Systems*. Rapperswil, Switzerland: 2014. pp. 63-80.
4. Khallyev I, Tanachev N. 25th International scientific and technical conference of students and post-graduate students "Radioelectronics, Electrical Engineering and Energy". Heat pump system using a solar collector. Moscow: 2019. pp. 23-30
5. Khallyev I, Tanachev N. ENERGY-2019 14th All-Russian (international) scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. *Combined heat supply system heat pump - solar collector*. Ivanovo: 2019. pp. 30-33.
6. Grishkov AA. *Improvement of regime and technological characteristics of heat supply systems of low-rise residential buildings using sources of low potential heat*. Perm: 2010. pp. 53-55.
7. Elistratov SL. *A comprehensive study of the efficiency of heat pumps*. Novosibirsk: 2010, pp. 78-80.
8. Alves-Filho O. *Heat Pump Dryers: Theory, Design and Industrial Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. pp. 30-50.
9. Javier F. Urchueguia. *Renewable Heating and Cooling*. Polytechnic University of Valencia: 2016. pp. 13-20.
10. Vorotnitsky V. Heat recovery systems of transformers and autotransformers 220-750 kb energy of one network. *Edition Science and Technology*. Center FGC UES (Moscow). 2014. pp. 32-42.
11. Performance analysis; the use of steam compression heat pump units in heat-supply systems / AC Sadlov, et al. *Energy Saving and Water Treatment*. 2015. pp. 20-30.
12. Burkov AI, Grishkov AA, Krotov VM. Research facility for determining the energy potential of the soil mass and buried building structures using heat pump systems for the climate control of buildings. *Indoor Air and Environment Quality: Material. 7 International scientific conf. Volgograd: VolgGASU, 2009. pp. 83-90.*
13. Rees SJ. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead Publishing: 2016, 78-80p.
14. Determination of the optimal parameters of equipment and the operation of heat supply systems using heat pumps. *Internal air quality and environment: Mater. 7 International Scientific conf. Volgograd: VolgGASU Publishing House. 2009. pp. 78-80.*
15. The use of heat pumps in heating systems of residential buildings is one of the ways to reduce energy consumption. *Material. 7. Construction and education. 2009. pp. 33-40.*

Authors of the publication

Ishanberdi Hallyyev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: ezker@mail.ru.

Kamil Kh. Gilfanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

22 октября 2019г.



**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СВОБОДНО-ПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА БАЗЕ
СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ
МАГНИТАМИ**

А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Е.И. Грачева, Т.И. Петров

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
sarkazan@bk.ru

***Резюме:** Одним из актуальных трендов на настоящее время является развитие малой энергетики, что является особенно актуальной задачей для Российской Федерации с ее огромными территориями и спецификой электроэнергетической системы.*

Использование синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в энергетических установках модульного типа позволяет рационально спроектировать автономный источник электроснабжения, получить наиболее оптимальную конструкцию.

Разработано математическое описание термодинамических, электромеханических и тепловых процессов, происходящих в рассматриваемом энергетическом комплексе (синхронный двигатель), что является необходимым условием для проектирования и оптимизации конструкции автономного электроэнергетического комплекса.

Согласно теоретическим выкладкам в приложении Matlab на базе дополнительного модуля Simulink была разработана и рассчитана имитационная модель свободно-поршневого двигателя внутреннего сгорания, блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы.

Созданная методика расчета параметров электромагнитной составляющей силы синхронной машины с постоянными магнитами позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индукторного и статорного элемента рассматриваемого электрического двигателя, что повышает энергоэффективность всей системы.

***Ключевые слова:** синхронная электрическая машина, имитационное моделирование, электромеханика, тепловая модель, малая энергетика.*

Для цитирования: Сафин АР., Ившин ИВ., Грачева ЕИ., Петров ТИ. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020.Т. 22. № 1. С. 38-48. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48.

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTONOMOUS POWER
SUPPLY SOURCE WITH A FREE PISTON MOTOR ON THE BASIS OF A
SYNCHRONOUS ELECTRIC RETURNING MACHINE WITH A PERMANENT
MAGNETS**

AR Safin, IV Ivshin, EI Gracheva, TI Petrov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sarkazan@bk.ru

***Abstract:** One of the current trends at present is the development of small energy, which is a particularly urgent task for the Russian Federation with its vast territories and the specifics of the electric power system. In the Russian Federation, the bulk of the electricity is generated at*

large power plants and transmitted through power lines. 60–70% of the country's territory lacks a centralized power supply, where more than 20 million people live, and the development of small and micro-energy facilities is necessary.

Using a synchronous electric reciprocating machine with permanent magnets in power plants of a modular type makes it possible to rationally design an autonomous power supply source, to obtain the most optimal design.

The development of methodological design decisions and the optimization of engine design parameters as part of generating and drive complexes is an important scientific task.

A mathematical description of thermodynamic processes in a free-piston internal combustion engine, electromechanical and thermal processes occurring in a synchronous electric reciprocating machine with permanent magnets is developed, which is a necessary condition for designing and optimizing the design of an autonomous electric power complex.

According to theoretical calculations, in the Matlab application, on the basis of the additional Simulink module, a simulation model of a free-piston internal combustion engine, linear current load calculation units, stator magnetic induction, magnetic induction created by permanent inductor magnets, electromagnetic force were developed and calculated.

The created procedure for calculating the parameters of the electromagnetic component of the force of a synchronous machine with permanent magnets allows you to calculate and optimize the design parameters of the inductor and stator element of the electric motor under consideration. Thus, this will allow us to design electric machines with improved energy characteristics, due to the use of the obtained simulation results, which will allow us to use them more efficiently in the composition of generating and drive complexes.

Keywords: synchronous electric machine; simulation modeling; electromechanics; thermal model; small energy.

For citation: Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, Petrov TI. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):38-48. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48.

Введение

В Российской Федерации основная часть электроэнергетики генерируется на крупных электростанциях и передается по линии электропередач. Одновременно с этим фактом, важно отметить, что на 60–70% территории страны отсутствует централизованное электроснабжение, где проживает свыше 20 млн. человек и необходимо развитие объектов энергетики, которые будут считаться автономными или объектами распределенной генерации. Такие объекты будут иметь несколько принципиальных различий от традиционных, наиболее важными характеристиками станут массогабаритные параметры.

Энергетическая стратегия РФ на этап до 2030 года обозначила совершенствование малой энергетики в качестве первоочередной задачи из множества приоритетных направлений модернизации энергетической системы, и на данный момент, в России уже в эксплуатации находится около 50 тыс. объектов «новой» энергетики.

Таким образом, приоритетом на ближайшее время является необходимость прирастить совместную мощность объектов малой энергетики (на несколько порядков) с целью увеличения параметров надежностей электроснабжения всех категорий приемников.

Одним из возможных вариантов является использование в качестве электромеханического преобразователя энергии в энергокомплексах синхронной электронной машины возвратно-поступательного воздействия с постоянными магнитами (ЭМВПД с ПМ), отличительным признаком которых является модульная конструкция.

Следовательно, принцип дает возможность изменять энергокомплекс под определенные параметры конечного приемника.

Работа электродвигателя вместе в едином корпусе с свободно-поршневым двигателем внутреннего сгорания (СПДВС) накладывает определенные лимиты по температурной среде, которая имеет потенциал достигать высоких значений температуры (150°C). Электрическое управление ходом индуктора синхронного двигателя и контроль положения индуктора дают возможность облегчить систему СПДВС и сделать лучше массогабаритные характеристики энергоустановки в целом.

Из выполненного обзора научной-технической литературы были сделаны следующие выводы, что на сегодняшний день, оптимальными с точки зрения регулирования рабочих

параметров (ток, напряжение) и наличия возможности получения переменного и постоянного электричества, считаются электромеханические генераторы (ЭМГ). Не считая этого, бесконтактные генераторы имеют более оптимальную конструкцию (с точки зрения массы, габаритов), высокие значения полезной мощности, а еще неплохую отработанность технологий изготовления [1].

Механический КПД ДВС с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), находится в диапазоне 0,8–0,85, что гораздо ниже уровня СПДВС, который может достигать значения 0,93–0,95. Более простая конструкция СПДВС дает возможность значительно снизить расходы на изготовление, эксплуатацию и обслуживание автономной энергоустановки [2, 3].

СПДВС экономично работает на малых нагрузках, имеет достаточно высокий КПД (до 40 %), хорошие массо-габаритные параметры и большой ресурс работы (около 50000 ч) [4,5].

Стоит учитывать, что совокупное использование свободно-поршневого двигателя с синхронным двигателем дает потенциал развития из-за непрерывного изменения геометрической степени сжатия в двигателе.

Данный фактор позволит использовать двигатель на разных видах топливах, и оптимизировать расход топлива [6, 7].

Можно сделать вывод, что у данной технологии есть большие перспективы (электрические машины переменного тока), отличающиеся высокими значениями надежности, высочайшими динамическими свойствами, небольшими массогабаритными параметрами. Данные преимущества достигаются за счет особенностей СПДВС (максимальные нагрузки выше, по сравнению с другими машинами, эксплуатация и при сложных погодных условиях). И очевидно, что такие устройства обладают большим потенциалом внедрения в электроэнергетику [8, 9]. Из-за таких преимуществ синхронного двигателя с ПМ, как высокое значение $\cos \phi$ и общий высокой полезной мощности, можно повышать энергоэффективность и ресурсосбережение производства, за счет снижения потерь в системе. Следовательно, повышается эффективность и всего энергокомплекса, если сравнивать с системами, на базе асинхронных двигателей. Показательным примером использования предлагаемой системы является установка синхронных двигателей для электроприводов, используемых в нефтяной отрасли (штанговые скважинные насосные установки).

Улучшение энергетических характеристик ЭМВПД с ПМ возможно на основе внедрения систем проектирования и оптимизации конструкции для чего необходимо математическое описание процессов, происходящих в автономной энергетической установке.

Важным фактором подтверждения актуальности работы является то, что существует прецедент существенной разницы между международной и отечественной науки в области совершенствования энергетических комплексов на основе СПДВС, которая выражается в фактическом отсутствии в пределах России значимых практических работ в данной тематике, и даже теоретических результатов. Таким образом работы для решения рассматриваемой проблематики могут привести к значимым научно-техническим итогам.

В работе предлагается современный метод проектирования и оптимизации СЭМПМ с использованием генетического алгоритма [10,11,12].

Разработан алгоритм анализа, многокритериальной и топологической оптимизации роторов и индукторов СЭМПМ. Предполагается, что ротор и индуктор с постоянными магнитами должен иметь несложную конструкцию для простоты изготовления и повышенный вращающий момент или линейную силу по сравнению с базовым образцом.

Проектирование электрической машины как эвристический процесс – не гарантирует нахождение лучшего решения. Необходимы методы дополняющие опыт и интуицию проектировщика для нахождения оптимального (рационального) решения. Топологическая оптимизация на данный момент выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для снижения массы и улучшения жесткостных характеристик конструкций. Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные процессы в СЭМПМ для определения направления намагниченности постоянных магнитов, размеров пазов статора и постоянных магнитов с целью повышения КПД и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях.

Таким образом, развитие методических решений проектирования и оптимизация конструктивных параметров СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов является важной научной задачей.

Созданная математическая модель и алгоритм расчета и выбора оптимальных характеристик синхронных двигателей имеют все шансы быть применены российскими проектными и научными организациями для оптимизации конструкции.

Для достижения поставленных результатов использовались методы оптимизации, теории электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники. Исследования проводились с использованием сред математического моделирования *Matlab 2010, Comsol Multiphysics, Elcut*. Для проверки корректности математических моделей использовались методы имитационного моделирования и исследования на экспериментальных и испытательных стендах.

Моделирование термодинамических процессов в СПДВС.

СПДВС стандартного цикла Отто рассматривается с использованием базовой модели двигателя для нахождения диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, а также резонансной частоты колебаний. Данная модель используется для определения влияния конфигурации и намагниченности постоянных магнитов синхронной ЭМВПД с ПМ на скорость колебаний в системе.

В рассматриваемом СПДВС два оппозитно-расположенных поршня установлены на общий шатун, что позволяет им колебаться между двумя крайними точками в цилиндрах.

Процесс горения топливной смеси происходит поочередно в каждом цилиндре, заставляя поршни совершать возвратно-поступательные движения. Рис. 1 иллюстрирует конфигурацию СПДВС.

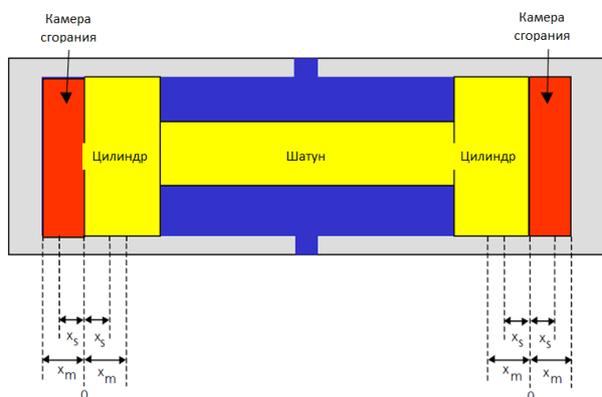


Рис.1. Упрощенный вид поперечного сечения СПДВС

На рис. 1 индуктор показан в нейтральном или в нулевом положении.

Как видно из рисунка, индуктор может свободно перемещаться на максимальное расстояние x_m , в любом направлении от нулевого положения до касания головки цилиндра. Однако, на практике индуктор движется только на расстояние x_s , от нулевого положения, оставляя объем в цилиндре. Расстояние x_s равно длине половине хода индуктора (или, что тоже самое, поршня). По мере того, как поршневой узел перемещается в любом направлении, один цилиндр будет проходить процесс расширения, а другой сжатия, функционируя как нелинейная пружина. Сжатие и расширение каждого цилиндра моделируется как адиабатный процесс. В дальнейших расчетах резонансная частота вычисляется через сумму силы, действующей на поршни из-за давления газов при расширении и результирующей электромагнитной силы в генераторе переменного тока, равной произведению массы сборки поршня (сюда входит и масса индуктора) на ее ускорение (2 закон Ньютона).

Тогда уравнение баланса сил можно выразить через давление на входе топлива и степень сжатия (1).

$$A_B P_1 \left(\frac{2r}{r+1} \right)^n \left[\left(1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left(1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F(x) = m x \quad (1)$$

где: A_B – площадь поперечного сечения цилиндра; m – масса индуктора (поршневой группы); x – положение индуктора (позиция); $F(x)$ – электромагнитная сила и сила трения; n – политропный коэффициент сжатия; r – степень сжатия; Q_{IN} – теплота сгорания топлива.

Решение данного уравнения позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора СПДВС, работающего в стационарных условиях.

Основными параметрами двигателей, на основе которых можно рассчитать возможность распределения и эксплуатации элементов из разных материалов,

массогабаритные параметры при известном значении мощности, будут следующие параметры [13]:

1. Магнитная индукция в воздушном зазоре B_{\square} .
2. Линейная токовая нагрузка A .

Для того чтобы отобразить линейную токовую нагрузку в виде уравнения представим его в виде ряда Фурье (распределение линейной токовой нагрузки представляет собой нечетную функцию).

Получим следующее выражение (2)

$$A(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\omega_n i_{n2}}{b_N} \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_N}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x)\right)\right) \\ & + \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ & + \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где: b_N – ширина паза для обмотки; τ_s – полюсное деление статора; v – номер гармоники; ω_n – количество витков обмотки; i_{n2} – ток в обмотке.

Данный подход, аналогичный расчету линейной токовой нагрузки, позволяет получить следующее выражения для индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами $B_{\text{mag}}(x)$ (3):

$$B_{\text{mag}}(x) = B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_{pm}}(x)\right)\right) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

где: b_m – ширина магнита; τ_{pm} – полюсное деление индуктора; B_0 – остаточная намагниченность.

Складывая индукции воздушного зазора статора и индуктора, получаем результирующее значение индукции в воздушном зазоре (4):

$$\begin{aligned} B_{\text{рез}}(x, t) &= B_{\text{mag}}(x) + B_s(x, t) = \\ &= B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[\begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_{pm}}(x)\right)\right) \end{aligned} \right] + \\ &+ \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_n \cdot I}{\delta \cdot \pi} \cdot \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \frac{\xi_n \cdot \xi_s}{v_D} \cdot \cos\left(v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right). \end{aligned}$$

Электромагнитная сила линейной машины рассчитывается как:

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_0^{\tau_s} A(x, t) \cdot B_{\text{рез}}(x) dx,$$

где: p – число пар полюсов; l_{sp} – длина воздушного зазора.

Важно рассчитать не только параметры электромагнитной силы, но и характеристики тепловых процессов, для этого необходимо использовать тепловую модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия.

Задачи моделирования теплового режима синхронной ЭМВПД с ПМ:

- создать как можно более точную картину тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ;
- определить максимально допустимую потребляемую и выдаваемую мощность ОЭМВПД при температуре охлаждающей жидкости (вода) от 25 °С до 80 °С;
- определить параметры, влияющие на теплоотдачу;
- определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Определение теплопередачи и теплопроводности элементов синхронной ЭМВПД с ПМ основано на разбиении поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ, представленного на рис. 2.

22	23	24
19	20	21
16	17	18
13	14	15
10	11	12
7	8	9
4	5	6
1	2	3
L1	L2	L3

Рис. 2. Разбиение поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ на области с соответствующими номерами

Области 2, 5 и 8 относятся к катушке с обмоткой, области L1, L2 и L3 относятся к индуктору синхронной ЭМВПД, области 22, 23, 24 – канал охлаждения, области 16-21 – кожух охлаждения, остальные относятся к пакету статора.

Результаты моделирования

Согласно теоретическим выкладкам в приложении *Matlab Simulink* разработана имитационная модель СПДВС, которая позволяет моделировать различные режимы работы СПДВС при варьировании входных параметров: давление газов при сгорании топлива, площадь поперечного сечения цилиндра, масса поршневой группы, положение индуктора.

Данные параметры позволяют решить уравнения (1), что дает возможность определить положение и скорость поршневой группы (и соответственно индуктора) СПДВС работающего в стационарных условиях.

Варьируемые параметры загружаются в имитационную модель СПДВС для последующего расчета и анализа.

Выходными параметрами являются:

x – достигнутый максимальный ход индуктора; v – достигнутая максимальная скорость индуктора; $P_{\text{мех}}$ – выходная механическая мощность средняя; f – частота колебаний индуктора.

Выходные параметры используются для дальнейших расчетов в различных блоках и программах при проектировании автономной энергоустановки.

Результаты моделирования представлены на рис. 3-4.

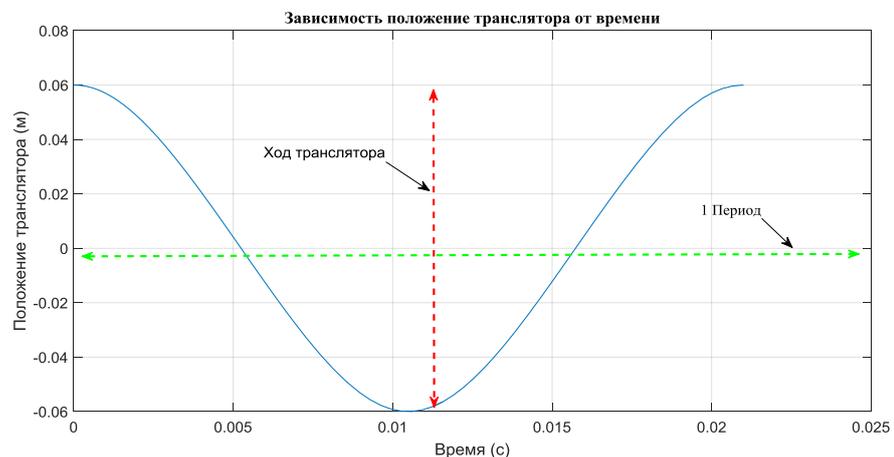


Рис. 3. Зависимость положения индуктора от времени в пределах одного цикла

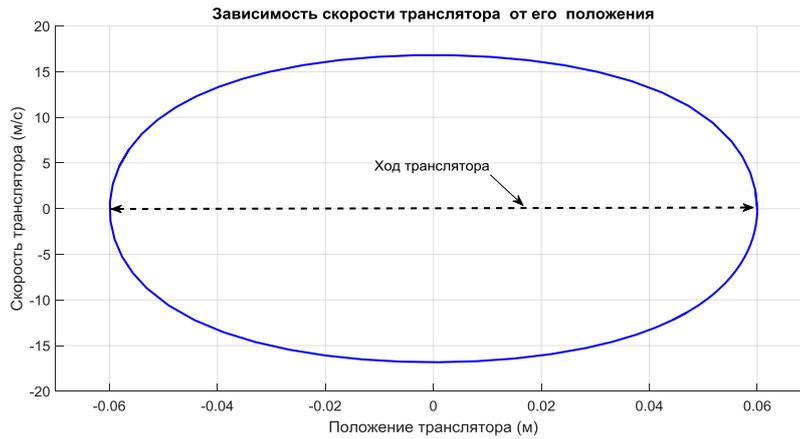


Рис. 4. Зависимость скорости и положения индуктора от времени в пределах одного цикла

Выводы

Разработаны блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы линейной машины, потерь в линейной электрической машине согласно теоретическим выкладкам, и на основе моделирования при помощи этих блоков получены следующие результаты (рис. 5-7).

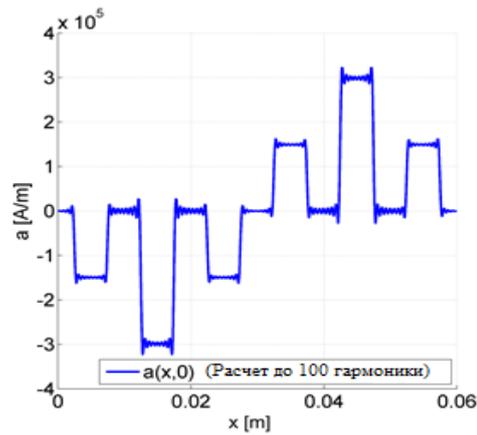


Рис.5. Нагрузка электрической машины

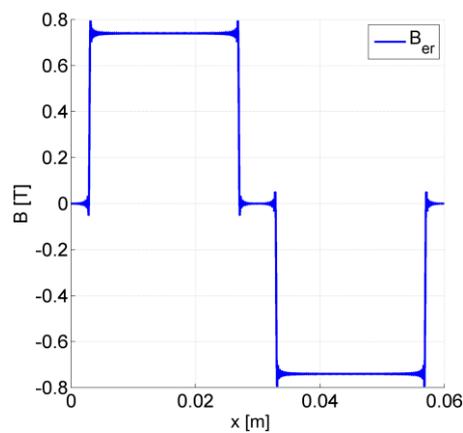


Рис. 6. Параметры поля возбуждения

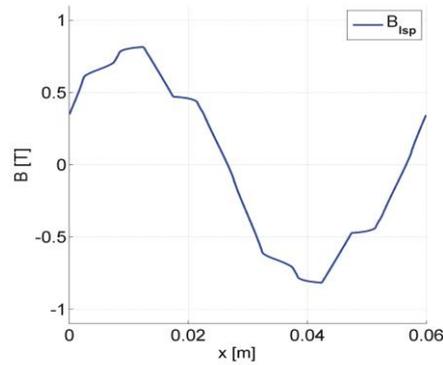


Рис. 7. Результирующее значение индукции

Реакция якоря (рис. 8) рассчитывается на основе метода конечных элементов с магнитными свойствами постоянных магнитов $\mu_r = 1$ и $B_r = 0$, что позволяет моделировать расчет магнитного потока с тем условием, что постоянные магниты будут учитываться с параметрами воздушного зазора.

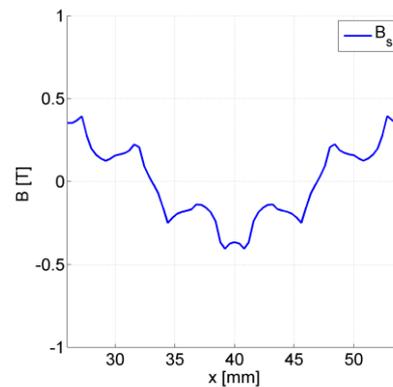


Рис.8. Реакция якоря в воздушном зазоре в границах полюсного деления

Составляющая магнитной индукции индуктора в индукции воздушного зазора образуется полем магнитов без учета влияния токов статора (реакции статора). Для этого в модели указывается плотность тока $s = 0$ А/мм². Получаем поле возбуждения в границах полюсного деления, представленное на рис. 9, из которого можно получить представление о параметрах магнитной индукции ПМ, и еще сделаем вывод, что в данном случае статорная обмотка сильно влияет на рассматриваемое поле.

Достаточно качественным способом моделирования процессов изменения тепловых характеристик электрических машин, базирующихся на применении электросхем замещения термических изменений. Базой для применения рассматриваемых способов считается теоретические аспекты схожести и изоморфизма систем уравнений. При помощи данной системы можно представить все необходимые процессы, происходящие в электросистеме [14].

Электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВПД С ПМ, разработанная в программе *Matlab*, в специальном дополнительном пакете *Simulink*, с использованием готовых и расчетных блоков. На основе моделирования процессов в системе мы получили следующие данные, представленные на рис.10.

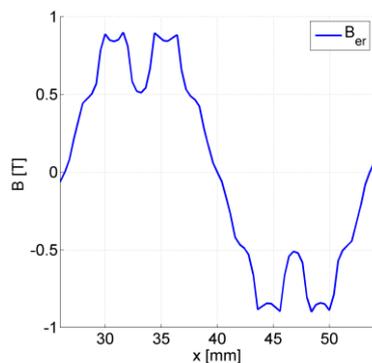


Рис.9. Поле возбуждения в границах полюсного деления

Наиболее часто применяется данная методика для расчетов в сфере определения тепловых характеристик двигателей [15].

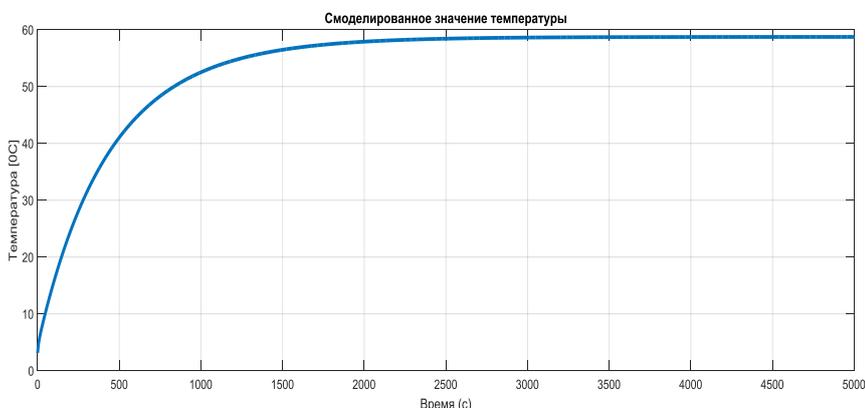


Рис. 10. Смоделированное значение температуры

Представленные итоги моделирования подтверждаются правильной постановкой цели статьи, работой с использованием передовых компьютерных программ, вспомогательной аппаратуры, всеохватывающим планом исследований, результаты теоретической и практической части сходятся, результаты соответствуют основным положениям исследователей в данной области, не выходят за пределы теоретических максимумов. Полученные результаты подверглись математическому анализу.

Заключение

Разработанная математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения позволяет составить уравнение баланса сил, что дает возможность рассчитать положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в стационарных условиях автономной энергоустановки.

Разработанная методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

Тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ дает возможность создать как можно более точную картину тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, определить максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Таким образом, это позволит конструировать ЭМВПД с улучшенными энергетическими характеристиками, за счет использования полученных результатов моделирования, что позволит использовать их более эффективно в составе генерирующих и приводных комплексов.

Литература

1. Григораш ОВ., Божко СВ., Попов АЮ., и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. Монография: Краснодар. 2012. 174 с.
2. Баль ВБ., Геча ВЯ., Гончаров ВИ., и др. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – типы и конструкции электрических машин // Вопросы электромеханики. 2015. Т. 148. С. 3.
3. Сокол ЛБ. Линейные электродвигатели. Общий обзор // Технологии инженерных и информационных систем. 2016. № 4. С. 49.
4. Ferrari C., Friedrich E. Development of a Free-Piston Linear Generator for use in an Extended-Range Electric Vehicle // EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California. 2012. P. 787.
5. Копылов АМ., Ившин ИВ., Денисова НВ., и др. Перспективы применения линейного двигателя-генератора для повышения энергоэффективности гибридного транспорта // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кемерово, 2014.
6. Сафин АР., Хуснугдинов РР., Копылов АМ., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ, 2018, №4 (40).
7. Gracheva EI., Alimova AN. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019 pp. 361-367.
8. Noguchi, S., Matsutomo S. Rational Design Optimization Method for Reducing Cost and Improving Performance of Commonalized IPM Motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. №51. P. 735.
9. Gargov NP., Zobaa AF., Pisica I. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters // Electric Power Systems Research. 2014. № 109. P. 63.
10. Антипов ВН., Грозов АД., Иванова АВ. Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики // Электротехника. 2017. № 2. С. 8.
11. Song, Y., Feng H., Zuo Z., et.al. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process // Energy Procedia. 2014. № 61. P. 1597.
12. Lei G., Liu C.C., Guo Y.G., et.al. Multidisciplinary Design Analysis for PM Motors with Soft Magnetic Composite Cores. IEEE Transactions on Magnetics. 2015. № 51. P.321.
13. Huang Z., Fang J. Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. № 63. P. 2766.
14. Sun X., Shi Z., Chen L. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2016. № 31. P.1539.
15. Shenoy KL., Kumar MS. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor. ICSEOT. 2016. P. 1541.

Авторы публикации

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

Сафин Альфред Робертович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Петров Тимур Игоревич – ассистент, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Grigorash OV, Bozhko SV, Popov AYU, et al. *Autonomous sources of electricity: state and prospect*. Krasnodar, 2012. 174 p.
2. Bal VB, Getcha VYa, Goncharov VI., et al. Linear electric machines of reciprocating action - types and designs of electric machines. *Problems of Electromechanics*. 2015;148:3.

3. Sokol LB. Linear electric motors. General review. *Technologies of engineering and information systems*. 2016;4:49.
4. Ferrari C, Friedrich E. Development of a Free-Piston Linear Generator for use in an Extended-Range Electric Vehicle. *EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Los Angeles, California. 2012. P. 787.
5. Kopylov AM, Ivshin IV, Denisova NV. Prospects for the use of a linear engine-generator to improve the energy efficiency of hybrid vehicle. *Energy and Energy Saving: Theory and Practice*. Kemerovo. 2014.
6. Safin AR, Khusnutdinov RR., Kopylov AM., et al. Development of a method for topological optimization of the preparation of coffee based on the genetic algorithm. *Bulletin of KSPEU*. 2018;4(40).
7. Gracheva EI, Alimova AN. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2019. pp. 361-367.
8. Noguchi S, Matsutomo S. Rational Design Optimization Method for Reducing Cost and Improving Performance of Commonalized IPM Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51:735.
9. Gargov NP, Zobaa AF, Pisica I. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters. *Electric Power Systems Research*. 2014;109:63.
10. Antipov VN, Grozov AD, Ivanova AV. 30 kW linear synchronous generator for wave energy. *Electrical Engineering*. 2017;2:8.
11. Song Y, Feng H, Zuo Z, et.al. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process. *Energy Procedia*. 2014;61:1597.
12. Lei G, Liu CC, Guo YG, et.al. Multidisciplinary Design Analysis for PM Motors with Soft Magnetic Composite Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51:321.
13. Huang Z, Fang J. Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016;63:2766.
14. Sun X, Shi Z, Chen L. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2016;31:1539.
15. Shenoy KL, Kumar MS. *Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor*. ICEEOT. 2016. P. 1541.

Authors of the publication

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alfred R. Safin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: sarkazan@bk.ru.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Поступила в редакцию

24 октября 2019г



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПУЛЬСАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

А.И. Хайбуллина, В.Ильин¹ Н.Х. Зиннатуллин²

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия
haybullina.87@mail.ru

Резюме: На сегодняшний день загрязнение теплообменного оборудования приводит к серьезным экономическим убыткам в многих отраслях промышленности, поэтому поиски метода для снижения скорости или предотвращения загрязнения остается актуальной задачей. В данной работе предложено практическое решение для реализации пульсационного метода очистки на примере маслоохладителей. Проведено численное исследование влияния пульсационного потока на эффекты способствующие уменьшению загрязнений на внешней поверхности пучков труб. Численное исследование проводилось с использованием ПО Ansys Fluent. Течение жидкости описывалось уравнением Навье-Стокса, движение частиц и их взаимодействие описывалось методом дискретных элементов (DEM). При исследовании был рассмотрен шахматный пучок труб. Частота пульсаций соответствовала 0,3125 Гц, амплитуда отнесенная к диаметру трубки пучка 35, число Рейнольдса 100, скважность пульсаций соответствовала 0,25. В качестве рабочей среды было выбрано масло. Оценка пульсационной методики очистки осуществлялась на основе анализа механика соударения частиц о поверхность центрального цилиндра в пучке, при стационарном и пульсационном потоке. Установлено, что пульсационный поток способствует уменьшению загрязнений в передней области цилиндра и не эффективен в задней. Анализ механики соударения частиц о поверхность теплообмена показал, что данный режим пульсаций эффективней для удаления пластичных отложений.

Ключевые слова: маслоохладитель, скорость эрозии, очистка теплообменников, низкочастотные несимметричные пульсации, метод дискретных элементов, шахматный пучок труб, математическое моделирование, пульсационная очистка, пульсирующие течения, загрязнения теплообменной поверхности.

Благодарности: Статья выполнена в рамках научного проекта 18-79-10136 «Теоретические методы моделирования и разработки энергоэффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса».

Для цитирования: Хайбуллина АИ., Зиннатуллин НХ., Ильин ВК. Повышение эффективности работы теплообменного оборудования использованием пульсационных методов очистки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020.Т. 22. № 1. С. 49-57. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-49-57.

IMPROVING HEAT EXCHANGER EFFICIENCY USING THE PULSED METHOD OF CLEANING

AI Haibullina¹, VK Ilyin¹, NX Zinnatullin²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
haybullina.87@mail.ru

Abstract: The fouling of heat exchange equipment leads to serious economic losses in many industries, therefore to find a method to reduce deposits on heat transfer surfaces remains an actual task. In this paper, a practical solution is proposed for the implementation of a pulsating cleaning method of oil coolers as an example. The influence of pulsations on cleaning of the external surface of the heat exchanger is studied by computer modeling with Ansys Fluent. The fluid flow was described by the Navier-Stokes equation, particle motion and their interaction was described by the discrete element method (DEM). In the study, a staggered tube bundle was considered. The pulse frequency 0,3125 Hz, the amplitude referred to the diameter of tube is 35, the Reynolds number 100, the duty cycle of the pulsations 0,25. Oil was chosen as the medium. Evaluation of the pulsating cleaning method was carried out on the basis of the analysis of the mechanics of particle collisions on the surface of the central cylinder in the beam, with stationary and pulsating flow. It was found that the pulsating flow helps to reduce deposits in the front of the cylinder and is not effective in the back. An analysis of the mechanics of particle impact on the heat exchange surface showed that this pulsation mode is more effective for removing plastic deposits.

Keywords: oil cooler, erosion rate, heat exchanger cleaning, low-frequency asymmetrical impulses, discrete element method, staggered tube bundle, mathematical modeling, pulsating cleaning, pulsating flow, surface contamination.

Acknowledgments: The article is executed within the framework of the scientific project 18-79-10136 «Theoretical methods for modeling and developing energy-efficient import-substituting cleaners and deep processing of hydrocarbon raw materials at enterprises of the fuel and energy complex».

For citation: Haibullina AI, Zinnatullin NX, Ilyin VK. Improving heat exchanger efficiency using the pulsed method of cleaning. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):49-57. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-49-57.

Введение

Загрязнение теплообменников остается на сегодняшний день одной из основных нерешенных проблем в области теплоэнергетики, а нахождение лучшего метода для предотвращения или снижения скорости загрязнения продолжает быть актуальной задачей. Эффективность систем маслоснабжения насосных установок и турбоприводов зависит от стабильной и бесперебойной работы маслоохладителей. Стабильная работа маслоохладителей характеризуется постоянной теплопроизводительностью и гидравлическим сопротивлением. Температура масла на выходе из маслоохладителя может увеличиться ввиду ряда причин. Например, в связи увеличением температуры охлаждающей воды или с загрязнением поверхности теплообмена, что введет к увеличению расхода охлаждающей воды [1].

При эксплуатации маслоохладителя его теплопроизводительность Q может снизиться в результате ряда причин:

- попадание воздуха в корпус маслоохладителя;
- засорение трубных досок;
- загрязнение поверхности теплообмена;
- увеличение температуры охлаждающей воды связанные с пиковыми нагрузками;
- засорение водяных фильтров и как следствие уменьшение охлаждающей воды.

Основной причиной снижения Q является загрязнения поверхности теплообмена. В этом случае для восстановления Q необходимо очистка маслоохладителя. Очистка может производиться, как механически, путем разбора маслоохладителя с дальнейшей промывкой поверхности теплообмен, так и без разбора (реагенты, гидродинамическая очистка). Очистка с водяной стороны проще по сравнению очистки со стороны масла, в силу того, что масло находится в межтрубном пространстве (здесь загрязненная поверхность теплообмена является более трудно доступной).

Традиционный химический метод очистки теплообменников требует утилизации химических реагентов после очистки, а также остановки работы агрегата на время удаления загрязнений. В этом свете пульсационные методы интенсификации теплообменных процессов представляются перспективным способом очистки, т.к. они не требуют разборки агрегатов, а также остановки их работы. Импульсный поток создает высокие периодические

ускорения жидкости, которые могут вызывать более быстрое разрушение слоя отложений из-за увеличения напряжения сдвига, действующего на поверхность. Данный метод может решить проблему очистки внешней поверхности труб в пучке, наиболее труднодоступной части для очистки в теплообменном аппарате.

Периодический нестационарный поток хорошо зарекомендовал себя в качестве метода интенсификации теплообмена. В работах [2,3] исследовалось влияние наложенных пульсаций на поток теплоносителя в теплообменнике типа в трубе. В результате экспериментальных исследований обнаружено, что с увеличением интенсивности пульсаций происходит рост теплоотдачи. В работах [4,5] исследуется теплообмен при поперечном обтекании цилиндра в условиях наложенных пульсаций потока. В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что пульсации потока приводят к интенсификации теплообмена как при ламинарном [4], так и при турбулентном течении [5]. В работах [6,7], также обнаружено увеличение теплоотдачи одиночного цилиндра при вынужденных пульсациях потока. Интенсификация теплообмена наблюдается при принудительных пульсациях потока в трубе [8], при обтекании полуцилиндра [9,10], и других препятствий [11,12]. Не смотря на имеющиеся положительные результаты в применении пульсирующих потоков для интенсификации теплообмена в пучках труб для потоков воздуха [13], воды [14] и масла [15], экспериментальных и теоретических исследований их влияния на очистку внешней поверхности труб в пучке в настоящее время недостаточно [16-18]. Поэтому в данной работы было исследование влияния пульсационного потока на эффекты, способствующие удалению отложений на внешней поверхности пучков труб, а также предложено практическое решение для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

Постановка задачи исследования

На рис. 1 предложена модернизированная схема системы охлаждения подшипников насосно-силового агрегата для перекачки нефтепродуктов оснащенная пульсационной установкой рис. 1. Предложенное схемное решение было использовано [1,19] для восстановления теплопроизводительности маслоохладителя при загрязнении теплообменной поверхности. Увеличение теплопроизводительности осуществлялось за счет интенсификации теплообмена в межтрубном пространстве маслоохладителя пульсирующим потоком. Данное практическое решение также может использоваться для реализации пульсационного метода очистки маслоохладителей.

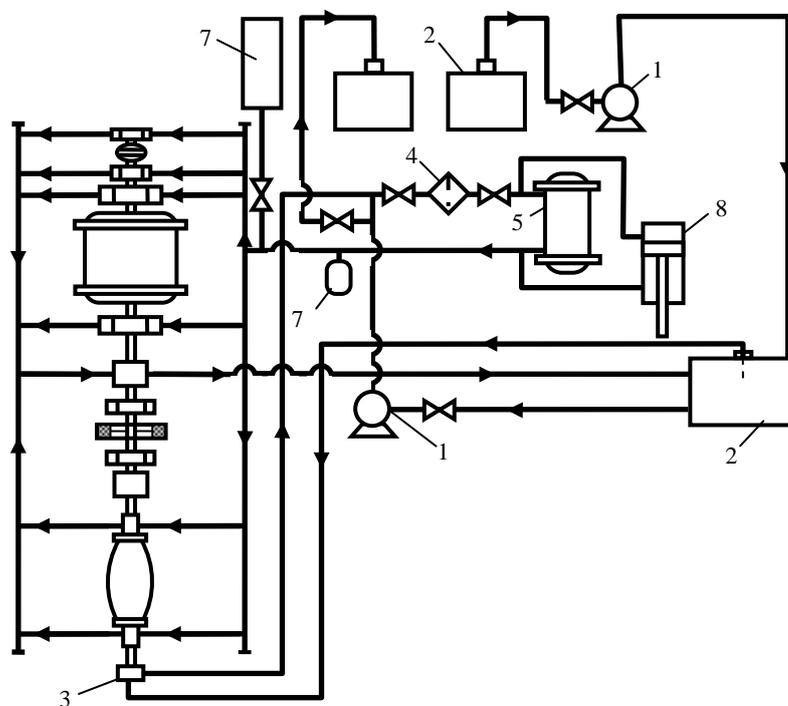


Рис. 1. Модернизированная схема насосно-силового агрегата:

1 – шестеренчатый насос; 2 – бак; 3 – насосно-силовой агрегат; 4 – фильтр; 5 – маслоохладитель; 6 – аккумулярующий бак; 7 – гидропневмобак; 8 – пульсационная установка

На рис. 2 показана схема ПУ. Насос 1 всасывает рабочую жидкость (масло) из бака 9 и подает в гидроцилиндр (ГЦ) 8 через гидрораспределитель 7, обратно в бак масло возвращается через радиатор 6 и фильтр 5. Гидрораспределитель служит для изменения направления движения поршня ГЦ 11 и поршня пульсатора 12, поскольку поршень ГЦ связан общим штоком с поршнем пульсатора. Полость пульсатора 13 связана с входным штуцером маслоохладителя (по потоку масла) (рис. 2), полость пульсатора 14 с выходным штуцером маслоохладителя. Поэтому при уменьшении объема в полости 13 пульсатора (прямой ход поршня) происходит увеличение давления на выходе из маслоохладителя и уменьшению на входе в связи с расширением полости 14 пульсатора, что приводит к остановке и смене направления движения потока масла в маслоохладителе. При изменении направления движения (обратный ход) поршня пульсатора происходит увеличение давления на входе в маслоохладитель и уменьшение на выходе соответственно, что приводит к повторному развороту потока масла и ускорению его течения.

Таким образом, поток масла в маслоохладителе совершает возвратно-поступательное движение с заданной частотой f амплитудой A/d и скважностью ψ пульсаций. Необходимая f и ψ задается путем установки времени срабатывания электромагнитных клапанов гидрораспределителя, A/d длиной рабочего хода поршня пульсатора.

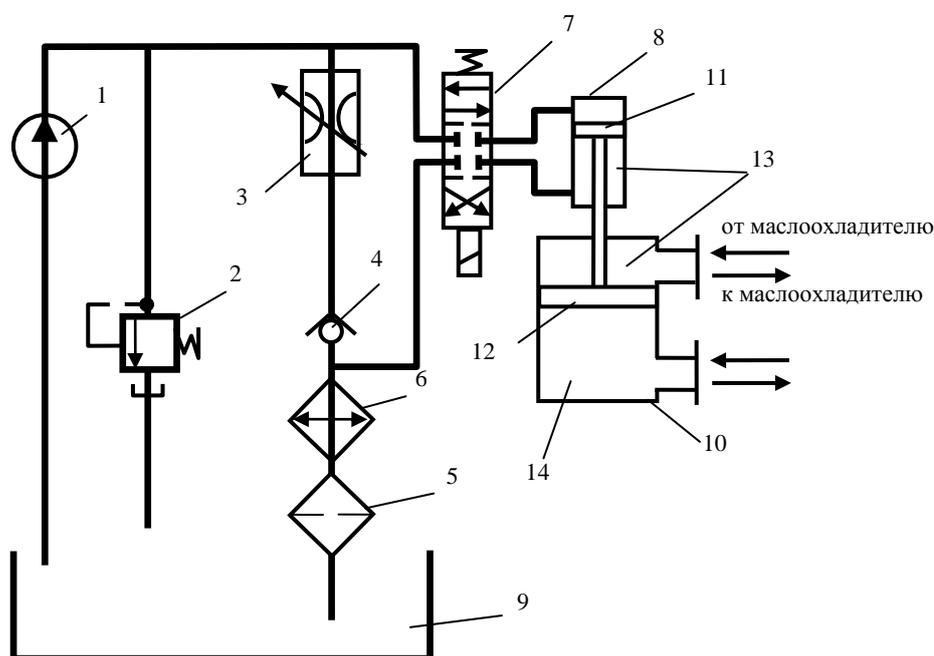


Рис. 2. Схема ПУ:

1 – насос; 2 – клапан предохранительный; 3 – дроссель; 4 – клапан обратный; 5 – фильтр; 6 – радиатор; 7 – гидрораспределитель; 8 – ГЦ; 9 – бак; 10 – пульсатор; 11 – поршень ГЦ; 12 – поршень пульсатора; 13, 14 – полости пульсатора

Для оценки влияния режимов пульсирующего потока на условия способствующие очистке было проведено численное исследование.

Течение масло в пучке труб описывалось уравнением Навье-Стокса, с применением модели турбулентности Спаларта-Аллмараса SA. Расчетная область математической модели представляла собой двухмерный пучок труб с расположенными в нем половинками трубок в шахматном порядке рис. 3. На входе в канал задавались параметры пульсирующего потока.

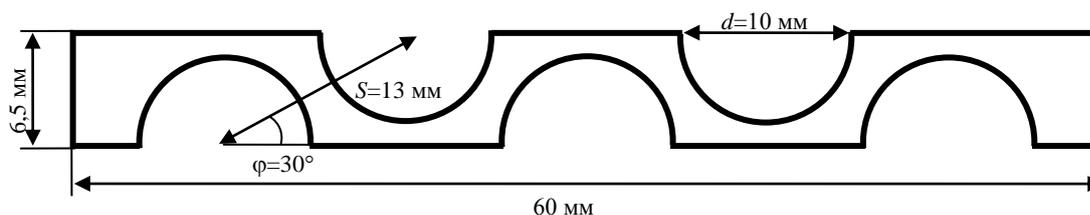


Рис. 3. Геометрия численного эксперимента

Наибольшее влияние на скорость эрозии оказывают скорость падения частиц, а также их угол удара, поэтому в этой работе мы учитывали воздействие именно этих факторов. Диаметр и массовый расход были постоянными для идентичных условий, соответственно эти факторы одинаково влияют на скорость эрозии в стационарном и в импульсном режиме, поэтому эти факторы мы не учитывали. Влиянием шероховатости стенки и вязкости жидкости на эрозию мы пренебрегли. Подробное описание деталей численного эксперимента приведено в работе [20].

Обсуждение результатов

Моделирование было проведено в ПО *Ansys Fluent* методом конечных объемов для этого расчетная область была поделена на 4220 ячеек. ПО *Ansys Fluent* [21] позволяет узнать значения координат и скоростей всех частиц в любой момент времени.

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – координаты i -ой частицы, x_0, y_0 – координаты центра окружности. Считаем частицу ударившейся в стенку, если $r_i \leq R_{\text{трубы}} + r_{\text{частицы}}$.

Из координат частицы, ударившейся в стенку, мы также нашли тангенс угла наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности стенки в месте удара:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \rightarrow \varphi_i = \arctg \left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \right) \quad (2)$$

В исследовании нам нужны были только те частицы, которые летели к стенке. Поэтому для упрощения расчетов вектор скорости частицы был переведен из системы координат O_{xy} в систему O_{ba} , где ось O_b – касательная к поверхности стенки в месте соударения, а O_a – перпендикуляр к касательной, проходящий через точку соударения и центр окружности полутрубы (рис. 4). С помощью матрицы поворота системы координат переводим скорость частицы в новых координатах:

$$v_{bi} = v_{xi} \cos \gamma \mp v_{yi} \sin \gamma \quad (3)$$

$$v_{ai} = v_{yi} \cos \gamma \pm v_{xi} \sin \gamma, \quad (4)$$

где v_{xi}, v_{yi} – значение скорости i -ой частицы в координатах O_{xy} , v_{bi}, v_{ai} – в координатах O_{ba} , γ – угол поворота новой системы координат относительно старой, верхний знак указан для положительного направление вращения против часовой стрелки, нижний – по часовой стрелке $\left(\gamma = \begin{cases} 90^\circ - \varphi, & \text{при } \varphi < 90^\circ \\ \varphi - 90^\circ, & \text{при } \varphi > 90^\circ \end{cases} \right)$.

Соответственно, если $v_{ai} < 0$, то частица летит к стенке, и мы учитываем ее в наших расчетах. За угол падения частицы принимаем острый угол между вектором скорости и осью O_b , находим его следующим образом:

$$\beta_i = 90^\circ - |\alpha_i|, \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{v_{bi}}{v_{ai}}. \quad (5)$$

Модуль скорости i -ой частицы в момент удара равен:

$$v_i = \sqrt{v_{ai}^2 + v_{bi}^2} \quad (6)$$

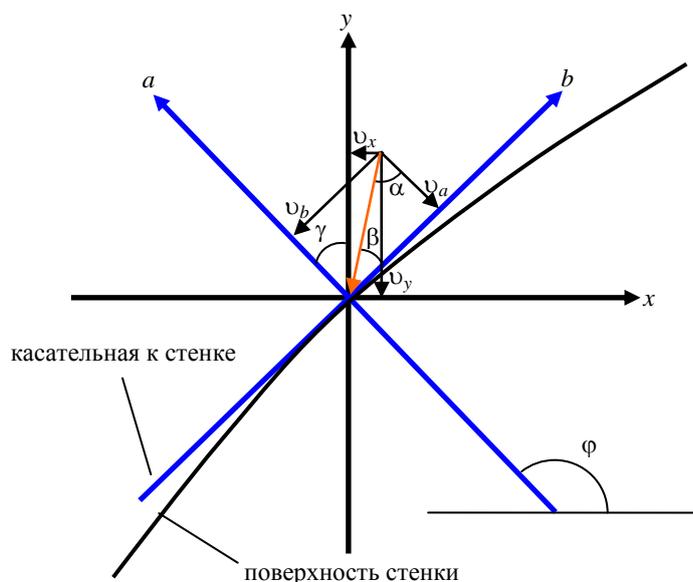


Рис. 4. Иллюстрация направления вектора скорости:
 стрелка оранжевого цвета – направление вектора скорости, угол φ – угол наклона прямой, перпендикулярной касательной к поверхности, угол γ – угол поворота системы координат, угол β – угол удара частицы

На рис. 5 представлено количество частиц, угол падения которых входит в диапазон $15 \leq \beta \leq 25$ и $75 \leq \beta \leq 90$ и $75 \leq \beta \leq 90$. Средняя скорость частиц в момент удара на рис. 6. Результаты приведены для лобовой и кормовой части центральной трубки в пучке (рис. 3).

Приведенные диапазоны углов были выбраны для исследования исходя из того, что для хрупких материалов на скорость эрозии наибольшее влияние оказывают углы ударов наиболее близкие к 90° , а для пластичных – максимум эрозии достигается при углах равных 20° .

Время также было отложено в относительных значениях, где 0 – начало периода, а 1 соответствует длине периода T . Режим пульсаций соответствовал значениям амплитуды $A/d = 35$, частоты $f = 0,3125$ Гц, скважности $\psi = 0,25$ и числу Рейнольдса $Re = 100$. Плотность масла соответствовала $\rho = 854 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 0,014 \text{ Па}$. Количество частиц, ударившихся в лобовой части возросло (рис. 5) как для углов в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$, так и при углах $75 \leq \beta \leq 90$ (значения >1), средняя скорость частиц также возросла (рис. 6), по сравнению со значениями для стационарного потока. Таким образом, можно сделать вывод, что эрозия лобовой части возросла как для хрупких загрязнений, так и для пластичных. Скорость эрозии в кормовой части трубки снизилась, т.к. снизилась скорость удара частиц.

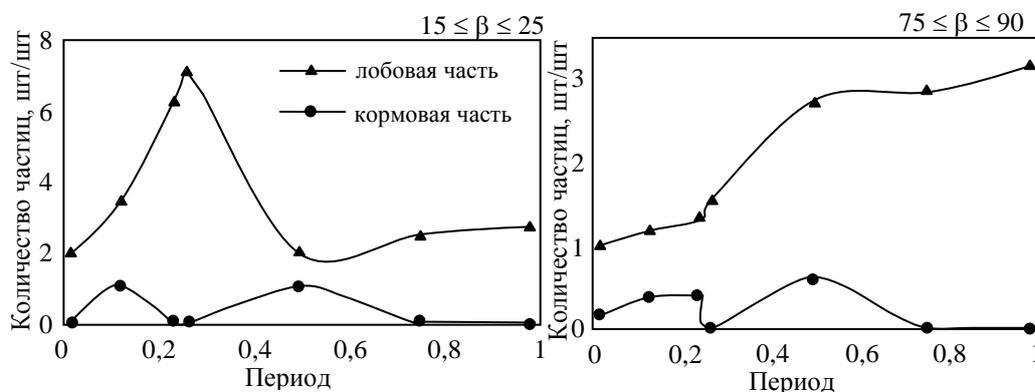


Рис. 5. Количество частиц в относительных единицах, ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ (слева) и $75 \leq \beta \leq 90$ (справа)

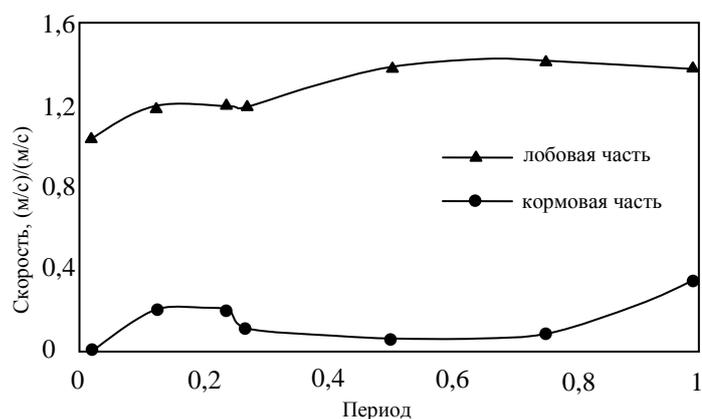


Рис. 6. Средняя скорость частиц в момент в относительных единицах

Выводы

Для лобовой части рубки количество частиц ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ больше частиц ударившихся под углом $75 \leq \beta \leq 90$, что говорит о большем потенциале применения пульсаций для очистки загрязнений из пластичных отложений.

Для кормовой части трубы рубки количество частиц ударившихся под углом в диапазоне $15 \leq \beta \leq 25$ и $75 \leq \beta \leq 90$ меньше стационарного течения (значения < 1). Для улучшения условий способствующих очистке в кормовой зоне необходимы дополнительные исследования при других параметрах пульсаций.

Литература

1. Хайбуллина А.И. Повышение эффективности теплообменных аппаратов наложением на поток в межтрубном пространстве низкочастотных пульсаций: дисс. ... канд. техн. наук: А.И. Хайбуллина. 2017. С. 229.
2. Zohir A.E. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows // *New York Science Journal*. 2011. V. 4. №6. pp. 61-71.
3. Zohir A.E. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. // *J. Am. Sci.* 2012. V. 8. pp. 241-250.
4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, et al. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows // *Heat Transfer Engineering*. 2016. V. 37. № 6. pp. 535-544.
5. Li G., Zheng Y., Xu Y., et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows // *Heat and Mass Transfer*. 2014. V. 50. № 6. pp. 1417-1427.
6. Molochnikov V.M., Mikheev N.I., Mikheev A.N., et al. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017. V. 24. №4. С.569-575.
7. Mikheev N. I., Molochnikov V. M., Mikheev A. N., Dushina O. A. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. V.109. pp. 254-265.
8. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. V. 47. pp. 3957-3970.
9. Bhalla N., Dhiman A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. V. 39. № 8. pp. 3019-3037.
10. Srivastava A., Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder // *The European Physical Journal Plus*. 2019. 134(4). pp. 1-17.
11. E. Martin, A. Velazquez & A. Valeije (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* V. 74. № 12. pp. 1747-1769.
12. Velazquez A., Arias J.R., Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. V. 51. pp. 2075-2089.
13. Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Goltsman A.E., Paereliy A.A., Aslaev A.K. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow // *Journal of Physics: Conference Series* 2018. pp. 012-024.

14. Хайбуллина АИ., Хайруллин АР., Сиявин АА., и др. Исследование теплоотдачи в коридорном пучке труб при наложении на поток противоточных несимметричных низкочастотных пульсаций // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. Т 12. № 1. С. 312-315.

15. Iyin VK, Sabitov LS., Haibullina AI., et al. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016". 2017. V. 240, № 1. pp. 1-10.

16. Bode K., Hooper RJ., Paterson WR., et al. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling // Heat Transfer Engineering. 2007. V. 2. № 3. pp. 202-209.

17. Scholer M., Fuchs T., Augustin W., et al. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures / Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. 2009. pp. 455-463.

18. Augustina W., Fuchs T., Föste H., et al. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing // Food and Bioproducts Processing. 2010. V. 8. pp. 384-391.

19. Haibullina A.I., Sabitov L.S., Hayrullin A.R., et al. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler // OP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412. 2018. pp. 1-6.

20. Липагина А.Д. Использование пульсаций для очистки теплообменных аппаратов. Дис. ... магистр. 2019. С. 75.

Авторы публикации

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет. E-mail: haybullina.87@mail.ru.

Зиннатуллин Назиф Хатмулович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Ильин Владимир Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), проректор по непрерывному образованию, Казанский государственный энергетический университет. E-mail: ilyinvk@mail.ru.

References

1. Khaibullina AI. *Improving the efficiency of heat exchangers by imposing on the flow in the annular space of low-frequency pulsations*. dissertation. Kazan State Power Engineering University, Kazan. 2017. P. 229.

2. Zohir AE. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows. *New York Science Journal*. 2011;4(6):61-71.

3. Zohir AE, Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. *Journal. Am. Sci*. 2012;8:241-250.

4. Guoneng Li, Youqu Zheng, Guilin Hu, et al. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in Laminar Pulsating Cross-flows. *Heat Transfer Engineering*. 2016;37(6):535-544.

5. Li G, Zheng Y, Xu Y, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement from a heated circular cylinder with constant heat input power in turbulent pulsating crossflows. *Heat and Mass Transfer*. 2014;50(6):1417-1427.

6. Molochnikov VM, Mikheev NI, Mikheev AN, et al. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2017;24(4):569-575.

7. Mikheev NI, Molochnikov VM, Mikheev AN, et al. Hydrodynamics and heat transfer of pulsating flow around a cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;109:254-265.

8. Wang X, Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005;47:3957-3970.

9. Bhalla N, Dhiman AK. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017;39(8):3019-3037.

10. Srivastava A, Dhiman A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder. *The European Physical Journal Plus*. 2019;34(4):1-17.

11. Martin E, Velazquez A.& Valeije A. (2018) Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2018;74(12):1747-1769.
12. Velazquez A, Arias JR, Mendez B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51:2075-2089.
13. Molochnikov VM, Mikheev AN, Goltsman A.E., et al. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. pp. 012-024.
14. Haibullina AI, Hayrullin AR, Sinyavin AA, et al. Issledovaniye teplootdachi v koridornom puchke trub pri nalozhenii na potok protivotochnykh nesimmetrichnykh nizkochastotnykh pul'satsiy. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologi*. 2013;12(1)312-315.
15. Ilyin VK, Sabitov LS, Haibullina AI, et al. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016"*. 2017;240(1):1-10.
16. Bode K. Hooper R. J., Paterson W. R., Wilson D. I., et al. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling. *Heat Transfer Engineering*. 2007;28(30):202-209.
17. Scholer M, Fuchs T, Augustin W, et al. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures. *Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. 2009. pp. 455-463.
18. Augustina W, Fuchs T, Föste H, et al. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. *Food and Bioproducts Processing*. 2010;8:384-391.
19. Haibullina AI, Sabitov LS, Hayrullin AR, et al. Energy efficiency of pulsating flows at heat-transfer enhancement in a shell-and-tube water oil cooler. *OP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;412:1-6.
20. Lipagina AD. *The use of pulsations for cleaning heat exchangers: master.[dissertation]* 2019. P.75.

Authors of the publication

Aigul I. Haibullina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nazif X. Zinnatullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Vladimir K. Ilyin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

19 ноября 2019г.



НОРМИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФИДЕРА С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

А.И. Федотов¹, Л.В. Ахметвалеева¹, Р.Ш. Басыров², Г.В. Вагапов¹,
Е.А. Федотов¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

Резюме: Цель работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании процессов при однофазных замыканиях на землю в электрических распределительных сетях 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Используется метод математического нормирования, применяемый при анализе спектрального состава токов и напряжений с целью повышения информативности выделяемых высших гармонических составляющих тока и напряжения. В статье приведено сопоставление результатов спектрального анализа с учетом и без учета математического нормирования, полученных на имитационной модели. Натурные эксперименты продемонстрировали эффективность использования метода математического нормирования высших гармонических составляющих тока и напряжения при различных видах однофазных замыканий на землю. Результаты натурных экспериментов предоставили возможность улучшения методики раннего выявления однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-10-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Выводом исследования является возможность существенно более точного выделения резонансных частот спектра токов и напряжений, получаемых с использование метода математического нормирования. Одновременно продемонстрирована возможность более ранней и уточненной локализации фидера с замыканием на землю на основе более точного выделения резонансных частот токов и напряжений.

Ключевые слова: высшие гармонические составляющие тока и напряжения, однофазные замыкания на землю.

Для цитирования: Федотов АИ., Ахметвалеева ЛВ., Басыров РШ., Вагапов ГВ., Федотов ЕА. Нормирование амплитуды высших гармоник при определении фидера с однофазным замыканием на землю // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 58-68. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надежности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, № FZSW-2020-0007).

RATING OF AMPLITUDES OF HIGH HARMONICS IN DETERMINING FEEDER WITH SINGLE-PHASE GROUND FAULT

¹AI Fedotov, ¹LV Akhmetvaleeva, ²RS Basyrov, ¹GV Vagapov, ¹EA Fedotov

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

Abstract: The aim of the paper is theoretical and experimental research of processes during the single-phase ground faults in electrical distribution grids of 10/06/35 kV with isolated neutral mode. The mathematical method of rationing is used for the analysis of the spectral composition of currents and voltages increasing the information content of the allocated higher harmonics of

current and voltage. The paper show a comparison of the results of spectral analysis with and without taking into account the mathematical rationing obtained on the simulation model. Field experiments have demonstrated the effectiveness of using of the method of mathematical rationing of the higher harmonic components of current and voltage for various types of single-phase ground faults. The results of field experiments provided an opportunity of improving the methodology of yearling detection of single-phase ground faults in electric grids of 6-10-35 kV with an isolated mode of neutral. The conclusion of the research is the possibility of a significantly more accurate selection of the resonant frequencies of the spectrum of currents and voltages obtained by using of the method of mathematical rationing. The possibility of earlier and more precise localization of the feeder with ground fault is shown on the base more precise selection of the resonant frequency currents and voltages.

Keywords: higher harmonics of current and voltage, single-phase ground fault.

For citation: Fedotov AI , Akhmetvaleeva LV, Basyrov RS, Vagapov GV, Fedotov EA. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(1):58-68. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68.

Введение

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются достаточно часто возникающим видом повреждений в воздушных распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 6-35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. По различным оценкам ОЗЗ составляют 60-80 % от общего числа повреждений [1]. Не смотря на значительное число публикаций по тематике проблемы обнаружения мест ОЗЗ, часть из которых представлена в [2-5], на сегодняшний день не существует общепринятого технического решения [6, 7, 8]. Как следствие, рассматриваемая проблема не теряет своей актуальности [9,10]. Одновременно, различные производители релейной защиты и автоматики закладывают те или иные варианты реализации технических решений [11, 12, 13] исходя из существенного экономического эффекта. В работах [14,15] предложено развитие методики диагностирования ОЗЗ на ранних стадиях его проявления на основе анализа высших гармоник (ВГ) тока и напряжения для РЭС, выполненных воздушными линиями (ВЛ) электропередачи. Для определения места несимметрии на ВЛ в общем спектре выделяется так называемая «резонансная» гармоника, значение частоты которой связано с расстоянием до места повреждения [13]. В перечисленных публикациях априори принято, что амплитуда «резонансной» гармоники, которая и служит её маркером, всегда выше амплитуды соседних ВГ. Проведенные исследования на имитационных моделях показали, что наличие сопротивления в месте замыкания на землю плюс характер замыкания в виде перемежающейся дуги могут замаскировать «резонансную» гармонику. В настоящей работе предлагается методика её распознавания.

Теоретические основы методики исследования

Методика раннего диагностирования ОЗЗ основывается на анализе спектра фазных токов и напряжений. Одной из наиболее важных задач при обработке спектра фазных токов и напряжений является подход на основе разложения сигналов в ряд Фурье. Для повышения универсальности и уменьшения размерности задачи использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ). Данный процесс достаточно подробно раскрывался в публикациях [3]. Однако при его реализации возникали определенные особенности с интерпретацией результатов БПФ в виде не четко выраженного максимума ВГ. В этой связи необходимо проводить предварительную нормировку ВГ фазных токов и напряжения нулевой последовательности, измеряемого на шинах центра питания, по гармоникам фазного напряжения той фазы, где произошло замыкание на землю. В идеале необходимо было бы использовать фазное напряжение именно в месте замыкания ВЛ на землю. Однако доступным для измерения является только напряжение на шинах центра питания. В силу незначительной величины токов ОЗЗ в воздушных электрических сетях 6-10 кВ предложено для нормирования использовать фазное напряжение в центре питания.

Существует достаточное количество разнообразных математических подходов к решению проблемы нормирования. Достаточно часто для решения задач используется формула Байеса. Но, например, в [16] показано, что возможно использование более простой формулы для решения выше обозначенной проблемы

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i}{\max X}, \quad (1)$$

где $X=\{x_1, x_2, \dots, x_x\}$ значения входных амплитуд ВГ токов и напряжений, а \tilde{x}_i нормированное значение. Одним из значимых ограничений нормирования по формуле (1) выступает интервал нормирования $[1, \min X / \max X]$. Применительно к рассматриваемой задаче нормирование выполнимо исходя из требований к интервалу нормирования.

Для теоретического анализа адекватности применения метода математического нормирования было использовано имитационное моделирование на программно-аппаратном комплексе *RTDS*. Однолинейная схема модели РЭС представлена на рис.1, где было принято, что ВЛ выполнены проводами марки АС-120, трансформаторы имеют одинаковую номинальную мощность 400 кВА и загружены на 70%, длины линий: $L_{11}=L_{22}=L_2=L_3=L_4=L_5=16$ км. Моделирование ОЗЗ на основе коммутации ключа *K* осуществлялось на фазе «А» (одна коммутация на полупериоде промышленной частоты, угол задержки замыкания ключа по отношению к нулевому значению фазного напряжения принят 30° . Переходное активное сопротивление в месте замыкания составило 100 Ом. В процессе моделирования не использовалась схема натурального эксперимента вследствие наличия ограничения у программно-аппаратного комплекса *RTDS* по количеству точек моделирования.

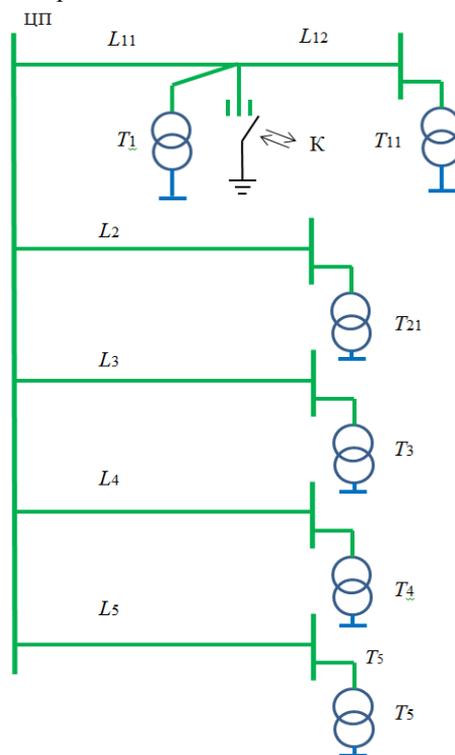


Рис. 1. Схема РЭС модельного эксперимента:

ЦП – центр питания; *L* – воздушная линия электропередачи; *T* – потребительская трансформаторная подстанция; *K* – коммутационный ключ для моделирования ОЗЗ.

Фазные осциллограммы напряжений представлены на рис.2, где обозначение шин измерения на модели *N4* соответствует фазе «а» шин ЦП, *N5* – фазе «b», *N6* – фазе «с». Результаты БПФ после цифрового подавления первой гармоники для тока фазы «А» представлены на рис. 3, где размерность токов по оси ординат – килоамперы. Они дают основание считать, что в сигнале проявляются две «резонансные» гармоники. Далее к полученному спектру было применено согласно (1) нормирование по высшим гармоникам напряжения фазы «а», рис. 2. Для этого на основе БПФ был получен спектральный состав и получены следующие коэффициенты нормирования:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_3 = 1,24; \tilde{x}_5 = 0,98; \tilde{x}_7 = 0,68; \tilde{x}_9 = 0,52; \tilde{x}_{11} = 0,37; \tilde{x}_{13} = 0,27; \tilde{x}_{15} = 0,21; \\ \tilde{x}_{17} = 0,20; \tilde{x}_{19} = 0,20; \tilde{x}_{21} = 0,19. \end{aligned} \quad (2)$$

На рис. 4 представлена сомещенная спектрограмма токов, где нормализованные гармоники масштабированы до значения максимальной гармоники 1,5 А.

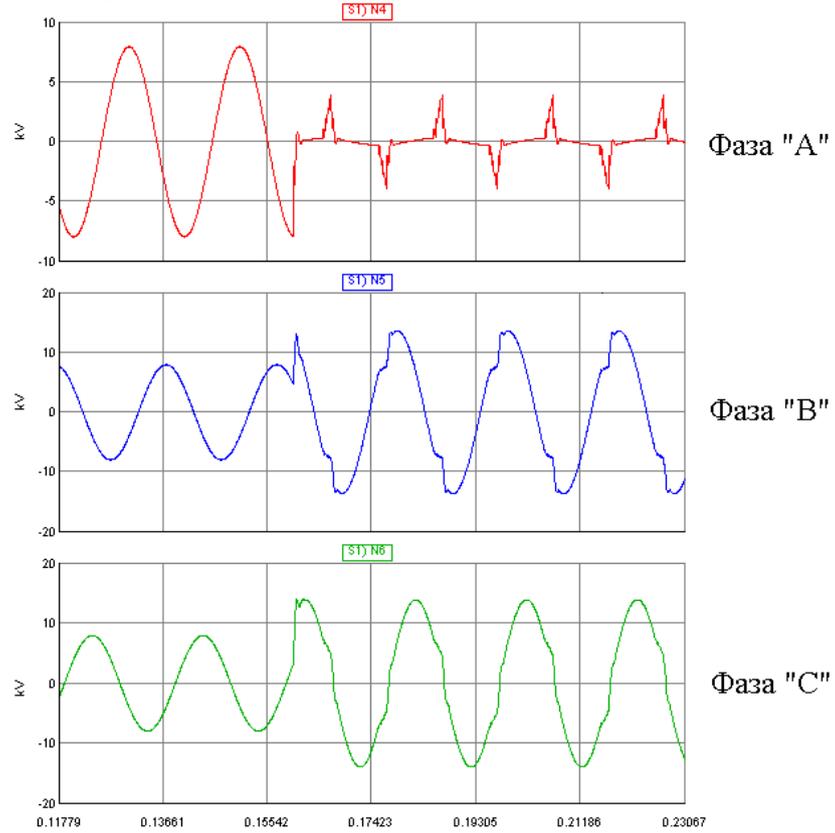


Рис. 2. Фазные напряжения на шинах ЦП

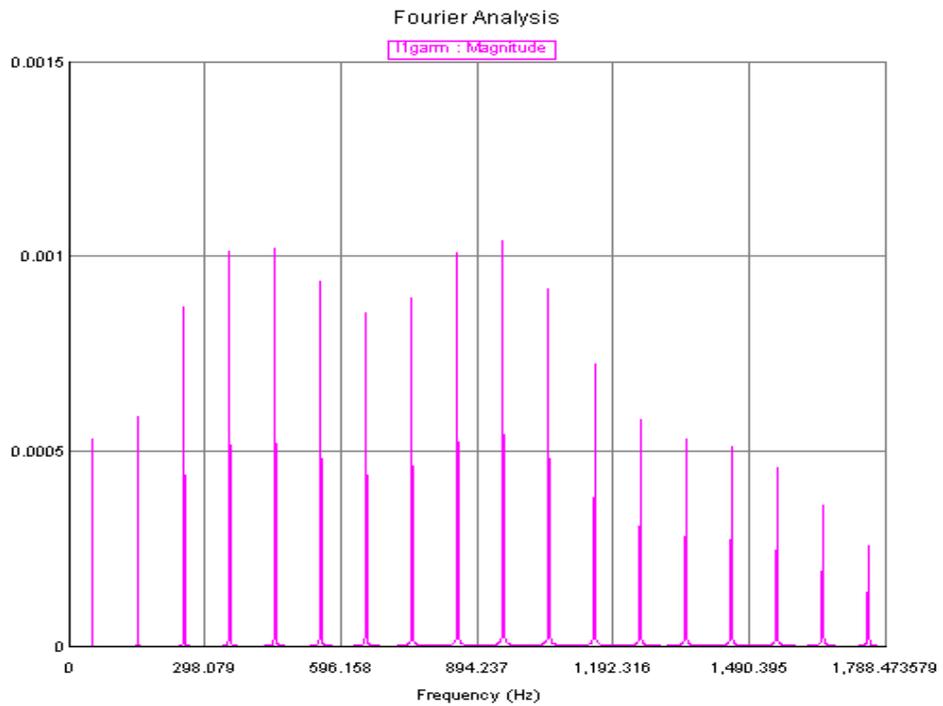


Рис. 3. Спектрограмма фазного тока линии

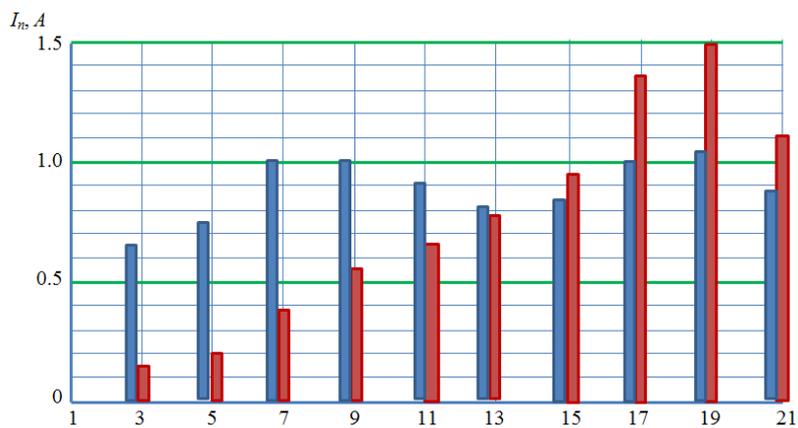


Рис. 4. Диаграмма спектрального состава ВГ тока фазы «А» на входе линии L11.

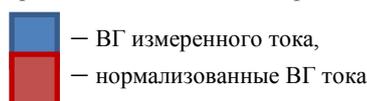


Рис. 4 демонстрирует, что, нормирование позволяет более четко идентифицировать «резонансную» ВГ: по исходному ненормированному спектру можно заключить, что первой «резонансной» является либо 7-я, либо 9-я ВГ. После нормирования ВГ хорошо видно, что первой «резонансной» является 19-я гармоника, что подтверждается и частотной характеристикой рассматриваемой сети, рис. 3, получаемой при подключении однофазного источника ВГ вместо короткозамыкателя к линии L11.

Методика проведения натурального эксперимента

Для практической апробации выше изложенных теоретических основ была проведена серия натуральных экспериментов в действующих РЭС напряжением 10 кВ. Схема натурального эксперимента представлена на рис. 5. Натурное моделирование различных видов замыканий предусмотрено на фидерной отпайке, обозначенной цифрой 2. Цифрой 1 обозначены места подключения измерительных приборов. Одновременно, подключение измерительных приборов осуществлялось на потребительских подстанциях со стороны 0,4 кВ для проведения вторичного контроля измеряемых параметров тока и напряжения.

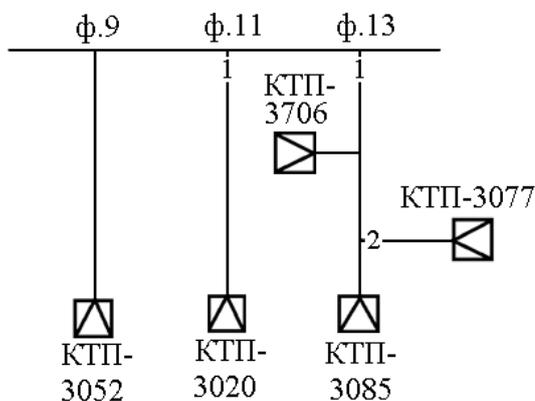


Рис. 5. Схема натурального эксперимента:

1 – место подключения измерительных приборов; 2 – место установки разрядника

Рис. 6 иллюстрирует экспериментальную установку моделирования перемежающего дугового ОЗЗ, установленную на опоре ВЛ и подключенную, с одной стороны, к фазному проводу, с другой – к заземлителю.

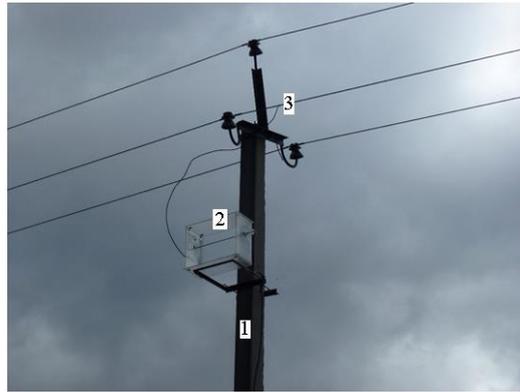
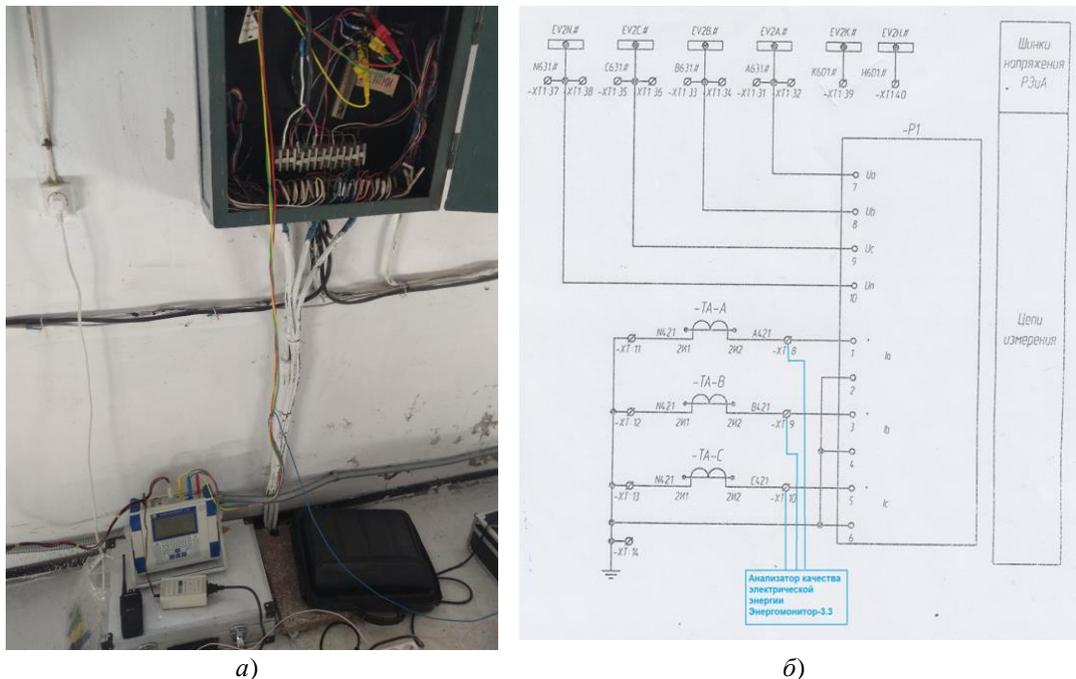


Рис. 6. Иллюстрация натурального эксперимента ОЗЗ через разрядник на опоре ВЛ: 1 – опора ВЛ; 2 – разрядник; 3 – место подключения разрядника к фазному проводу

В качестве фиксирующих измерительных устройств использовались поверенные анализаторы качества электрической энергии «Энергомонитор 3.3». Рис. 7 иллюстрирует подключение измерительных приборов и схему подключения.



а) б)
Рис. 7. Визуализация подключения измерительного прибора
а) – общий вид подключения измерительного прибора;
б) – схема подключения измерительного прибора в начале фидера

Основные результаты натурального эксперимента

Обработка результатов экспериментов осуществлялась в программном продукте *Matlab* на основе разработанного программного кода. На рис.8 приведены в качестве примера осциллограммы напряжение фаз «А», «В» и «С» на фидере с повреждением. Поврежденная фаза «С» имеет ярко выраженный характер.

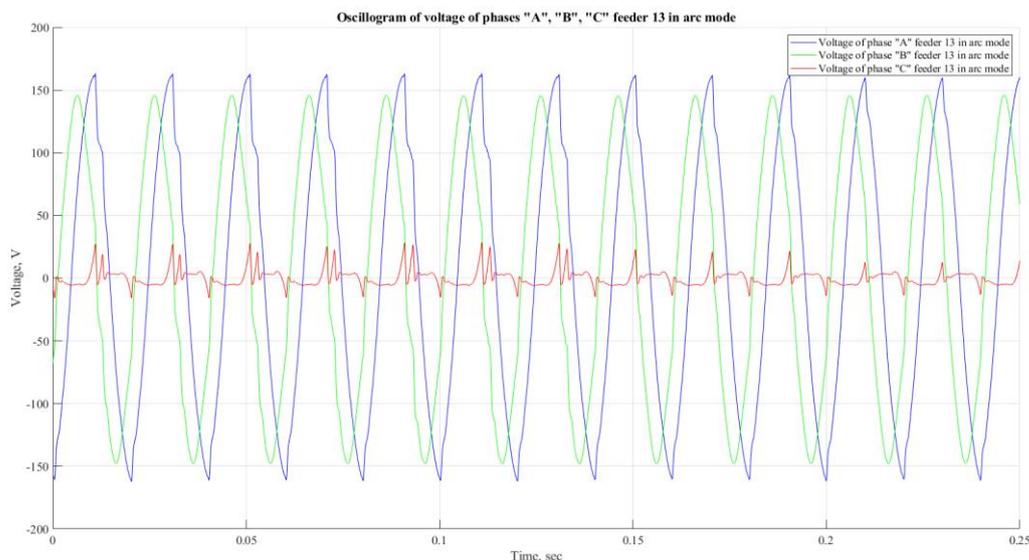


Рис. 8. Осциллограмма напряжение фаз *A*, *B* и *C* на фидере с ОЗЗ в режиме дугового замыкания

Применение БПФ предоставляет возможность определения фазы с повреждением, в том числе и на начальном этапе зарождения ОЗЗ. На рис. 9 представлен результаты БПФ анализа утроенного тока нулевой последовательности ($3I_0$) нормального и аварийного режимов. Окно выборки соответствует рис. 8, из чего следует, что представленный на рис. 9 спектр является усредненным: на рассматриваемом интервале наблюдения имеет место изменение характера дугового замыкания (меняется форма кривой напряжения фазы «С», рис. 8).

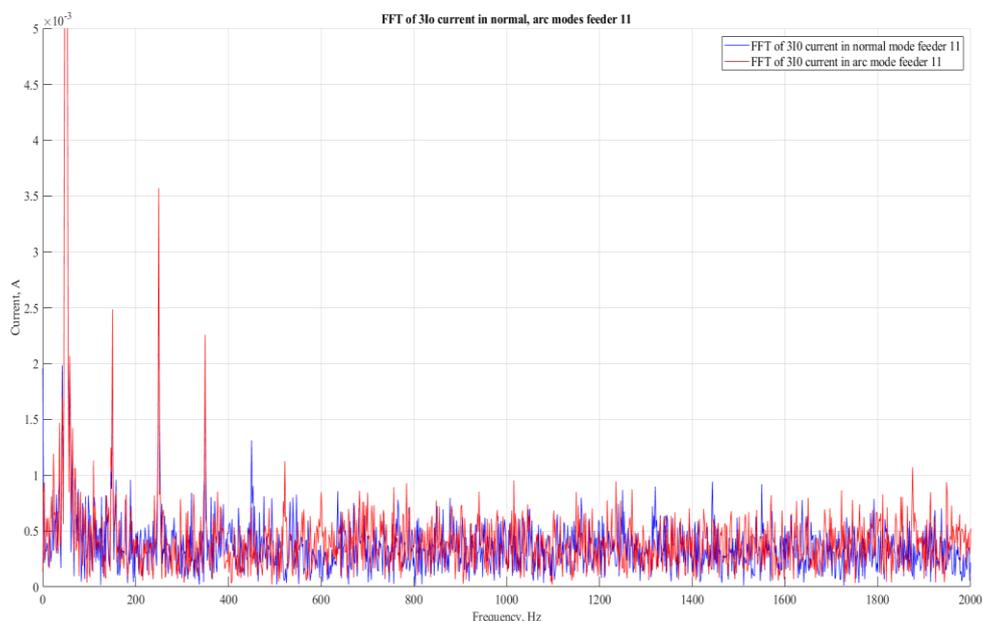


Рис. 9. БПФ-анализ тока $3I_0$ в нормальном режиме и в режиме дугового ОЗЗ

Для однозначного выделения резонансных ВГ из всего спектра был использован метод математического нормирования. В качестве нормирующего значения была принята 3 гармоника.

БПФ тока $3I_0$ иллюстрирует рис. 10 до и после математического нормирования. По оси абсцисс обозначены порядковые номера ВГ, кратные 50 Гц. Наличие четных гармоник объясняется неодинаковым характером ОЗЗ для положительного и отрицательного полупериодов напряжения, рис. 8.

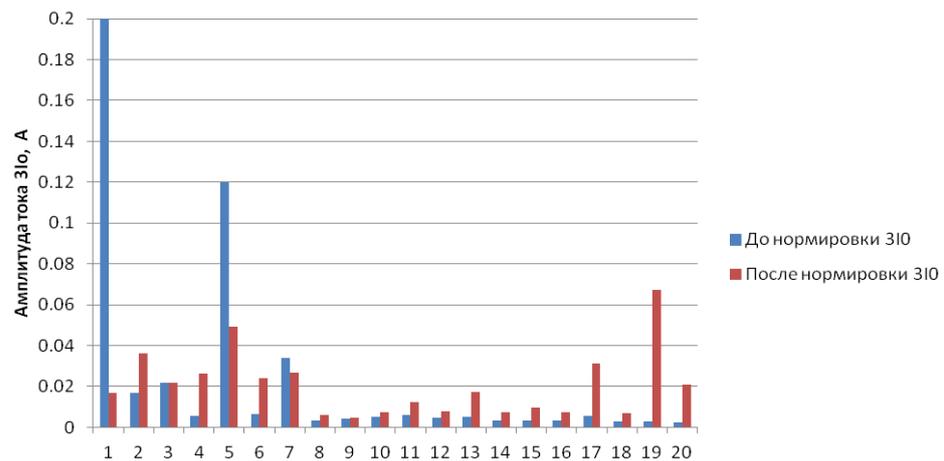


Рис. 10. Диаграмма спектрального состава ВГ тока $3I_0$

Амплитуды ВГ тока в области второй «резонансной» гармоники второй группы после применения метода математического нормирования имеют более ярко выраженный характер, что позволяет производить их существенно более точную идентификацию места ОЗЗ [4, 7, 9].

Обсуждение результатов

Для надежного выделения именно резонансной гармоники необходимо производить нормирование высших гармоник. Оно заключается в приведении имеющего место состава высших гармоник к теоретическим условиям построения частотных характеристик, когда напряжение тестового сигнала не изменяется при изменении его частоты.

В конкретном случае (рис. 10) нормирование не оказывает существенного влияния на амплитуды канонических нечетных ВГ в начальной части спектра, где находится первая «резонансная» гармоника (5-я высшая гармоника). Вторая «резонансная» гармоника (11-я высшая гармоника) может быть выделена только по результатам нормирования.

Частотные характеристики РЭС зависят от места подключения тестового сигнала. В связи с этим первоначально необходимо установить поврежденный фидер. Методика его идентификации заключается в сравнении уровня высших гармоник в одноименных фазах воздушных линий, измеряемых на трансформаторах тока, установленных в распределительном устройстве центра питания. Максимальный их уровень соответствует поврежденному фидеру. Наличие в начальной части спектра в аварийном режиме неканонических четных ВГ иллюстрирует (рис. 10). После их нормирования они существенно увеличились. Тем самым получаем дополнительный индикатор появления в сети ОЗЗ и маркер поврежденного фидера.

Выполненные имитационные расчеты показали, что при определенных соотношениях параметров электрической сети и величины переходного сопротивления может быть смещение на одну нечетную гармонику резонанса в сравнении с идеальным замыканием на землю.

Заключение

Использование частотных характеристик РЭС, получаемых для режимов однофазной поперечной несимметрии, позволяет сопоставить их резонансы с расстоянием до места однофазного замыкания на землю. Резонансные частоты определяются по спектрам токов отходящих от ЦП воздушных линий и спектрам напряжений на шинах ЦП. Наличие переходного активного сопротивления в месте контакта провода с землей оказывает негативное влияние на распознавание искомой резонансной частоты, поскольку увеличение сопротивления приводит к «уплощению» максимумов амплитудно-частотных характеристик.

Для повышения чувствительности и достоверного выделения резонансных ВГ необходимо использовать методику их нормализации, т.е. осуществлять их перерасчет для классической ЧХ, когда тестовый источник переменной частоты имеет одинаковую амплитуду сигнала на любой частоте. Для этого предлагается использовать форму фазного напряжения на шинах центра питания и по ней восстанавливать форму напряжения в месте замыкания на землю. В работе рассмотрен вариант нормировки ВГ тока при условии относительно малой величины переходного сопротивления. Получены соответствующие коэффициенты для перерасчета ВГ тока.

Полученные на имитационной модели осциллограммы ОЗЗ через активное сопротивление порядка 100 Ом и более показали необходимость учета влияния остаточного

емкостного напряжения на линии при погасании дуги, что потребует использования более сложного алгоритма для расчета коэффициентов нормирования высших гармоник.

Проведенные натурные эксперименты продемонстрировали возможность использования ВГ тока и напряжения, как для определения поврежденного фидера, так и для определения фазы с повреждением. Применение метода математического нормирования позволяет более точно выделять резонансные гармоники тока и напряжения и всего спектра частот, что свою очередь повышает точность метода определения ОЗЗ и позволяет существенно поднять чувствительность, что в свою очередь положительно сказывается на экономической эффективности функционирования электрических сетей вследствие снижения времени поиска ОЗЗ и недоотпуска электроэнергии конечному потребителю.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта темы научного исследования «Методы повышения надежности систем электроснабжения и качества электроэнергии на основе электрохимических накопителей и цифрового мониторинга состояния распределительных электрических сетей» (мнемокод 0672-2020-0007, № FZSW-2020-0007).

Литература

1. Манилов А., Барна А. Способ обеспечения чувствительности защит. ОЗЗ в сетях 6–10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали. Новости электротехники 2012. №6 (78).
2. Fedotov A., Fedotov E., Chernova N., et al. Sensors and methods for the diagnosis of higher harmonics in overhead power lines // *Elektroenergetika* 2015. September 16-18, 2015, Stará Lesná, Slovakia. 2015. pp. 50-52.
3. Fedotov A., Abdullazyanov E., Grazkova L., et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, 2016. Latvia Riga Technical University. 2016. pp. 214-219.
4. Fedotov A., Vagapov G., Chernova N. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6-10 - 35 kV level voltage // *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering Elektroenergetika 2017* September 12-14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic. Technical University of Košice. pp. 384-388.
5. Fedotov A., Vagapov G., Basirov R., Abdullin L., Grackova L. Single-Phase Ground Fault Test of Overhead Power Lines in Ungrounded Power Grids of 6-10 kV / 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (Riga, 12-14 November, 2018). Riga. 2018. pp. 1-5.
6. Fedotov A., Vagapov G., Abdullin L. Identificacin of feeder with single-phase ground fault / 2019 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, Russian Federation. 25-29 March 2019. pp. 1-5.
7. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Чернова Н.В. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи напряжением 6-35 кВ на «резонансных» частотах при ОЗЗ // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. №5-6. С.69-78.
8. Федотов А.И., Макаров В.Г., Вагапов Г.В., и др. Спектральный состав токов и напряжений воздушной распределительной электрической сети с изолированной нейтралью при однофазных замыканиях на землю и его использование для определения мест повреждения // *Известия вузов. Электромеханика*. 2019. № 2. С. 72-84.
9. Абдуллин Л.И. Раннее выявление замыканий на землю по параметрам напряжения на приемных подстанциях // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013. №11-12. С. 133-136.
10. Вагапов Г.В., Амосов А.М., Чернова Н.В., и др. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // *Известия вузов. Электромеханика*. 2014. №4. С. 89-92.
11. Хакимзянов Э. Ф., Мустафин Р. Г., Федотов А.И., и др. Выявление режима однофазного замыкания на землю на основе измерения сопротивления петли замыкания // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2014. № 11-12. С. 107-113.
12. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И., и др. Алгоритмы локации сигналов тока и напряжения при однофазных замыканиях на землю в распределительных воздушных сетях // *Электротехника*. 2015. № 2. С. 41-44.
13. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллин Л.И. Закономерности изменения «резонансных» частот электропередачи в условиях однофазной поперечной несимметрии // 8 Междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов»: сб. мат. докл. Благовещенск, 2015. С. 24-30.

14. Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л., Новиков С.И., и др. Исследование скорости распространения сигналов переходных процессов по воздушным линиям электропередачи // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. № 3. С. 24-31.

15. Новиков С.И., Кузьмин И.Л., Хузяшев Р.Г. Простейшие алгоритмы обнаружения сигналов переходного процесса в линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 7-8. С. 114-125.

16. Долгов А.И., Маршаков Д.В. О применимости математического масштабирования и нормирования // Вестник Донского государственного технического университета. 2018. Т. 18. № 1. С. 92-101.

17. Abdul Barik Md.; Ameen Gargoom ; Apel Mahmud Md. A Decentralized Fault Detection Technique for Detecting Single Phase to Ground Faults in Power Distribution Systems With Resonant Grounding. IEEE Transactions on Power Deliver. 2018.V. 33, Is.: 5.

18. Krasnykh A.A., Krivoshein IL., Kozlov AL. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

19. Peng Ji., Yujie Pei., Shihui Zhao. et al. A Novel Location Method for Single-phase Grounding Fault for Distribution Network Based on Transient Technique. 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) doi: 10.1109/CCDC.2018.8408033.

Авторы публикации

Федотов Александр Иванович – д-р. техн. наук, проф., в.н.с. отдела НИОКР Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Ахметвалеева Ляля Вахитовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника, Казанский государственный энергетический университет.

Басыров Рафик Шайхолович – доц. кафедры «Техническая физика», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ.

Вагапов Георгий Валериянович – канд. техн. наук, доцент, с.н.с. отдела НИОКР Инжиниринговый центр, Казанский государственный энергетический университет.

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Manilov A, Barna A. OZZ in grids of 6-10 kV with combined neutral grounding. The way to ensure of the sensitivity of the defenses. *Electrical News*. 2012;6 (78) .

2. Fedotov A, Fedotov E, Chernova N, et al. Sensors and methods for the diagnosis of higher harmonics in overhead power lines. *Elektroenergetika* 2015. September 16-18, 2015, Stará Lesná, Slovakia. 2015. pp. 50-52.

3. Fedotov A, Abdullazyanov E, Grazkova L, et al. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance. *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, 2016. Latvia Riga Technical University*. 2016. pp. 214-219.

4. Fedotov A, Vagapov G, N. Chernova. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6 - 10 - 35 kV level voltage // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2017 September 12-14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic. Technical University of Košice. 2017.pp. 384-388.

5. Fedotov A, Vagapov G, Basirov R, et al. Single-Phase Ground Fault Test of Overhead Power Lines in Ungrounded Power Grids of 6-10 kV / 2018. *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University* (Riga, 12-14 November, 2018). Riga, 2018. pp. 1-5. doi:10.1109/RTUCON.2018.8659833.

6. Fedotov A, Vagapov G, Abdullin L. Identificacin of feeder with single-phase ground fault / 2019 International Conference on Industrial Engineering Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. Sochi, Russian Federation, 25-29 Marc 2019. pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742969.

7. Fedotov AI, Vagapov GV, Chernova NV. Distribution of currents and voltages along the overhead power lines with a voltage of 6 - 35 kV at “resonant” frequencies in case of SPG. *University News. Energy issues*. 2017;5-6:69-78.

8. Fedotov AI, Makarov VG, Vagapov GV, et al. Spectral composition of currents and voltages of an air distribution electric grid with isolated neutral in case of single-phase earth faults and its using for

determining the places of fault. *University News. Electromechanics*. 2019;2:72-84.

9. Abdullin LI. Early detection of earth faults by voltage parameters at receiving substations. *University News. Energy Issues*. 2013;11-12:133-136.

10. Vagapov GV, Amosov AM, Chernova NV, et al. Experimental research of display higher voltage harmonics on the side 0.4 kV substations the consumer as a method for early diagnosis of single phase ground faults in grids with isolated neutral. *University News. Electromechanics*. 2014;4:89-92.

11. Khakimzyanov EF, Mustafin RG, Fedotov AI, et al. Identification of the single-phase ground fault mode based on measuring the loop resistance. *University News. Energy issues*. 2014;11-12:107-113.

12. Khuzyashev RG, Kuzmin IL, Novikov SI, et al. Algorithms for locating current and voltage signals with single-phase earth faults in air distribution networks. *Electrical Engineering*. 2015;2:41-44.

13. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullin LI. Laws of change "resonant" frequency of transmission under single-phase transverse asymmetry. *8 Int. scientific and technical conf. "Energy: management, quality and efficiency of energy use": Sat. mat. doc. Blagoveshchensk*, 2015. pp. 24-30.

14. Khuzyashev RG, Kuzmin IL, Novikov SI, et al. The study of the propagation speed of transient signals overhead power lines. *Electrical and information systems and systems*. 2017;3:24-31.

15. Novikov SI, Kuzmin IL, Khuzyashev RG. Simple Transient Signal Detection Algorithms in Power Lines. *University News. Energy issues*. 2017;7-8:114-125.

16. Dolgov AI, Marshakov DV. On applicability of mathematical scaling and normalization in applied problem solving. *Vestnik of DSTU*, 2018,18(1):92-101.

17. Abdul Barik Md, Ameen Gargoom, Apel Mahmud Md. A Decentralized Fault Detection Technique for Detecting Single Phase to Ground Faults in Power Distribution Systems With Resonant Grounding. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2018;33:Is.: 5.

18. Krasnykh AA, Krivoshein IL, Kozlov AL. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911013.

19. Peng Ji, Yujie Pei, Shihui Zhao, et al. Novel Location Method for Single-phase Grounding Fault for Distribution Network Based on Transient Technique. 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC) doi: 10.1109/CCDC.2018.8408033.

Authors of the publication

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Lyalya V. Akhmetvaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rafik S. Basyrov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia.

Georgii V. Vagapov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgeniy A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

20 ноября 2019 г.



THE METHODOLOGY FOR DESIGN OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM OF OIL PRODUCING COMPANY OPTIMIZED ON LENGTH AND NUMBER OF GENERATION CENTERS

AG Gorodnov¹, VYu Kornilov², Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali³

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

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Rumaila Operating Organization, Basra, Iraq
gorodnov_kai@mail.ru

Abstract: Improving energy efficiency and reducing the cost of creating an electrical complex of autonomous power supply for an oil-producing enterprise is an urgent problem and requires a rational solution. The goal is the construction of energy-efficient electrical systems of autonomous power supply for oil-producing enterprises, leading to a reduction in the unit cost of electricity per unit of production. A methodology for constructing an autonomous power supply system for an oil producing enterprise, optimized in length and number of generation centers is present. The results presented in the work were obtained using methods of the theory of electric and magnetic circuits, theory of electric drive, methods of optimization of power supply systems, methods of mathematical and computer modeling. The configuration of the power supply system of oil producing enterprises and the efficiency of its work is analyzed. To test the efficiency of the methodology, the power supply system of an oil producing enterprise is simulated in the RTDS software package. The results of the work were introduced and used in the creation of energy-efficient electrical systems for autonomous power supply to oil-producing enterprises based on autonomous diesel generators and optimized by the length of power lines and the number of generation centers. Implementation of the results of the work allows reducing the specific energy consumption per unit of extracted products and reducing the cost of building an energy-efficient electrical complex of autonomous power supply for oil-producing enterprises.

Keywords: autonomous power supply system; oil producing enterprise; methodology; electric centrifugal pumps; optimization.

For citation: Gorodnov AG, Kornilov VYu, Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali. The methodology for design of autonomous power supply system of oil producing company optimized on length and number of generation centers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):69-76. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-69-76.

Introduction

Mechanized oil production in the world is carried out in various ways. In Russia, 54% of operating oil wells are equipped with electric centrifugal pumps, 41% use sucker rod pumps [1]. These pumps, as a rule, are equipped with three-phase asynchronous electric motors, but recently there has been a tendency to install synchronous electric motors [2-4]. The power of motors mounted on sucker rod pumps is lower than that of centrifugal pumps [5-7]. This is due to the fact that the performance of centrifugal pumps is higher.

There are several options for equipment for oil wells [8-10]:

1. One well – one powerful submersible centrifugal pump, on which a powerful electric motor is installed. This engine is powered by its own single-transformer substation 10 (6) / 0,4kV.

2. Several wells at one site with sucker-rod pumps with medium power engines. The motors are powered by their own one-two-transformer substation. 10 (6) / 0,4kV.

3. Several wells on the same site with submersible centrifugal pumps with small average power engines. The motors are powered by a cluster transformer substation 10 (6) / 0,4kV.

Power supply of transformer substations of wells can be carried out both from a centralized power supply system and from autonomous generators. Autonomous generators are

used in cases: remoteness from the centralized power supply system (PSS), lack of power, low quality electricity of a centralized PSS [11-13]. Analysis of existing power supply systems for transformer substations in wells that are powered by a centralized power supply system showed that power is supplied through a trunk circuit. This is due to the fact that the radial power supply circuit is more expensive.

The analysis of power supply systems from autonomous generators according to the scheme of one generator – one well showed low generator load and high operating costs. This issue was considered in detail in works [14-16]. This problem led to the creation of generation centers, on which several generators are installed and from which a group of transformer substations for wells is fed.

When creating generation centers to power a group of transformer substations for wells, the following problems arise:

1. Determining the number of generation centers.
2. Determining the configuration of the power supply system of transformer substations of wells from one generation center.
3. Organization of mutual reservation between generation centers.

To solve these problems, we propose a methodology for designing an electric power supply system for an oil production complex that is optimal according to the criterion of minimum length and the number of generation centers.

Materials and methods

The main procedures for designing the power supply system of an oil production complex that are optimal according to the criterion of minimum length and number of generation centers:

1. Formation of the source data system: coordinates, power and utilization factors of electrical equipment, parameters of electric lines.

2. Building a Steiner tree.

Let a set of nodes $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ located on one plane be given: it is required to find a tree $T = (X, U)$ with many vertices X and many edges U for which $P \in X$ the total length of the edges U is minimal. Using this method, you can enter an unlimited number of additional nodes.

Let $P = \{p_n\}, i = 1, 2, \dots, n$ be the set of conclusions of the elements of the power supply system. We construct a basic orthogonal grid passing through given conclusions (points) p_i .

The tree construction algorithm includes the following operations. We introduce auxiliary variables:

g_{ij} – the weight of the connection between the given conclusions (points, vertices) i and j , in which the features consisting in the presence of various sections, places of laying, etc. for the electrical connection are taken into account.

$$g_{ij} = \mu_0 \cdot l_{ij} \cdot C \quad (1)$$

μ_0 – raw data connection features;

C – linear cost of the power line, rub / m;

l_{ij} – the length of the electrical connection, which is according to the formula for the orthogonal metric:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$

2.1. Number clockwise, in a spiral fashion, the points (terminals of the electrical circuit) of the set $P = \{p_n\}, i = 1, 2, \dots, n$.

2.2. Determine the weight of the connections between all given points of the set $P = \{p_n\}, i = 1, 2, \dots, n$ by the formula (1).

2.3. Compose a matrix of compound weights $G = |g_{ij}|$.

2.4. Determine the minimum matrix element $G = |g_{ij}|$. With the same value of the minimum connection weights, the element with the lowest value of the output number (point) is selected. To each element of the matrix $G = |g_{ij}|$ matches two points.

2.5. Build a tree fragment connecting two points p_i and p_j a minimum matrix element G

for which $g_{ij} = \min$.

2.6. To all points of the orthogonal grid through which the fragment of the tree passed, assign the lowest of the numbers of the endpoints of the fragment.

2.7. Operations 2.2-2.6 should be performed for the remaining points until fragments for all points $p_i, i = 1, 2, \dots, n$ are constructed and until everyone receives number 1.

At the end of the solution, we obtain a single tree connecting all points of the set $P = \{p_n\}, i = 1, 2, \dots, n$ and having the least weight of the connections.

3. Locate the center of generation.

To solve the problem by the method of constructing the optimal Steiner tree with subsequent binding of the generation center to it, a special algorithm was developed:

3.1. To find the center of electrical loads, transfer the resulting wiring of electrical circuits to a two-dimensional coordinate system.

3.2. Create a table with the coordinates and power of each consumer of electric energy

3.3. According to equations (3) and (4), determine the center of electrical loads:

$$X_{CEL} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x_i \cdot P_i \cdot k_u}{P_i \cdot k_u} \quad (3)$$

$$Y_{CEL} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{y_i \cdot P_i \cdot k_u}{P_i \cdot k_u} \quad (4)$$

3.4. Locate the center of electrical energy generation. Its location will be on the edge of the obtained graph closest to the load center.

4. Checking the electrical network for long-term permissible currents. In case of a negative result, the zone is divided by $n+1$ (where n is the number of the site). Further, procedures 3, 4 must be repeated for each zone.

5. Configuration of the power supply system of the oil producing enterprise according to the options:

- Steiner tree.
- Hamiltonian cycle.

Next, determine the root mean square value of the current, the average length of overhead power lines, the average resistivity of overhead power lines throughout the power supply system.

6. Checking the electrical network for voltage losses, which should be no more than 5% in normal mode. If the voltage loss test is negative, increase the number of zones by one, then repeat procedures 2-6.

7. Determine the connection points of redundant jumpers between highways receiving power from neighboring generation centers by the method of combinatorics of distance comparison.

Results and discussions

An example of constructing a power supply system for an oil producing company that is optimal according to the criterion of minimum length and number of generation centers for the *Ratka* region of the *Rumaila* field (*Iraq*), which has 20 oil wells (*Ru-013, Ru-033 ... Ru-321*). *Rumaila (Iraq)* is one of the five largest deposits in the world. We compose a matrix of connection weights for the corresponding oil wells (fig. 1).

	Ru-033	Ru-064	Ru-083	Ru-093	...	Ru-286	Ru-300	Ru-321
Ru-033	0	113,3578	50	87,46428	...	68,00735	50	60,20797
Ru-064		0	82,76473	31,62278	...	65,76473	63,63961	74,33034
Ru-083			0	51,47815	...	71,58911	31,62278	11,18034
Ru-093				0	...	58,5235	38,07887	42,72002
...
Ru-286						0	40,31129	72,11103
Ru-300							0	32,01562
Ru-321								0

Fig. 1. Compound Weights Matrix

We determine the minimum matrix element: $Ru-083 - Ru-321 = 11.18$ connecting the conclusions of $Ru-083, Ru-321$. We build a fragment of the tree $Ru-083, Ru-321$ and assign the

number Ru-083 to all points of the fragment. Similarly, we determine the minimum weight of the remaining electrical connections and complete the corresponding fragments of the tree (fig. 2).

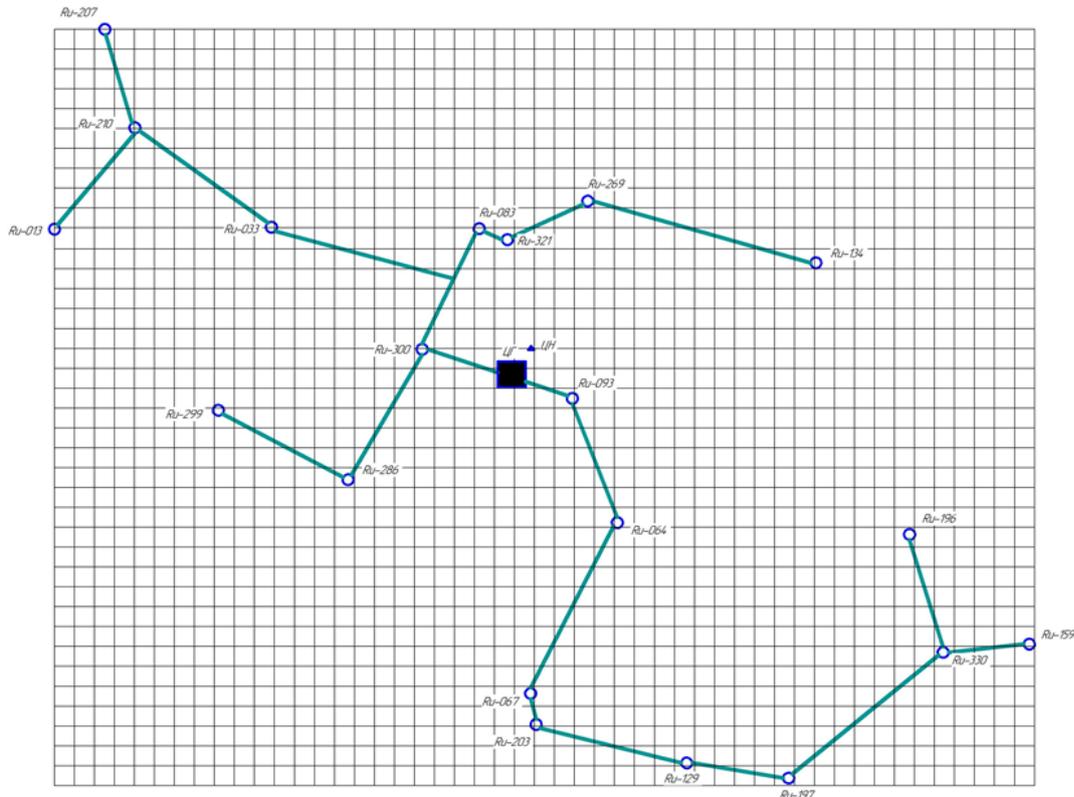


Fig. 2. The power supply system of the Ratka region of the Rumaila field (Iraq) for the Steiner tree

Next, we divide the electrical loads into uniform zones (fig. 3). Limitations under this option will be: uniform power of consumer groups, the cost of electrical equipment of substations (switches, cable lines, etc.).

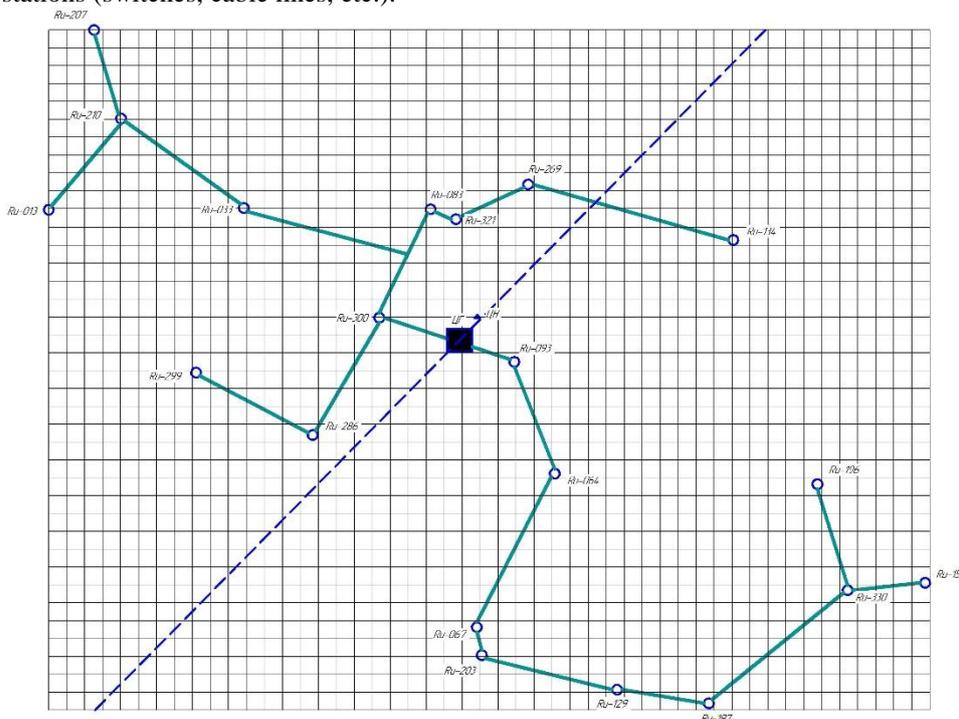


Fig. 3. Division of electrical loads into uniform zones

As a result of the division of the formed zone, two subsets are determined for which the algorithm with the Hamiltonian cycle is applicable (Fig. 4).

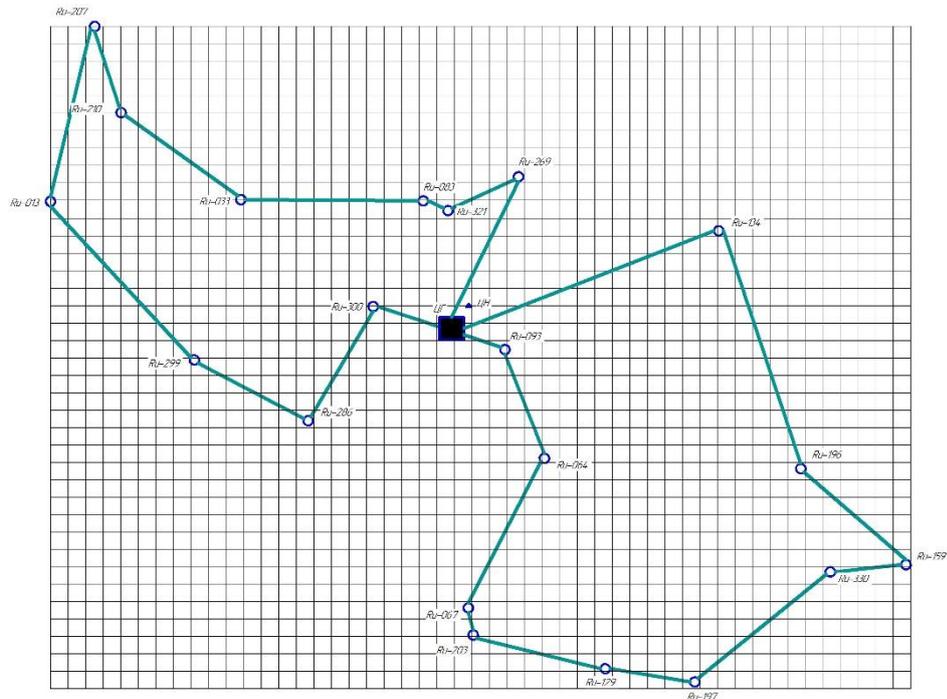
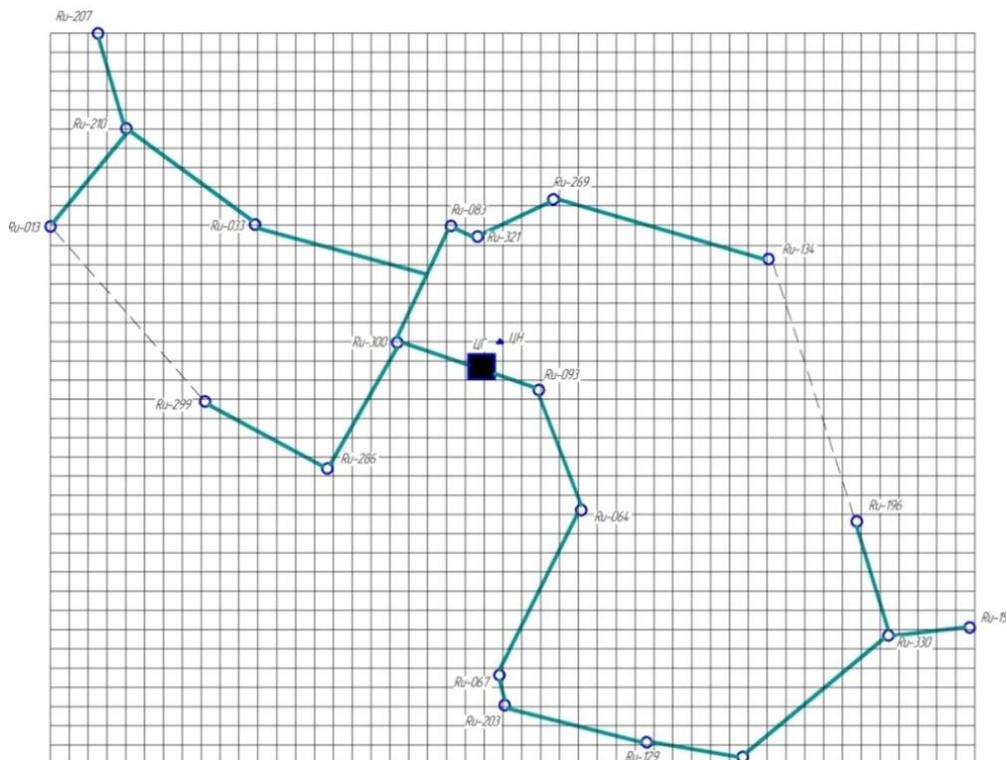


Fig. 4. The power supply system of the Ratka region of the Rumaila field (Iraq) according to the Hamilton cycle

From the obtained options for the power supply system of the Ratka region of the Rumaila field (Iraq) (fig. 2 and fig. 4), the power supply system for the Steiner tree with double-circuit overhead power lines (fig. 5) is less expensive based on the cost of the structure.



Dotted lines indicate reserve jumpers.

Fig. 5. Center for electricity generation in the Ratka region of the Rumaila field (Iraq)

To check the received power supply system of the Ratka region of the Rumaila field (Iraq) for voltage losses, we simulated the power supply of the oil producing enterprise in the RTDS software package (Fig. 6).

Overhead power lines are presented as a «PI Section Model». This module simulates

self and mutual resistances, inductances and capacitances.

The load is presented in the form of a «Dynamic Load» block with specified power parameters, with the possibility of change during the simulation.

The power source is given in the form of a «Three Phase Source» block, presented as an infinite power source.

Transformers are presented in the form of a «Power Transformers» unit with all relevant technical specifications.

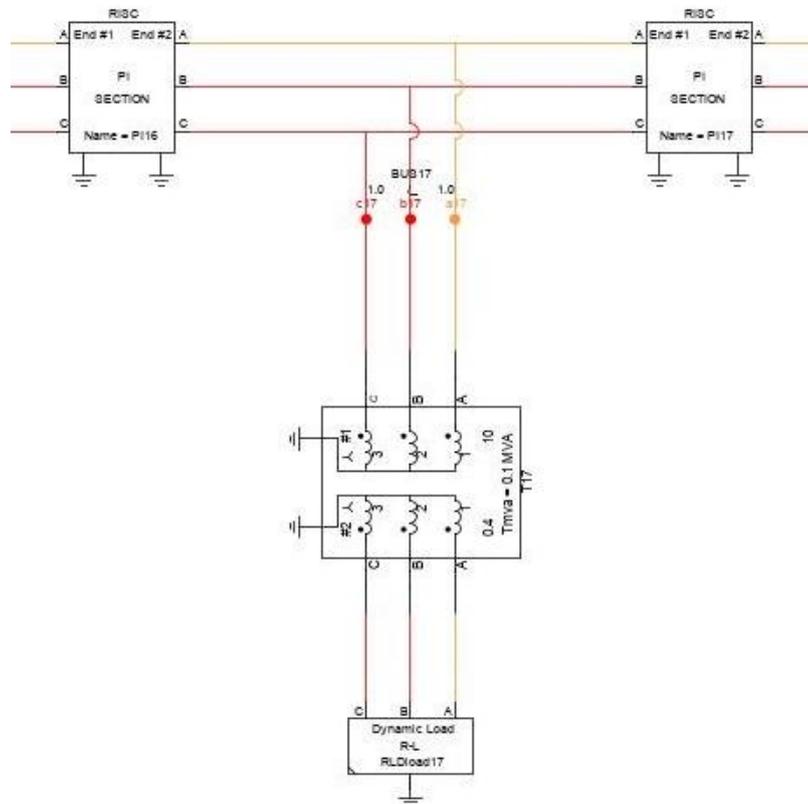


Fig. 6. Modeling of the power supply system in the RTDS software package

The simulation results of the power supply system in the RTDS software package are presented in Table 1.

Table 1.

Simulation results				
№	Oil well	$\Delta U_{sim.} \%$	$\Delta U_{calc.} \%$	$\Delta U\%$ <i>IEEE141-1993</i>
1	Ru-093	1,9	1,82	5
2	Ru-064	2,63	2,47	5
3	Ru-067	2,93	2,78	5
4	Ru-203	2,99	2,81	5
5	Ru-129	3,18	3,02	5
6	Ru-197	3,35	3,21	5
7	Ru-330	3,6	3,45	5
8	Ru-159	3,75	3,56	5
10	Ru-196	3,87	3,63	5
11	Ru-300	2,93	2,75	5
12	Ru-286	3,08	2,89	5
13	Ru-299	3,17	3,01	5
14	Ru-033	3,22	3,09	5
15	Ru-210	3,47	3,33	5
16	Ru-013	3,61	3,42	5
17	Ru-207	3,51	3,29	5
18	Ru-083	3,1	2,91	5
19	Ru-321	3,13	2,97	5
20	Ru-269	3,2	3,07	5
21	Ru-134	3,35	3,18	5

Conclusions

Modeling the power supply system of an oil company in the Ratka region obtained using the algorithm for constructing an energy-efficient power supply system showed that the voltage deviation at all points of the network does not go beyond the boundary values under normal and post-accident conditions, the largest voltage loss at the far Ru-196 well is 3,87%, which is acceptable.

The error voltage of calculation results on standard *IEEE* 141-1993 and voltage deviations simulation results of power supply system is 4%. That is, the modeling of the power supply system of the oil company reflects the high convergence of the research results.

Thus, the developed methodology for designing the power supply system of the oil production complex determines the number of generation centers, the configuration of the power supply system for transformer substations of wells from one generation center, organizes mutual reservation between the neighboring generation centers according to the criterion of the minimum length and number of generation centers, ensuring a minimum cost for this power supply system.

References

1. Market research of sucker rod pump installations (USGGN). Analytical report. Available at :URL: <http://research-techart.ru/report/walking-beam-pumping-unit.htm>. Accessed to: Sept 9, 2019.
2. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017;53(3):3164-3174.
3. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. -1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. 440 p.
4. Xiaodong Liang. Innovative design and feasibility study for a subsea electrical submersible pump system. 2016 *IEEE/IAS 52nd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 May 2016. doi: 10.1109/ICPS.2016.7490232.
5. Xiaodong Liang, Ahmad El-Kadri. Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation. 2018 *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
6. Hussain A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat. A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system. 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 21-24 May 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
7. PriyatmadiSardjono, Muhammad NurWangsaSaputra. Optimal bottomhole pressure control on oil well production using PID-linear hybrid control on electric submersible pump. 2016 *8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 5-6 Oct. 2016. doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863229.
8. Thorsen OV, Dalva M. Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001;37(2):541-547
9. MiaoxinJin, Pengmiao Zhang, Gang Li, et al. A downhole multi-parameter monitoring system for electrical submersible pump. 2015 *9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 1-5 June 2015. doi: 10.1109/ICPE.2015.7168111.
10. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez. Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique. 2018 *IEEE ANDESCON*. Conference Paper. Publisher: IEEE. Date of Conference: 22-24 Aug. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.
11. Turyshva AV. Electricity supply of power installations of oil production from autonomous power plants. Notes of the Mining Institute. 2010;186:156-160.
12. Turyshva AV. Improving the reliability and efficiency of power supply of oil production facilities using autonomous power sources. *The dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. St. Petersburg State Mining University. St. Petersburg, 2012. p.154.
13. Lucio Steckling, Marcelo Lobo Heldwein. Model-Based Synchronous Optimal Modulation for Three-Level Inverters Applied to Electrical Submersible Pumps Systems. PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, *Renewable Energy and Energy Management*. Publisher: VDE. Date of Conference: 7-9 May 2019.
14. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, KornilovV.Yu., Gorodnov AG. Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting at Rumila field / Abdulhy Al-Ali

Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov A.G. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2018;11-12:127-132.

15. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed, Kornilov VYu, Gorodnov AG Optimize the performance of electrical equipment in gas separation stations (degassing station DS) and electrical submersible pumps of oil equipment for oil Rumaila field. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. Kazan: Kazan State Energy University. 2019;1-2:141-145.

16. Abdulhy Al-Ali Majid Abdulhameed. Optimal operation of electrical power generators for oil wells operated by artificial lifting. *Journal of Thi_Qar Science*. University of Thi_Qar. Republic of Iraq. 2016;5(4)67-76.

Authors of the publication

Anton G. Gorodnov – Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. Email:gorodnov_kai@mail.ru.

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

Majid Abdulhameed Abdulhy Al-Ali – Rumaila Operating Organization, Basra, Iraq.

Поступила в редакцию

23 декабря 2019 г.



ТОКСИЧНОСТЬ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА KE-25-14C

М.С. Иваницкий

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

в г. Волжском, Россия

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

Резюме: В статье рассмотрены вопросы реализации нового отечественного природоохранного законодательства, предусматривающего разделение в зависимости от степени негативного воздействия на окружающую среду всех энергетических предприятий на 4 категории, введение технологического нормирования, реализуемого на принципах наилучших доступных технологий при условии наличия технической возможности их применения, проведение дифференцирования мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды. В рамках данного подхода с целью оценки степени влияния на окружающую среду выбросов котлов малой тепловой мощности KE-25-14C посредством проведения численных экспериментов определены значения суммарного показателя вредности (токсичности) продуктов сгорания, образующихся при сжигании березовского угля марки Б2 (класс обогащения Р). Суммарный показатель вредности выбросов определен с учетом вклада частных показателей вредности компонентов сгорания, представленных оксидами азота, диоксидом серы, монооксидом углерода, золовыми частицами, пентаоксидом ванадия и бенз(а)пиреном. Установлен частный вклад рассмотренных загрязняющих веществ в суммарную токсичность выбросов при реализации режимов сжигания с умеренным и большим химическим недожогом топлива. Даны практические рекомендации применения результатов исследования в качестве исходных данных при установлении технологических нормативов котлов тепловых электрических станций в процессе согласования и получения комплексного экологического разрешения, разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, вредность продуктов сгорания, экологическая безопасность ТЭС.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла ке-25-14с// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 77-84. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-77-84.

TOXICITY OF EXHAUST GASESSOLID FUEL BOILER KE-25-14S

MS Ivanitskiy

Volzhsky Branch of the National Research University

Moscow Power Engineering Institute, Russia

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

Abstract: The article deals with the implementation of the new national environmental legislation, which provides for the division of all energy enterprises into 4 categories depending on the degree of negative impact on the environment, the introduction of technological rationing, implemented on the principles of the best available technologies, provided that they are technically possible to use them, and the differentiation of state regulation measures in the field of environmental protection. Within the framework of this approach, the values of the total index of harmfulness (toxicity) of combustion products formed during the burning of Berezovsky coal of the B2 grade (enrichment class P) were determined by numerical experiments in order to assess the impact on the environment of emissions from low-power boilers KE-25-14C. The total emission hazard index is determined by taking into account the contribution of specific hazard indicators of combustion components represented by nitrogen oxides, sulfur dioxide, carbon monoxide, ash particles, vanadium pentoxide and

benz(a)pyrene. The private contribution of the considered pollutants to the total toxicity of emissions in the implementation of combustion regimes with moderate and large chemical underburning of fuel is established. Practical recommendations are given for using the results of the study as input data for setting technological standards for boilers of thermal power plants in the process of approval and obtaining a comprehensive environmental permit, and for developing a program to improve the environmental efficiency of energy enterprises.

Keywords: *benzo(a)pyrene, harmful combustion products, environmental safety of thermal power plants.*

For citation: Ivanitskiy MS. Toxicity of exhaust gasessolid fuel boiler KE-25-14S. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(1):77-84. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-77-84.

Введение

В соответствии с новым отечественным природоохранным законодательством, вступившим в действие с 01.01.2015 года, тепловые электрические станции (ТЭС) и промышленные предприятия отнесены к источникам негативного воздействия на окружающую среду I–IV типов, вызывающим антропогенное загрязнение атмосферы. В рамках соответствующего подхода с 01.01.2019 года существенно изменяются принципы природоохранной политики государства [1]:

- внедряется технологическое нормирование, основанное на принципах наилучших доступных технологий (НДТ) производства продукции, выполнения работ, определяемых на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности их применения;

- проводится дифференцирование мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в зависимости от степени негативного воздействия предприятия на окружающую среду.

При этом в качестве маркерных загрязняющих веществ для энергетических установок ТЭС приняты оксиды азота NO_x (в пересчете на NO_2), диоксид серы (SO_2), монооксид углерода (CO) и твердые частицы. Приведенные маркерные вещества характерны для котлов, сжигающих уголь [2, 3].

Известно, что пылеугольные котлы характеризуются более высоким содержанием бенз(а)пирена (БП) в уходящих газах, чем котлы, сжигающие природный газ или мазут [4–6]. Наличие БП в уходящих газах объясняется прежде всего незавершенностью процесса горения топлива в топке котла, а в ряде случаев, неполной конверсией БП и CO в газовом тракте котельной установки [4]. Вклад токсичности маркерных веществ, пентаоксида ванадия (V_2O_5) и БП в суммарную вредность продуктов сгорания можно оценить путем расчета частных и суммарного показателя вредности дымовых газов и таким образом определить степень влияния каждого отдельного вредного вещества на загрязнение атмосферного воздуха [5,6]. При этом организация мониторинга выбросов загрязняющих атмосферу веществ для оценки вредности продуктов сгорания может осуществляться в соответствии с [7-9]. Целью данной работы является расчетная оценка концентрации БП в продуктах сгорания березовского угля марки Б2 (класс обогащения Р) и оценка вклада БП, NO_2 , SO_2 , CO, V_2O_5 и золовых частиц в суммарную вредность уходящих газов.

Численное исследование

Объектом исследования, для которого проводилось определение показателей суммарной и частных вредностей продуктов сгорания являлся твердотопливный котел KE-25-14С тепловой мощностью 15 Гкал/ч (17,5 МВт) с естественной циркуляцией со слоевыми механическими топками. Основным топливом является березовский уголь марки Б2 (класс обогащения Р) со следующими минеральными и горючими характеристиками, приведенными к рабочей массе: $w^r = 33,0\%$, $A^r = 4,7\%$, $C^r = 44,2\%$, $H^r = 3,1\%$, $S^r = 0,2\%$, $O^r = 14,4\%$, $N^r = 0,4\%$, $Q_i^r = 15,66$ МДж/кг. Расход угля в номинальном режиме работы 4421 кг/ч. В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха на выходе из слоевой топки в диапазоне $\alpha = 1,2 \div 1,7$. Тепловая нагрузка котла изменялась в пределах от $0,5 \leq Q_{\text{ф}} / Q_{\text{н}} \leq 1$.

Расчетные значения теплонапряжения топочного объема камеры $q_V = 392$ кВт/м³, поверхностное теплонапряжение топочной камеры $q_f = 1,4$ МВт/м². Объемный расход уходящих газов в исследованном диапазоне коэффициента избытка воздуха варьировался в пределах 11,6÷23,2 м³/с. Относительные потери тепла с продуктами сгорания при $Q_\phi / Q_n = 1$, равны $q_2 = 10,4$ %. Коэффициент полезного действия котла – 84,9 %.

В рамках оценки суммарного вредного воздействия продуктов сгорания котлов ТЭС на окружающую среду используется показатель суммарной вредности $\Sigma \Pi$, который учитывает частные показатели токсичности выбросов $\Sigma \Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i$ [5, 6].

Показатель частной вредности бенз(а)пирена определяется по зависимости [6]:

$$\Pi_{\text{БП}} = \frac{4,387 \cdot 10^{-3} C_{\text{БП}} V_\Gamma (1 - \eta_{\text{БП}})}{Q_i^r \text{ПДК}_{\text{СС}}^{\text{БП}}}, \quad (1)$$

где V_Γ – объем дымовых газов, образующихся при сжигании 1 кг угля при нормальных условиях, м³/кг; $\text{ПДК}_{\text{СС}}^{\text{БП}}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация БП, мг/м³; $\eta_{\text{БП}}$ – степень задержки БП в системе газоочистки.

Отметим, что для бенз(а)пирена установлены только среднесуточные предельно допустимые концентрации, поэтому в выражении (1) БП соотнесен со значением ПДК нетоксичной пыли, равным $\text{ПДК}_{\text{СС}} = 0,15$ мг/м³.

Частная вредность токсичных веществ (оксидов азота NO₂, монооксида углерода СО) рассчитывается по уравнению [6]:

$$\Pi_i = \frac{1,462 \cdot 10^{-2} C_i V_\Gamma (1 - \eta)}{Q_i^r \text{ПДК}_{\text{М,Р}}}, \quad (2)$$

где $\text{ПДК}_{\text{М,Р}}$ – максимально разовая предельно допустимая концентрация вредного вещества, мг/м³; η – степень очистки уходящих газов от i -ой примеси перед выбросом в атмосферу (в долях).

Определение показателей частной токсичности пентаоксида ванадия, золы и диоксида серы осуществляется на основе [6] и с учетом содержания примеси в топливе [5].

Оценка концентрации БП в сухих дымовых газах котлов малой тепловой мощности (до 20 Гкал/ч) $C_{\text{БП}}$, мг/м³, при слоевом сжигании твердых топлив, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, проводилась с помощью выражения:

$$C_{\text{БП}} = 10^{-3} \left(\frac{A \cdot Q_i^r}{e^{2,5\alpha}} + \frac{R}{t_H} \right) \prod_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где A – параметр, характеризующий тип колосниковой решетки и вид топлива (для углей и сланцев $A = 2,5$); Q_i^r – теплота сгорания топлива, МДж/кг; R – коэффициент, характеризующий температурный уровень экранов; t_H – температура насыщенного пара на выходе из барабана котла, °С (для $t_H \geq 150$ °С, $R=350$); $\prod_{i=1}^n K_i = K_d \cdot K_{\text{ЗУ}}$ – произведение коэффициентов для учета нагрузки котла, эффективности золоулавливающих устройств.

При расчете содержания оксидов азота, C_{NO_2} мг/м³, в продуктах сгорания угля для твердотопливных слоевых котлов малой тепловой мощности (до 20 Гкал/ч), учитывались следующие режимные параметры и условия: коэффициент избытка воздуха и степень измельчения топлива.

Обсуждение результатов

Повышение нагрузки котла способствует улучшению условий более полного выгорания топлива в топке, что характеризуется уменьшением содержания углеводородов в продуктах сгорания. График зависимости изменения содержания БП в продуктах сгорания угля от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С приведен на рис. 1.

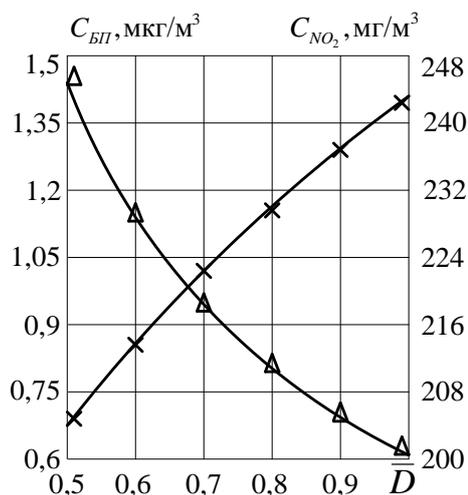


Рис. 1. Расчетная зависимость изменения содержания БП и NO_2 в продуктах сгорания березового угля от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С

Увеличение нагрузки котла от 50 до 100 % приводит к снижению концентрации БП в уходящих газах до 0,61 мкг/м³. Таким образом, содержание БП в продуктах сгорания уменьшается на 56,5 %. Концентрация оксидов азота при повышении нагрузки до номинального уровня возрастает от 204 до 243 мг/м³, что соответствует 16 % росту в относительных значениях. Отметим, что удельный выход оксидов азота для номинальной нагрузки котла КЕ-25-14С при $\alpha=1,2$ составил 0,293 г/МДж, а для коэффициента избытка воздуха на выходе из топки $\alpha = 1,6$ равен 0,329 г/МДж.

Результаты расчета частных показателей вредности БП, оксидов азота NO_2 и серы SO_2 , монооксида углерода CO в зависимости от коэффициента избытка воздуха на выходе из топочной камеры при номинальном режиме тепловой нагрузки котла КЕ-25-14С при сжигании березового угля приведены на рис. 2.

Для представленного варианта сжигания топлива содержание БП в номинальном режиме работы котла равно 0,41 мкг/м³. При этом удельный вклад БП в суммарную вредность продуктов сгорания равен 2,9 %. Концентрация оксидов азота для коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2$ составляет 179 мг/м³, при $\alpha = 1,6$ содержание равно 206 мг/м³. Суммарная вредность продуктов сгорания для $\alpha = 1,2$ равна 0,0431, при увеличении коэффициента избытка воздуха до 1,7 вредность выбросов снижается на 21,6 %; доля токсичности, вносимая CO , при $\alpha = 1,7$ равна 0,9 %. Доля токсичности оксидов азота при этом равна 55,9 %. Минимальный вклад частной вредности NO_2 в данном режиме работы котла КЕ-25-14С составляет 38,3 %.

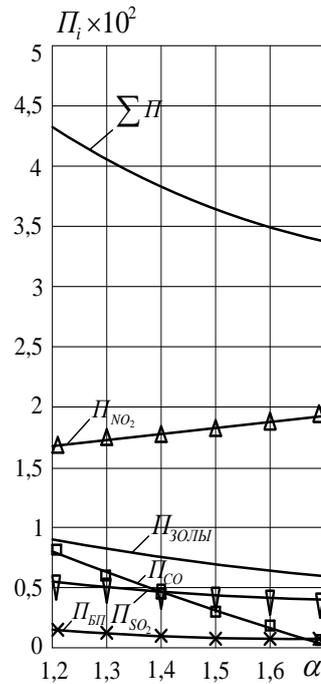


Рис. 2. Изменение показателей частных вредностей продуктов сгорания котла КЕ-25-14С в зависимости от коэффициента избытка воздуха на номинальном режиме тепловой нагрузки

Характер изменения показателей частных вредностей БП, NO₂, SO₂, CO, V₂O₅ и золы в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С при сжигании березовского угля в зависимости от расхода топлива представлено на рис. 3.

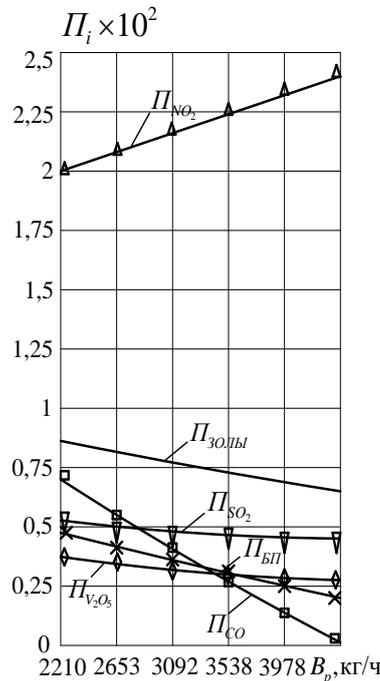


Рис. 3. Изменение показателей частных вредностей БП, NO₂, SO₂, CO, V₂O₅ и золы в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С в зависимости от расхода топлива

Расчетами установлено, что для режима с большим химическим недожогом топлива $q_3 = 0,15\%$, вклад монооксида углерода CO в суммарную токсичность выбросов равен 22,9 % (концентрация CO в уходящих газах 148 мг/м³), для режима горения с малым химическим недожогом (содержание CO в продуктах сгорания 10 – 20 мг/м³) доля вредности CO составляет не более 1%. Анализ данных продемонстрированных на рис. 3. позволяет заключить, что для $B_p = 2210$ кг/ч вклад БП

в суммарную вредность дымовых газов равен 9,5 % (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,6$), доля NO_2 равна 40,4 %, при дальнейшем увеличении нагрузки до номинального режима работы котла $B_p = 4421 \text{ кг/ч}$ доля БП снижается до 5 %, вклад частной вредности оксидов азота увеличивается до 59,9 %. Доля, учитывающая частную токсичность оксидов серы SO_2 для приведенных режимов составляет 10,9 и 10,6 %, соответственно. Отметим, что концентрация оксидов серы в продуктах сгорания березовского угля при увеличении коэффициента избытка воздуха на выходе из топки котла от 1,2 до 1,7 снижается в пределах от 348 до 271 мг/м^3 за счет разбавления избыточным воздухом. Для вышеперечисленных концентраций частная вредность SO_2 в продуктах сгорания угля равна 0,0054 и 0,0042, соответственно. Таким образом, максимальный вклад частной вредности оксидов серы в суммарную токсичность дымовых газов котла КЕ-25-14С не превышает 13,6 %.

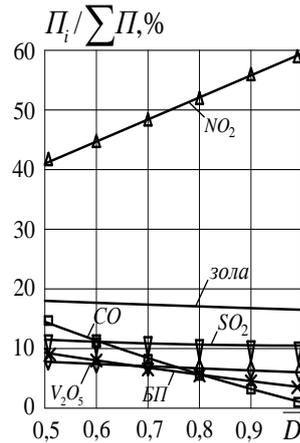


Рис. 4. Вклад частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO, V_2O_5 и золы в суммарную токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с умеренным недожогом топлива

Зависимость, приведенная на рис.4., характеризует вклад частных вредностей V_2O_5 и золы в общую токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от изменения относительной паровой нагрузки котла для режима с умеренным недожогом топлива. Отметим, что вклад частной вредности пентаоксида ванадия V_2O_5 в суммарную токсичность уходящих газов в рассмотренном диапазоне изменения нагрузок равен 7,1 – 7,3 %. Доля частной вредности, вносимая золовыми частицами, составляет от 16,5 до 17,1 %. Для режима работы котла КЕ-25-14С с умеренным недожогом топлива при относительной среднегодовой нагрузке $\bar{D} = 0,9$ вклад частных вредностей примесей продуктов сгорания соответствует распределению: БП – 5,5 %, NO_2 – 54,9 %, SO_2 – 10,5 %, CO – 5,7 %, V_2O_5 – 7,0 %, зола – 16,4 %.

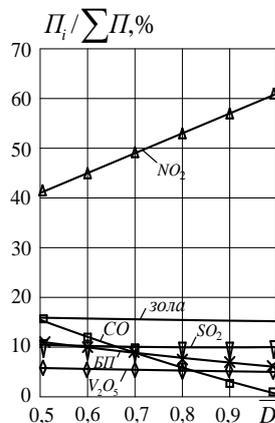


Рис. 5. Вклад частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO, V_2O_5 и золы в суммарную токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с большим недожогом топлива

Относительный вклад частных вредностей БП, NO₂, SO₂, CO, V₂O₅ и золы в суммарную токсичность дымовых газов в зависимости от изменения относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с большим недожогом топлива представлен на рис. 5. Таким образом, для приведенного режима сжигания березовского угля вклад частных вредностей примесей уходящих газов соответствует следующему распределению: БП – 5,9 %, NO₂ – 61,1 %, SO₂ – 10 %, CO – 0,7 %, V₂O₅ – 6,7%, зола – 15,6 %. Расчетные концентрации БП в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С согласуются с экспериментальными данными, представленными в работах [4-6].

Приведенные данные указывают на желательность учета содержания БП в продуктах сгорания при определении суммарной вредности уходящих газов слоевых твердотопливных котлов. Необходимо отметить, что БП является канцерогенным представителем ПАУ, его наличие в окружающей среде используется в качестве индикаторного показателя загрязнения атмосферы ПАУ [10-15]. При этом канцерогенное действие БП сохраняется при содержании в воздухе ниже предельно допустимой концентрации, что необходимо учитывать при проведении периодического контроля вредных выбросов.

Выводы

Суммарная вредность продуктов сгорания слоевого отопительного котла КЕ-25-14С тепловой мощностью 15 Гкал/ч для наиболее неблагоприятных режимов сжигания березовского угля марки Б2 на 9,5-10,6% обусловлена частной токсичностью канцерогенного БП, для рабочих режимов горения топлива, соответствующих режимной карте котла, частный вклад БП составляет 2,9-5,9%. Полученные результаты по оценке суммарной токсичности уходящих газов, характеризующейся частными вредностями NO₂, SO₂, CO и золы, могут быть использованы при установлении технологических нормативов ТЭС и промышленных предприятий в процессе согласования и получения комплексного экологического разрешения в рамках внедрения в отечественной теплоэнергетике принципов наилучших доступных технологий.

Литература

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е. Первоочередные мероприятия по реализации нового экологического законодательства // Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 5. С. 6-17.
2. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Гусева Т.В., Локтионов О.А. Основные задачи энергетических предприятий при получении комплексных экологических разрешений // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 4. С. 41-45.
3. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Боровкова А.М. Нормативно-правовое и методическое обеспечение перехода на наилучшие доступные технологии в теплоэнергетике // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 85-92.
4. Росляков П.В., Закиров И. А., Ионкин И. Л., Егорова Л. Е. Исследование процессов конверсии оксида углерода и бенз(а)пирена вдоль газового тракта котельных установок // Теплоэнергетика. 2005. № 4. С. 44-50.
5. Кропп Л.И., Залогин Н.Г., Яновский Л.П. Показатель суммарной вредности продуктов сгорания энергетических топлив // Теплоэнергетика. 1978. №10. С. 47-49.
6. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Оценка суммарной вредности уходящих газов котельной установки // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 30-34.
7. Кондратьева О.Е., Росляков П.В. Основные стадии внедрения систем непрерывного контроля и учета выбросов в атмосферу на ТЭС // Электрические станции. 2016. № 9(1022). С. 25-29.
8. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Бурдюков Д.А., и др. Рекомендации по выбору газоаналитического оборудования для систем непрерывного контроля и учета выбросов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 43-50.
9. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Кубышева Л.Л. Организация непрерывного контроля и учета вредных выбросов в атмосферу на ТЭС // Электрические станции. 2015. № 6 (1007). С. 26-31.
10. Иваницкий М.С. Особенности рассеивания выбросов бенз(а)пирена от теплогенерирующих установок малой тепловой мощности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 12-18.
11. Gerasimov G. Modeling study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans behavior in flue gases under electron beam irradiation // Chemosphere. 2016. Vol. 158. P. 100-106.
12. Li J., Li X., Zhou C., Li M., Lu S., Yan J., Qi Z. Study on the influencing factors of the distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in condensable particulate matter // Energy and Fuels. 2017. V.31. № 12. pp. 13233-13238.

13. Yeo B.G., Takada H., Hosoda J., Kondo A., Yamashita R., Saha M., Maes T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and hopanes in plastic resin pellets as markers of oil pollution via international pellet watch monitoring // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. V.73. № 2. pp. 196-206.

14. Hayakawa K., Tang N., Nagato E.G., Toriba A., Sakai S., Kano F., Goto S., Endo O., Arashidani K.-I., Kakimoto H. Long term trends in atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons: a study of Japanese cities from 1997 to 2014 // Environmental Pollution. 2018.V.233. pp. 474-482.

15. Reizer E., Csizmadia I.G., Viskolcz B., Fiser B., Palotás Á.B. Formation mechanism of benzo(a)pyrene: one of the most carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) // Molecules. 2019.V.24. № 6. P. 1040.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE. Pervoocherednye meropriyatiya po realizatsii novogo ekologicheskogo zakonodatel'stva. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2016;5:6-17.

2. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Guseva T.V, et al. Osnovnye zadachi energeticheskikh predpriyatii pri poluchenii kompleksnykh ekologicheskikh razreshenii. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018;22(4):4-45.

3. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Borovkova AM. Normativno-pravovoe i metodicheskoe obespechenie perekhoda na nailuchshie dostupnye tekhnologii v teploenergetike. *Teploenergetika*. 2018;5:85-92.

4. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin IL, et al. Issledovanie protsessov konversii oksida ugleroda i benz(a)pirena vdol' gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok. *Teploenergetika*. 2005;4:44-50.

5. Kropp LI, Zalogin NG, Yanovskii LP. Pokazatel' summarnoi vrednosti produktov sgoraniya energeticheskikh topliv. *Teploenergetika*. 1978;10:47-49.

6. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin I.L, et al. Otsenka summarnoi vrednosti ukhodyashchikh gazov kotel'noi ustanovki. *Teploenergetika*. 2005;9:30-34.

7. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV. Osnovnye stadii vnedreniya sistem nepreryvnogo kontrolya i ucheta vybrosov v atmosferu na TES. *Elektricheskie stantsii*. 2016;9(1022):25-29.

8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Burdyukov DA, et al. Rekomendatsii po vyboru gazoanaliticheskogo oborudovaniya dlya sistem nepreryvnogo kontrolya i ucheta vybrosov teplovykh elektrostantsii. *Teploenergetika*. 2017;10:43-50.

9. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Kubysheva LL. Organizatsiya nepreryvnogo kontrolya i ucheta vrednykh vybrosov v atmosferu na TES. *Elektricheskie stantsii*. 2015;6(1007):6-31.

10. Ivanitskii MS. Osobennosti rasseivaniya vybrosov benz(a)pirena ot teplogeneriruyushchikh ustanovok maloi teplovoi moshchnosti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;5-6:12-8.

11. Gerasimov G. Modeling study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans behavior in flue gases under electron beam irradiation. *Chemosphere*. 2016;158:100-106.

12. Li J, Li X, Zhou C, et al. Study on the influencing factors of the distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in condensable particulate matter. *Energy and Fuels*. 2017;31(12):13233-13238.

13. Yeo BG, Takada H, Hosoda J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and hopanes in plastic resin pellets as markers of oil pollution via international pellet watch monitoring. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2017;73(2):196-206.

14. Hayakawa K, Tang N., Nagato E.G., et al. Long term trends in atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons: a study of Japanese cities from 1997 to 2014. *Environmental Pollution*. 2018;233:474-482.

15. Reizer E, Csizmadia IG, Viskolcz B, et al. Formation mechanism of benzo(a)pyrene: one of the most carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). *Molecules*. 2019;24(6):1040.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia. E-mail: mseiv@yandex.ru.



ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

А.А. Наумов

Казанский государственный энергетический университет г. Казань, Россия

Резюме: обсуждаются пути обеспечения требуемого качества электрической энергии (ЭЭ) в условиях ограниченных финансовых возможностей энергоснабжающих организаций (ЭСО) с учетом опыта зарубежных стран. Предлагается разрабатывать и применять тарифы, дифференцированные по степени надежности и качества ЭЭ, в соответствии с требуемым для отдельных потребителей качеством ЭЭ.

В результате использования тарифов, дифференцированных по уровням качества, в выигрыше могут оказаться как потребители, так и ЭСО. Потребители, с энергопринимающими устройствами, не требующими высокого качества ЭЭ – за счет снижения платежей, потребители с энергопринимающими устройствами, требующих повышенного качества ЭЭ – за счет успешной работы электротехнических устройств, повышения их ресурса и обеспечения высокого качества выпускаемой продукции. ЭСО приобретают стимулы для управления качеством ЭЭ по запросам потребителей и возможности более рационального использования финансовых средств, направляемых на предоставление потребителю ЭЭ различного качества.

Ключевые слова: электрическая энергия, качество, тарифы, регулирование.

Для цитирования: Наумов АА. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 85-92. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92.

THE REQUIRED QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY PROVISION

AA Naumov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: Methods of the electrical energy (EE) with the required quality provision in conditions of limited financial opportunities in the power supplying companies (PSC) are being discussed considering the foreign countries experience. It is proposed to develop and apply tariffs differentiated by the degree of EE reliability and quality, in compliance with the EE quality required for definite consumers.

As a result, both consumers and PSC may get the best of tariffs application differentiated by the quality level. Consumers with power receiving appliances not demanding the high quality of EE will gain profit from payment reduction, whereas the consumers with power receiving appliances demanding the high quality of EE – from successful operation of electrical appliances, increase of their operating time and high quality of manufactured products provision. PSC acquire incentives for EE quality management upon the consumers' request, as well as opportunities of more efficient use of financial resources directed at different quality EE provision to the consumer.

Keywords: electric energy, tariff, regulating.

For citation: Naumov AA. The required quality of electrical energy provision. Power engineering: research, equipment, technology. 2020; 22(1):85-92. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92.

Введение

Актуальность обеспечения надлежащего качества ЭЭ для большего количества потребителей в настоящее время не вызывает сомнения. Финансовые потери в мире от некачественной ЭЭ оцениваются в сотни миллиардов долларов и имеют тенденцию к дальнейшему увеличению. Основная причина этого – изменение характера нагрузки потребителей ЭЭ. Нагрузка все в большей степени становится нелинейной, несимметричной, чувствительной к параметрам напряжения. Это связано с внедрением пускорегулирующих устройств электрических машин, компьютерной техники во все сферы жизни, отказом от ламп накаливания в пользу энергосберегающих, люминесцентных и светодиодных ламп, использованием современных и перспективных способов передачи информации по электрическим проводам и т.д. [1].

Огромные убытки и тенденции на их увеличение в большинстве развитых стран связаны с очевидными факторами, хорошо известными энергетикам:

1. Возрастающее влияние электроэнергетики на развитие общества, усложнение структуры и функций электроэнергетических систем.
2. Сложность современных технологических процессов и высокие требования к поддержанию их стабильности, быстрое увеличение количества крупных компьютерных систем.
3. Рост мощности нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок.
4. Изношенность основных фондов электроэнергетических предприятий.
5. Дерегулирование, приватизация и либерализация электроэнергетического сектора во многих странах мира.

Без принятия действенных мер по улучшению качества ЭЭ невозможно обеспечить дальнейшее нормальное функционирование промышленности и сельского хозяйства. Обеспечение КЭ у потребителей отмечено как одна из стратегических целей технической политики ОАО «Федеральной Сетевой Компании Единой Энергетической Системы Российской Федерации»¹.

Материалы и методы

Состояние распределительных электрических сетей общего назначения привело к необходимости введения в ГОСТы по качеству ЭЭ² [2] новых показателей – уровней интергармонических составляющих [3] и уровня сигналов, передаваемых по линиям электропередач. В ближайшие годы они приобретут реальное наполнение в виде конкретных допустимых норм. Измеренные величины отдельных интергармонических составляющих токов и напряжений, как правило, незначительные (порядка долей процента от основной гармоники), но их суммарное воздействие порой оказывается даже большим чем от гармонических составляющих. С учетом все большего количества используемых частоторегулирующих устройств с фазоимпульсными модуляторами и асинхронных двигателей, являющихся основными источниками интергармонических составляющих, интергармоники все в большей степени будут оказывать влияние на качество ЭЭ.

В настоящее время для подтверждения качества ЭЭ она подвергается обязательной сертификации [4]. Но сертификация проводится лишь по двум показателям: частоте и медленным изменениям напряжения, которые проводятся в течение недели, причем не во всех центрах питания и не каждый год (существует методика выбора количества центров питания). По всем остальным показателям сертификация не проводится, несмотря на то, что в договорах на электроснабжение поставщик и потребитель обязаны указывать на необходимость соблюдения всех требований действующего ГОСТа 32144-2013. Объясняется это тем, что оборудование ЭСО и потребителей находятся в техническом состоянии, не позволяющем обеспечить при любых режимах работы качество ЭЭ по всем показателям. И это несмотря на то, что с принятием нового ГОСТа требования к таким показателям как медленные отклонения напряжения и провалы напряжения стали менее жесткие. Ранее следовало делать выводы о соответствии норм по нормально допустимым и предельно допустимым отклонениям напряжения, сейчас – нормально допустимые

¹О единой технической политике в электросетевом комплексе. Положение ОАО «Россети». Введено в действие: Советом директоров ОАО «ФСК ЕЭС» (протокол от 27.12.2013 № 208) Положение о технической политике ОАО «ФСК ЕЭС» от 02.06.2006. № 34.Источник: [Электронный ресурс]. http://www.fsk-ees.ru/about/technical_policy/(дата обращения: 1.02.2019).

²ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

отклонения не учитываются. Допустимая длительность провала напряжения увеличена в два раза.

Следует отметить, что измерительная аппаратура аккредитованных испытательных лабораторий, используемая при проведении сертификационных испытаний, как правило, позволяет получать информацию обо всех показателях качества, изложенных в ГОСТ 32144-2013, так что получение заключений о соответствии или несоответствии ЭЭ нормам по всем показателям практически возможно без существенных дополнительных затрат.

Обязанность по обеспечению качества ЭЭ, согласно современным нормативно-техническим документам, возложена не только на поставщиков, но и на потребителей ЭЭ, которые своими нагрузками могут оказывать существенное влияние на показатели качества ЭЭ. Причем, при подключении потребителей с искажающими нагрузками к одной точке питания следует определить вклады отдельных потребителей на искажение напряжения. Методы оценки вкладов потребителей изложены, в частности, в [5, 6]. Но за сертифицируемые показатели ответственность полностью возложена на ЭСО, при условии соблюдения потребителем условий договора по допустимой потребляемой мощности. Ответственность потребителя состоит в том, что при обеспечении ЭСО качества напряжения в точке передачи ЭЭ, он должен обеспечить качество на зажимах своих энергопринимающих устройств. Для этого он должен использовать нагрузку не искажающую качество ЭЭ, либо предпринять меры для обеспечения установленного качества. Вопрос о том, подвержена ли электроустановка негативному влиянию качества энергии, зависит от качества поставляемого напряжения, типов нагрузки, чувствительности оборудования к возмущениям различного вида и отклонениям от номинальных параметров [7]. Если нагрузка является искажающей по одному или нескольким показателям он должен использовать дополнительные технические средства, корректирующие эти искажения. Данное требование, к сожалению, исполняется далеко не всегда.

Проблема усугубляется тем, что возможна передача искажений качества от нагрузок искажающего потребителя к нагрузкам неискажающего потребителя, подключенных не только на одну шину питания, но и на разные шины, и даже на шины разных уровней напряжения.

Поддержание качества требует значительных финансовых затрат, установки систем регулирования, фильтрации, релейной автоматики, контроля и т.д. Очевидно, что рассчитывать на крупные денежные потоки в сетевые компании, направленные на кардинальные улучшения качества ЭЭ в современных экономических условиях РФ не приходится.

Какие пути решения проблемы обеспечения качества ЭЭ можно было бы предложить на современном этапе?

Таких путей несколько, и все они объединены общей идеологией о том, что стоимость энергии разного качества должна заметно отличаться.

Первый путь – *технологический*. Движение по этому пути предусматривает совершенствование электротехнического оборудования с учетом изменений показателей качества ЭЭ во времени. Если фиксируются отклонения показателей качества, то требуется модернизация системы электроснабжения, направленная на создание условий, при которых показатель или несколько показателей будут приведены к норме. После анализа отклонений определяется причина, приобретается и устанавливается соответствующее корректирующее оборудование и в дальнейшем обеспечивается ее эксплуатация.

Данную задачу невозможно решить без мобильных или стационарных территориальных систем контроля и управления качества ЭЭ, в идеале организовав систему непрерывного мониторинга качества ЭЭ. Причем, мировая практика показывает, что мониторинг может быть организован на разных уровнях: передачи, распределения, либо охватывать оба уровня одновременно.

Очень эффективным показал себя общественный контроль за качеством ЭЭ, включающий участие общественных организаций, средств массовой информации в доведении информации о текущих значениях показателей качества ЭЭ до населения и всех заинтересованных организаций.

Второй путь – *нормативный*. Этот путь давно ожидаемый в РФ и логичный. Он предполагает на законодательном уровне разработку скидок и надбавок к тарифам за обеспечение качества ЭЭ. Данный подход хорошо апробирован на действовавшем в девяностые годы порядке платежей за потребление и генерацию реактивной ЭЭ, качество ЭЭ. Согласно раздела 3 инструкции Роскомцен и Минтопэнерго РФ «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию»³ оплата за реактивную энергию зависела от

³Инструкция Роскомцен № 01-17/1443-11, Минтопэнерго РФ № ВК-7539 от 30.11.1993 (ред. от 13.04.1995) «О порядке расчетов за электрическую и тепловую энергию» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 28.12.1993 № 449). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.consultant.ru/document/consdocLAW3031/> (дата обращения: 1.02.2019).

количества вырабатываемой нагрузками потребителя реактивной мощности и потребления реактивной энергии в часы максимальных и минимальных нагрузок. Методика расчета экономических значений была приведена в "Правилах применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии", утвержденных Главгосэнергонадзором России⁴. Предприятия могли иметь значительную экономию за платежи за потребленную ЭЭ, если принимали участие в регулировании режимов работы сети. За потребление реактивной мощности и энергии сверх установленных в договоре значений и за генерацию реактивной энергии в сеть применялись надбавки в 8 и 12 % соответственно. Это являлось хорошим стимулирующим фактором для улучшения режимов работы линий электропередачи. Скидки (надбавки) за потребление и генерацию реактивной энергии применялись при расчетах со всеми потребителями ЭЭ, имевшими среднемесячное потребление более 30 тыс. кВтч в месяц, население в данном процессе не участвовало.

В разделе 4 «Скидки (надбавки) к тарифу за качество ЭЭ» говорилось, что скидки (надбавки) за качество ЭЭ должны применяться при расчетах со всеми потребителями. Скидки с тарифа применялись при отпуске потребителю ЭЭ пониженного качества по отклонениям напряжения и частоты, а также при отпуске ЭЭ пониженного качества по вине ЭСО по другим показателям: коэффициентам несинусоидальности, обратной и нулевой последовательностей, дозе колебания напряжения. Надбавки к тарифу применялись при наличии доказательства снижения качества ЭЭ по вине потребителя по тем же показателям.

Сторона, виновная в снижении качества ЭЭ на границе раздела сетей потребителя и ЭСО, определялась Правилами применения скидок и надбавок к тарифам за качество ЭЭ, утвержденными Главгосэнергонадзором.

Скидки (надбавки) к тарифу по каждому показателю качества определялись с учетом относительного времени превышения нормального допустимого значения и относительного времени превышения максимального допустимого значения показателя качества. Конкретное значение скидки (надбавки) в зависимости от степени нарушения находилось в интервале от 0,2 до 10 % тарифа на ЭЭ. Суммарная скидка (надбавка) определялась суммой скидок (надбавок), исчисленных по каждому показателю качества.

При расчетах за ЭЭ по двухставочному или дифференцированному тарифу скидки (надбавки) применялись к средней (расчетной) величине двухставочного или дифференцированного тарифа, включающего плату за мощность и энергию. Оплата по тарифу со скидкой (надбавкой) за качество ЭЭ производилась за весь объем ЭЭ, отпущенной (потребленной) в расчетный период.

Обсуждение причин отмены Приказом Минэнерго РФ № 167 от 28.12.2000 г. данного положения и их последствий выходят за рамки настоящей статьи, так же, как и причины отсутствия в настоящее время комплекса законодательных актов по стимулированию поддержания качества ЭЭ на должном уровне всеми пользователями ЭЭ. Но методики отнесения потребителей к виновникам, потенциальным виновникам, либо не виновникам нарушения качества отработаны и должны применяться на этапе подключения потребителя к электрическим сетям, либо при существенном изменении нагрузки потребителей.

Хорошим стимулом для пользователей ЭЭ могло быть положение, аналогичное Киотскому протоколу к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, принятому 11 декабря 1997 года по климату, согласно которому странам разрешалось выбрасывать в атмосферу определенное количество антропогенного парникового газа. Если это количество превышало квоту, то применялись штрафные санкции и эти средства направлялись на борьбу за улучшение экологии. Если страна не выбирала свою квоту, то она могла невыбранную часть квоты продать другой стране. Стороны, подписавшие соглашение, принимали на себя обязательства проведения исследовательских работ, повышения эффективности использования энергии, содействия внедрению, разработке и более широкому использованию новых и возобновляемых видов энергии и т.д. Нечто подобное возможно предусмотреть и при разработке законодательства по регулированию ЭЭ. И денежные средства, полученные от штрафных санкций, можно было бы направить на улучшение качества ЭЭ.

Следует отметить, что бытовые потребители к виновникам нарушения качества не должны относиться.

Третий путь – *договорной*. Данный путь основан на том, что не всем потребителям требуется высокое качество ЭЭ. Например, если ЭЭ используется для отопления помещений с помощью резистивных нагревательных элементов, обладающих значительной

⁴Правила применения скидок и надбавок к тарифам на электрическую энергию за потребление и генерацию реактивной энергии", Министерство топлива и энергетики РФ Главное управление государственного энергетического надзора. Письмо от 8 февраля 1994 года N 42-6/2В М., 1997.

инерционностью, то некоторые показатели (несимметрия, уровень гармоник и интергармоник, фликер, незначительные провалы напряжения) слабо влияют на результаты ее потребления.

Замечено, что для многих потребителей первоочередным, наиболее важным является непрерывность электроснабжения, а на отдельные показатели они могут реагировать слабо. Ряд потребителей до определенного момента вообще не воспринимают плохого КЭ, в то время как на все прерывания в поставках ЭЭ они могут реагировать весьма чутко и активно. Поэтому некоторые потребители не проявляют особого интереса к улучшению КЭ, пока это качество не упадет до определенного предельного уровня.

Напротив, если ЭЭ используется в компьютерных системах, ИТ-технологиях, системах релейной защиты и управления даже незначительные отклонения от установленных показателей могут привести к катастрофическим последствиям, техническим, технологическим, финансовым потерям и жертвам. Отсюда следует вывод о потребности предоставления потребителю выбора необходимого качества ЭЭ. Этот подход требует создания технических регламентов и стандартов, регламентирующих отношения поставщика и потребителя ЭЭ с учетом ее качества, побудительных финансовых схем (дифференцированные тарифы, штрафные санкции, скидки, надбавки, премии).

Международный пример такого подхода: с 1 января 2005 года в Голландии действует схема регулирования цены и качества ЭЭ. Принята шкала из шести уровней КЭ: премиум, высокое качество, нормальное качество, низкое качество, плохое качество и очень плохое качество. В Италии и ряде других стран система скидок и надбавок за КЭ уже действует.

Без обеспечения высокого качества ЭЭ и бесперебойности электроснабжения достичь высокого качества на высокотехнологичных предприятиях в настоящее время практически невозможно. Очевидно, что для поддержания высокого качества необходимо использовать, в некоторых случаях, достаточно сложные и дорогостоящие устройства [8-10], т.е. вкладывать денежные средства в совершенствование системы электроснабжения, которых часто не хватает.

Обсуждаемый путь, предоставляющий потребителям самостоятельного выбора требуемого качества ЭЭ с различной стоимостью, позволяет производить модернизацию оборудования, влияющего на качество более целенаправленно, с учетом потребностей конкретных потребителей и фактически с его заинтересованным участием.

Обойти в настоящее время отсутствие разработанных и принятых законодательных актов по различным качествам ЭЭ возможно на этапе согласования пунктов по качеству и непрерывности электроснабжения в соответствующих договорах. Все вопросы, определяющие взаимоотношения поставщика и потребителя ЭЭ, сроки и режимы поддержания требуемого качества, порядок перехода с одного на другое качество, контроль показателей качества и т.д. должны найти свое отражение в договорах электроснабжения.

Важным является соблюдение требований гражданского Кодекса Российской Федерации в части обеспечения качества электроснабжения: Качество подаваемой энергии должно соответствовать требованиям, установленным в соответствии с законодательством, в том числе с обязательными правилами РФ, или предусмотренным договором энергоснабжения. (Статья 542 ГК РФ. Качество энергии). В случае нарушения ЭСО требований, предъявляемых к КЭ, абонент вправе доказывать размер ущерба и взыскивать его с ЭСО по правилам статьи 547 ГК РФ. Вместе с тем, учитывая, что абонент все-таки использовал энергию ненадлежащего качества, он должен оплатить ее, но по соразмерно уменьшенной цене (п.2. ст.542 ГК РФ).

Из статьи 547 ГК РФ следует, что ответственность по договору энергоснабжения, в случаях неисполнения или ненадлежащего исполнения обязательств по договору энергоснабжения сторона, нарушившая обязательство, обязана возместить причиненный этим реальный ущерб, т.е. возмещению подлежит только реальный ущерб (расходы, которые лицо, чье право нарушено, произвело или должно будет произвести для восстановления нарушенного права, а также утрата или повреждение его имущества). Таким образом, упущенная выгода при нарушении договора энергоснабжения возмещению не подлежит. Бремя доказывания размера реального ущерба лежит на стороне, требующей возмещения убытков⁵.

Проблемными здесь представляются несколько вопросов:

1. Включение в текст договора раздела по качеству ЭЭ, не подлежит. Бремя доказывания размера реального ущерба лежит на стороне, требующей возмещения убытков⁶.

⁵Гражданский кодекс РФ.[Электронный ресурс]. URL: <http://stgkrf.ru/547>(дата обращения: 20.02.2019)

⁶Гражданский кодекс РФ.[Электронный ресурс]. URL: <http://stgkrf.ru/547>(дата обращения: 20.02.2019)

Проблемными здесь представляются несколько вопросов:

1. Включение в текст договора раздела по качеству ЭЭ.

Согласно ст. 330 ГК РФ предложение о включении в текст договора ответственности за снижение качества ЭЭ, в виде штрафа, пени или неустойки как средство обеспечения исполнения обязательства может быть установлена законом или договором. Так как законом в настоящее время обязательность ответственности не предусмотрена, в случае несогласия одной из сторон включить в текст договора условия по спорному пункту, т.е. если соглашение сторон не достигнуто, принудительно спорный пункт в текст договора включить невозможно.

2. Контроль качества ЭЭ.

В настоящее время обязательная сертификация ЭЭ проводится по двум показателям – частоте и медленным изменениям напряжения, причем при оценке отклонений напряжения используется лишь предельно допустимые значения, а нормально допустимые значения отклонения напряжения, которые ранее нормировались в ГОСТ 13109-97, в ГОСТ 32144-2013 отсутствуют. Таким образом, использовать информацию, полученную при сертификационных и контрольных испытаниях по всем установленным показателям, не представляется возможным.

Для того чтобы производить расчет скидок и надбавок необходима непрерывная информация от измерителей контроля качества ЭЭ и от счетчиков ЭЭ для определения объема некачественной ЭЭ. Эта задача может быть решена при использовании счетчиков ЭЭ одновременно фиксирующих показатели качества [11], либо на основании информации с систем непрерывного мониторинга качества ЭЭ [12]. Обязательное условие – они должны быть внесены в Госреестр средств измерений и эти приборы должны быть отражены в договорах на электроснабжение, с указанием мест их установки.

Формально у сторон имеется возможность оспорить результаты таких измерений, сославшись на то, что результаты получены не аккредитованной в установленном порядке испытательной лабораторией, имеющей право на составление экспертного заключения по проверке качества ЭЭ. Привлекать независимую аккредитованную лабораторию может оказаться неоправданно дорого. Но, как уже отмечено, это можно легко учесть в одном из условия в договоре электроснабжения о взаимном признании результатов измерений.

Третий путь представляется наиболее реалистичным для экономических условий РФ в настоящее время. Известны примеры, того, как предприятия, при отсутствии качественной энергии, несли огромные потери и вынуждены были за свой счет улучшать это качество, приобретая разнообразные регулирующие электротехнические устройства и даже создавая собственные автономные энергоснабжающие системы. Часто при этом требуется организовывать штат высококвалифицированных энергетиков и иметь много других проблем. Эта непрофильная для промышленных предприятий деятельность является нежелательной, технически и финансово часто малоэффективной.

Проблемы низкого качества встречаются на разных уровнях напряжения. Измерения, контроль, анализ и управление качеством ЭЭ, как показывает опыт, уже необходимо выполнять в системах электроснабжения на напряжениях 6, 10, 35 кВ и более высоковольтной области – 110 кВ и выше. В каждом отдельном случае, по согласованию с потребителем, может быть принято решение об использовании индивидуального или системного метода улучшающего качество ЭЭ.

Имеется отличие между понятиями «Качество ЭЭ» и «Непрерывность поставок ЭЭ». Непрерывность поставок характеризуется количеством и продолжительностью сбоев в поставках ЭЭ.

Анализ международного опыта по данному вопросу показывает, что согласно нормативам Совета Европейских Органов, регулирующих ЭЭ (CEER 2005) в Европе различают три аспекта качества:

- качество напряжения в соответствии с нормами;
- коммерческое качество (определяется индивидуальными договорными отношениями поставщика и потребителя ЭЭ);
- непрерывность, надежность, гарантированность поставок ЭЭ в соответствии с требованиями потребителя.

В мировой практике применяются различные индикаторы непрерывности поставок ЭЭ как для отдельных потребителей, так и для системы электроснабжения в целом.

Так, например, для систем передачи ЭЭ в Великобритании, Венгрии, Италии, Норвегии, Чешской Республике, Греции, Португалии, Франции, Литве, Швеции, Эстонии, Ирландии, Германии и Голландии используются следующие индикаторы: SAIFI «Индекс Средней Частоты Перебоев Электроснабжения для Системы» (количество в год) и SAIDI – «Индекс Средней Продолжительности Перебоев Электроснабжения для Системы» (минуты).

Заключение

Таким образом, для удовлетворения запросов потребителей ЭСО, следует провести расчеты по разработке стимулирующих тарифов для расчета за потребленную ЭЭ с учетом ее качества и непрерывности электроснабжения, премий для потребителей, участвующих в обеспечении высокого качества ЭЭ, надбавок к тарифам, применяемых к виновникам нарушения качества ЭЭ.

Расчеты необходимо провести и принять с участием всех заинтересованных сторон, включая территориальные комитеты по тарифам.

Тарифы должны учитывать затраты на поддержание оптимального для потребителей качества ЭЭ. Так как не существует единого универсального способа устранения проблем качества энергии, оптимальное технико-экономическое решение может быть выработано для каждой электроустановки, или группы электроустановок индивидуально.

Переход на стимулирующие дифференцированные по качеству и непрерывности электроснабжения тарифы позволит ряду предприятий с нетребовательными к качеству ЭЭ нагрузками уменьшить платежи, другим обеспечить выпуск качественной высокотехнологичной продукции, сетевым организациям более рационально проводить работы по повышению качества ЭЭ.

Литература

1. Добрусин Л.Н. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 30-35.
2. Наумов А.А. Некоторые аспекты энергосбережения в осветительной технике. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 5-6. С. 109-118.
3. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015, 7 с. Available at: URL <https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmale-der-spannung-in-offentlichelektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-en-50160-2010-p3a3-2017/>. Accessed to : 20.12.2018.
4. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and Signaling in public low-voltage power supply systems. 2000. 29 p.]. Available at: URL <https://webstore.iec.ch/publication/4229>. Accessed to: 20.12.2018.
5. Наумов А.А., Жуков В.Г., Кубарев Ю.Г. и др. Проблемы сертификационных и периодических испытаний качества электрической энергии по новому ГОСТу. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 3-4. С. 6-8.
6. Visyashev A.N. Assessing of the influence of power consumers and power supply organization on voltage distortion at the point of common coupling // Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future», Magdebur-Irkutsk: OvGU, 2012 V.1. pp. 23-30.
7. Федотов А.И., Абдуллазянов Э.Ю., Рылов Ю.А. Долевой вклад потребителей в изменение показателей качества электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 3-4. С. 108-112.
8. Кюленер Х.Д. Самостоятельная оценка качества электроэнергии. Энергосбережение. 2005. № 2. С. 84-89.
9. Соколов В.С., Ермилов М.А., Серков А.В. и др. Проблемы установления размера ответственности за ухудшение качества электрической энергии и пути их решения // Промышленная энергетика. 2000. № 8. С. 52-54.
10. Егоров М.Ю. Симметрирующее устройство с функцией симметричной коррекции напряжений / М.Ю. Егоров. Промышленная энергетика. М.: НТФ Энергопрогресс", 2018. № 5. С. 32-35.
11. Мустафа Г.М., Гусев. С.И. Особенности использования модульных многоуровневых преобразователей для нормализации показателей качества напряжения электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение. М.: 2018. № 4. С. 58-65.
12. Васильева О.А. Измерительные системы учета и контроля качества электрической энергии на основе трехфазных счетчиков нового поколения // Контроль, анализ и управление качеством электрической энергии. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. М.: 2014. С. 105-129.
13. Хрусталева Л.Л., Шишов В.А., Киреев С.И. и др. Непрерывный мониторинг параметров электрической энергии и инструментальная оценка дополнительных потерь в сетях низкого напряжения // Контроль, анализ и управление качеством электрической энергии. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. М.: 2014. С. 97-104.
14. Большов В.Е., Виноградов А.В. Моделирование электрической сети с системой мониторинга качества электроэнергии и надежности электроснабжения // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. №2(35). С. 3-10.

15. Лютаревич А.Г., Лейнерт В.В., Соколов Д.С. Анализ методов качества электроэнергии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 2019. №12. С. 126-130.

Автор публикации

Наумов Анатолий Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники», Казанский государственный энергетический университет.

Reference

1. Dobrusin LN. Quality of electrical energy quality and energy saving in Russia. *Ergoexpert*. 2008;4(9):30-35.
2. Naumov AA. Some aspects of energy saving in lighting technology. *Bulletin of the Higher Educational Institutions. Problemy Energetiki*. 2017;5-6:109-118.
3. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks; German version EN 50160:2010/A1:2015, 7 p. Available at: URL <https://www.en-standard.eu/din-en-50160-a3-merkmale-der-spannung-in-offentlichen-elektrizitatsversorgungsnetzen-deutsche-und-englische-fassung-en-50160-2010-pra3-2017/> Accessed to: 20.12.2018.
4. IEC 61000-2-2: Electromagnetic Compatibility (EMC); Pt 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems. 2000. 29p. Available at: URL <https://webstore.iec.ch/publication/4229> Accessed to: 20.12.2018.
5. Naumov AA, Zhukov VG, Kubarev YuG, et al. Certification and periodical tests by the new GOST of electric energy quality. *Bulletin of the Higher Educational Institutions. Problemy Energetiki*. 2012;3-4:6-8.
6. Visyashev AN. Assessing of the influence of power consumers and power supply organization on voltage distortion at the point of common coupling. *Proceedings «Smart Grid for Efficient Energy Power System for the Future»*, Magdeburg-Irkutsk: OvGU, 2012;1:23-30.
7. Fedotov AI, Abdullasyanov EYu, Rylov YuA. Share contribution in alteration of electrical energy quality indicators. *Bulletin of the Higher Educational Institutions. Problemy Energetiki*. 2006;3-4:108-112.
8. Kyulener HD. Independent evaluation of electrical energy quality. *Energy saving*. 2005;2:84-89.
9. Sokolov VS, Yermilov MA, Serkov AV, et all. Issues of the scope of responsibility procedure establishment for decrease of the electrical energy quality, and the ways of their settlement. *Promyshlennaya Energetika (Industrial Power Engineering)*. 2000;8:52-54.
10. Egorov MYu. Balancing device with symmetrical compensation of voltage function. *Industrial Power Engineering*. M.: NTF “Energoprogress”, 2018;5:32-35.
11. Mustafa GM, Gusev SI. Modular multilevel transformers application features for normalization of the electrical net voltage quality indicators. *Electrical energy. Transfer and distribution*. M.: 2018;4:58-65.
12. Vasilyeva OA. Measuring systems of accounting and monitoring of electrical energy quality on the basis of three-phase meters of the new generation. Monitoring, analysis and management of electrical energy quality. *Book of reports of the All-Russian science and technology conference*. M.: 2014. pp. 105-129.
13. Khrustalev LL, Shishov VA, Kireev SI. Continuous monitoring of electrical energy parameters and instrumental evaluation of additional losses in the low voltage nets. *Khrustalev Monitoring, analysis and management of electrical energy quality*. Book of reports of the All-Russian science and technology conference. M.: 2014. pp. 97-104.
14. Bolshov VE, Vinogradov AV. Electrical network simulation with the system of electrical energy quality monitoring and power supply reliability. *Electrical technology and electrical equipment in APK*. 2019;2(35):3-10
15. Lyutarevich AG, Leynert VV, Sokolov DS. Electrical energy quality analysis methods. *International magazine of applied and fundamental research works*. 2019;12:126-130.

Author of the publication

Anatoliy A. Naumov – Kazan State Power-Engineering University, the city of Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

01 апреля 2019г.



К ПРОБЛЕМЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Т.Т. Оморов., Б.К. Такырбашев., Р.Ч. Осмонова

Национальная академия наук, г. Бишкек, Кыргызская Республика

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5902-0220>, omorovtt@mail.ru

Резюме: Рассматривается несимметричная распределительная электрическая сеть в условиях функционирования автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Сформулирована задача идентификации ее математической модели в комплексной форме, которая сводится к определению фазовых сдвигов переменных (токов, напряжений), определяющих электрическое состояние трехфазной сети. Предложен метод ее решения, основанный на математических соотношениях, описывающих функциональные связи между переменными состояниями, и использовании алгоритмов параметрической оптимизации. Реализация процедуры идентификации модели распределительной сети осуществляется с непосредственным использованием исходных данных, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии. Метод можно использовать для решения ряда функциональных задач в составе АСКУЭ, ориентированных для диагностики состояний магистральной линии и мониторинга потерь электроэнергии в распределительной сети.

Ключевые слова: трехфазная сеть несимметрия токов и напряжений, параметрическая оптимизация, модель распределительной сети.

Для цитирования: Оморов ТТ, Такырбашев БК., Осмонова РЧ. К проблеме математического моделирования трехфазной несимметричной распределительной сети // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 93-102. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102.

TO THE PROBLEM OF MATHEMATICAL MODELLING OF THE THREE-PHASE ASYMMETRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh

National Academy of Sciences,

Bishkek, Kyrgyz republic

ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5902-0220>, omorovtt@mail.ru

Abstract: The asymmetrical distribution electric network is considered in the conditions of functioning of the automated meter reading and control system (AMRCS). The problem of identification of its mathematical model in a complex form which comes down to definition of phase shifts of the variables (currents, tension) defining an electric status of three-phase network is formulated. The method of its solution based on the mathematical ratios describing functional communications between state variables and use of algorithms of parameter optimization is offered. The realization of identification procedure of model of a distribution network is enabled with direct use of the basic data obtained on communication channels from subscriber's meters of the electric power. The method can be used for a solution of a number of functional tasks as a part of the AMRCS oriented for diagnostics of statuses of a trunk line and energy losses in a distribution network.

Keywords: three-phase network, asymmetry of currents and tension, parameter optimization, model of a distribution network.

For citation: Omorov TT, Takyrbashev BK, Osmonova RCh. To the problem of mathematical modelling of the three-phase asymmetrical distribution network. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):93-102. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-93-102.

Введение

В настоящее время в целях автоматизации распределительных электрических сетей (РЭС) напряжением 0,4 кВ широкое применение находят цифровые технологии в виде автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1]. Анализ показывает, что современные АСКУЭ, главным образом, предназначены для выполнения коммерческого учета электроэнергии, а ряд важных функциональных задач в их составе практически не решаются. В частности, это задачи диагностики состояний магистральной линии, включающие идентификацию несанкционированных отборов электроэнергии [2], обрывов силовых линий электропередач [3-5] и уровня износа магистральных линий РЭС. Также важным является решение задачи оптимизации режимов работы распределительных сетей, функционирующих в условиях несимметрии токов и напряжений [6-8], за счет симметрирования фазных нагрузок [9-12], что приводит к снижению технических потерь электроэнергии в сети. Таким образом, в существующих АСКУЭ не удается в полной мере использовать потенциальные возможности цифровых технологий, что не позволяет достичь достаточно высокий уровень технико-экономических показателей внедряемых автоматизированных систем и распределительных компаний. В связи с этим актуальным является разработка новых математических моделей и методов, ориентированных для повышения эффективности современных АСКУЭ. Они должны быть адаптированы к условиям работы РЭС с учетом фактора несимметрии. Известные подходы к идентификации моделей распределительных сетей [13-16] в условиях несимметрии токов и напряжений в недостаточной степени адаптированы для их применения в режиме реального времени.

В данной статье предлагается метод идентификации математической модели несимметричной РЭС, вычислительная схема которого базируется на измерительных данных АСКУЭ, полученных по каналам связи с абонентских счетчиков электроэнергии.

Постановка задачи

В качестве объекта рассматривается четырехпроводная РЭС, расчетная схема которой показана на рис.1.

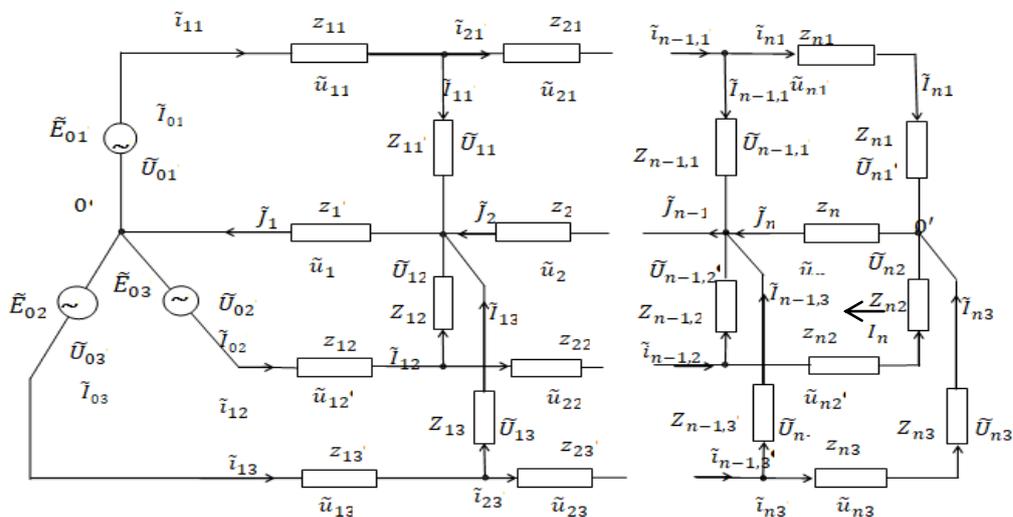


Рис.1. Расчетная схема трехфазной сети

Обозначения имеют следующий смысл: k, v – индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз A, B, C ($k = \overline{1, 3}$) и электрических контуров сети ($v = \overline{1, n}$); \tilde{E}_{0k} – ЭДС k -ой фазы; $\tilde{U}_{0k}, \tilde{I}_{0k} = \tilde{i}_{1k}$ – мгновенные синусоидальные напряжения и токи соответственно на входах соответствующих фаз; $\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}, Z_{vk}$ – синусоидальные мгновенные ток, напряжение и сопротивление нагрузки (электроприемника) с координатой (vk); \tilde{i}_{vk}, z_{vk} – мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го межабонентского участка (МАУ) k -ой фазы; $\tilde{u}_{vk}, \tilde{y}_v$ – напряжения соответственно на v -ом МАУ k -й фазы и нейтрального провода; \tilde{J}_v, z_v – мгновенный ток и комплексное сопротивление v -го участка нейтрального провода.

Далее предполагается, что выполняются следующие условия:

- распределительная сеть функционирует в штатном режиме;
- фазные и нейтральные провода сети имеют разные сечения;
- в системе используются технические средства для подавления высших гармонических составляющих токов и напряжений в сети;
- со счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети и в трансформаторной подстанции, в базу данных АСКУЭ по каналам связи в дискретные моменты времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ с шагом дискретизации $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ ($\xi = 1, 2, \dots$) поступают следующие данные:
- действующие значения токов I_{vk} и напряжений U_{vk} на нагрузках сети;
- коэффициенты мощности $c_{vk} = \cos \varphi_{vk}$, определяемые фазовыми сдвигами φ_{vk} между соответствующими напряжениями \tilde{U}_{vk} и токами \tilde{I}_{vk} $k = \overline{1, 3}$, $\nu = \overline{0, n}$.

Как известно, мгновенные синусоидальные переменные трехфазной сети ($\tilde{I}_{vk}, \tilde{U}_{vk}, \tilde{i}_{vk}, \tilde{J}_\nu$) и сопротивления на нагрузках (z_{vk}) в установившемся режиме можно представить в комплексной форме [14]:

$$\dot{I}_{vk} = I_{vk} e^{j(\beta_k + \alpha_{vk})} \quad (1)$$

$$\dot{U}_{vk} = U_{vk} e^{j(\beta_k + \psi_{vk})}$$

$$z_{vk} = \bar{Z}_{vk} e^{j\varphi_{vk}}, \nu = \overline{0, n}, k = \overline{1, 3}$$

$$i_{vk} = I_{vk} e^{j(\beta_{vk} + \tilde{\alpha}_{vk})}, \quad (2)$$

$$\dot{J}_\nu = \dot{i}_{\nu 1} + \dot{i}_{\nu 2} + \dot{i}_{\nu 3}, \nu = \overline{1, n},$$

где $I_{vk}, U_{vk}, \bar{Z}_{vk}, I_{vk}$ – модули комплексных переменных $\dot{I}_{vk}, \dot{U}_{vk}, z_{vk}, i_{vk}$ соответственно; $\alpha_{vk}, \psi_{vk}, \tilde{\alpha}_{vk}$ – приращения фазовых сдвигов соответствующих токов и напряжений относительно их базовых значений β_k , обусловленные несимметрией токов и напряжений в сети. При этом:

$$\varphi_{vk} = \psi_{vk} - \alpha_{vk}, \beta_k = 2(k-1)\pi/3.$$

Отметим, что действующие значения токов I_{vk} , напряжений U_{vk} , коэффициентов мощностей $c_{vk} = \cos \varphi_{vk}$ и модули сопротивлений \bar{Z}_{vk} являются известными величинами, которые определяются по данным счетчиков электроэнергии АСКУЭ. Таким образом, из выражений (1) и (2) видно, что задача построения математической модели трехфазной сетив комплексной форме сводится к идентификации приращений фазовых сдвигов α_{vk} и $\tilde{\alpha}_{vk}$, а также действующих значений (модулей) I_{vk} межабонентских токов i_{vk} ($\nu = \overline{0, n}, k = \overline{1, 3}$).

Метод решения задачи

Решение сформулированной задачи включает следующие основные этапы:

- оценка разностей фазовых сдвигов;
- определение действующих значений межабонентских фазных токов;
- идентификация фазовых сдвигов переменных трехфазной сети.

Оценка разностей фазовых сдвигов. Предположим, что в момент времени $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ путем опроса счетчиков электроэнергии в базу данных АСКУЭ поступили данные измерений, перечень которых приведен выше. Рассмотрим фазы трехфазной сети, показанной на рис.1. Эквивалентные сопротивления k -й фазы $z_{0k}^{\text{ЭКВ}} = z_{0k}$ можно вычислить по данным головного трехфазного счетчика электроэнергии:

$$z_{0k}^{\text{ЭКВ}} = \frac{\dot{U}_{0k}}{\dot{I}_{0k}} = \bar{Z}_{0k} e^{j\varphi_{0k}} = z_{0k}^{\text{B}} + jz_{0k}^{\text{M}}, \quad (3)$$

где: \bar{Z}_{0k} , φ_{0k} , z_{0k}^B , z_{0k}^M – модуль, аргумент, вещественные и мнимые части комплексной величины $z_{0k}^{ЭКВ}$ соответственно, определяемые по исходным данным задачи по формулам

$$\bar{Z}_{0k} = \frac{U_{0k}}{I_{0k}}, \quad \varphi_{0k} = \arccos c_{0k},$$

$$z_{0k}^B = \bar{Z}_{0k} \cos \varphi_{0k}, \quad z_{0k}^M = \bar{Z}_{0k} \sin \varphi_{0k}$$

С другой стороны для $Z_{0k}^{ЭКВ}$ можно записать следующие выражения:

$$z_{0k}^{ЭКВ} = z_{1k} + z_1 + z_{1k}^{ЭКВ}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

где:

$$z_{1k}^{ЭКВ} = \frac{\dot{U}_{1k}}{\dot{I}_{0k}} = \frac{\dot{I}_{1k} Z_{1k}}{\dot{I}_{1k}}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

Соотношения (4) с учетом выражения (5) можно записать в виде

$$\frac{\dot{I}_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = A_{1k}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где: A_{1k} являются известными комплексными величинами, которые определяются по формулам

$$A_{1k} = \frac{z_{0k}^{ЭКВ} - z_{1k} - z_1}{z_{1k}},$$

где: эквивалентные сопротивления $z_{0k}^{ЭКВ}$ вычисляются по выражениям (3).

Равенства (6) с учетом (1) и (2) при $\nu = 1$ имеют вид

$$\frac{I_{1k} e^{j(\beta_k + \alpha_{1k})}}{I_{1k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{1k})}} = A_{1k}, \quad k = \overline{1, 3}$$

что эквивалентно соотношениям

$$e^{j\lambda_{1k}} = B_{1k}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad (7)$$

где:

$$\lambda_{1k} = \alpha_{1k} - \tilde{\alpha}_{1k}, \quad (8)$$

$$B_{1k} = \frac{A_{1k} I_{1k}}{I_{1k}} = B_{1k}^B + jB_{1k}^M.$$

Теперь поставим задачу определения численных значений разностей фазовых сдвигов λ_{1k} . Для этой цели соотношения (7) запишем в тригонометрической форме:

$$\cos \lambda_{1k} + j \sin \lambda_{1k} = B_{1k}^B + jB_{1k}^M, \quad k = \overline{1, 3},$$

что эквивалентно следующим уравнениям относительно λ_{1k} :

$$\cos \lambda_{1k} = B_{1k}^e, \quad \sin \lambda_{1k} = B_{1k}^M, \quad k = \overline{1, 3}.$$

Отсюда получаем значения неизвестных величин λ_{1k} :

$$\lambda_{1k} = \arctg \frac{B_{1k}^M}{B_{1k}^e}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

Определение действующих значений межабонентских фазных токов. Для этой цели будем использовать найденные выше оценки λ_{1k} определяемые формулами (9). Как видно из рис.1 комплексные токи i_{2k} , протекающие через соответствующие межабонентские фазные провода сети, при $\nu = 2$ определяются выражениями

$$i_{2k} = i_{1k} - \dot{I}_{1k}, \quad k = \overline{1, 3}. \quad (10)$$

При этом для квадратов модулей (действующих значений) I_{2k}^2 комплексных токов i_{2k} можно записать следующие формулы:

$$\begin{aligned} I_{1k}^2 &= (i_{1k} - I_{1k})(i_{1k} - I_{1k})^* = (i_{1k} - I_{1k})(i_{1k}^* - I_{1k}^*) = \\ &= i_{1k}i_{1k}^* + I_{1k}I_{1k}^* - (i_{1k}I_{1k}^* + I_{1k}i_{1k}^*), \quad k = \overline{1,3}, \end{aligned} \quad (11)$$

– знак *обозначает комплексно-сопряженную величину соответствующей переменной. Нетрудно показать, что для их составляющих справедливы выражения:

$$\begin{aligned} i_{1k}^* i_{1k} &= I_{2k}^2, \quad I_{1k} I_{1k}^* = I_{2k}^2 \\ i_{1k} I_{1k}^* + I_{1k} i_{1k}^* &= I_{1k} I_{1k} (e^{j(\alpha_{1k} - \tilde{\alpha}_{1k})} + e^{-j(\alpha_{1k} - \tilde{\alpha}_{1k})}) = \\ &= I_{1k} I_{1k} (e^{j\lambda_{1k}} + e^{-j\lambda_{1k}}) = 2I_{1k} I_{1k} \cos \lambda_{1k}, \end{aligned}$$

где I_{1k}, I_{1k} –действующие значения токов, протекающих через соответствующие сопротивления Z_{1k} и z_{1k} .

В результате с учетом выражений (11) получаем формулы для оценки искомым действующих значений токов I_{2k} :

$$I_{2k} = \sqrt{I_{1k}^2 + I_{1k}^2 - 2I_{1k}I_{1k} \cos \lambda_{1k}}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (12)$$

Идентификация фазовых сдвигов переменных трехфазной сети. Для этой цели будем использовать балансовые соотношения (10), определяющие функциональные связи между межабонентскими фазными токами и токами соответствующих нагрузок. Равенства (10) с учетом выражений (1)и (2) запишем в виде

$$I_{2k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{2k})} = I_{1k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{1k})} - I_{1k} e^{j(\beta_k + \alpha_{1k})}, \quad k = \overline{1,3},$$

что равносильно соотношениям

$$I_{2k} e^{j\tilde{\alpha}_{2k}} = I_{1k} e^{j\tilde{\alpha}_{1k}} - I_{1k} e^{j\alpha_{1k}}, \quad k = \overline{1,3}, \quad (13)$$

Теперь из выражений (8) определяем α_{1k} :

$$\alpha_{1k} = \tilde{\alpha}_{1k} + \lambda_{1k}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (14)$$

Путем подстановки выражений для α_{1k} в соотношения (13) после несложных преобразований получаем

$$I_{1k} e^{j\tilde{\alpha}_{2k}} = F_{1k} e^{j\tilde{\alpha}_{1k}}, \quad k = \overline{1,3},$$

где F_{1k} – известная комплексная величина, которая вычисляется по формуле

$$F_{1k} = I_{1k} - I_{1k} e^{j\lambda_{1k}} = F_{1k}^B + jF_{1k}^M.$$

где F_{1k}^B и F_{1k}^M – ее вещественные и мнимые части соответственно.

Для определения неизвестных величин α_{2k} и α_{1k} последние соотношения запишем в тригонометрической форме:

$$I_{1k} (\cos \tilde{\alpha}_{2k} + j \sin \tilde{\alpha}_{2k}) = (F_{1k}^B + jF_{1k}^M)(\cos \tilde{\alpha}_{1k} + j \sin \tilde{\alpha}_{1k}), \quad k = \overline{1,3}.$$

которые можно представить в виде:

$$\begin{aligned} I_{2k} \cos \tilde{\alpha}_{2k} + j I_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k} &= \\ &= F_{1k}^B \cos \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^M \sin \tilde{\alpha}_{1k} + j(F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} + F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}), \quad k = \overline{1,3}. \end{aligned} \quad (15)$$

Теперь приравнявая соответствующие вещественные и мнимые выражения левых и правых частей последних равенств, получаем систему алгебраических уравнений, относительно искомым приращений фазовых сдвигов $\tilde{\alpha}_{1k}$ и $\tilde{\alpha}_{2k}$:

$$\begin{aligned} I_{2k} \cos \tilde{\alpha}_{2k} &= F_{1k}^B \cos \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^M \sin \tilde{\alpha}_{1k}, \\ I_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k} &= F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} + F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}, \quad k = \overline{1,3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Соотношение (16) представляет собой систему уравнений относительно компонентов вектор-параметра $\alpha = [\tilde{\alpha}_{1k}, \tilde{\alpha}_{2k}]$, для решения которой можно использовать известные численные методы [17, 18]. Один из возможных алгоритмов ее решения приведен в Приложении 1. В результате неизвестные фазовые сдвиги α_{1k} вычисляются по формулам (14). Полученный результат позволяет определить все переменные состояния начальных

участков ($\nu = 1$) трехфазной сети в комплексной форме. При этом межабонентские фазные токи определяются по формулам (2), т.е.

$$i_{1k} = I_{1k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{1k})}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (17)$$

а соответствующие напряжения

$$\begin{aligned} \dot{u}_{1k} &= i_{1k} z_{1k}, \\ \dot{U}_{0k} &= \dot{I}_{0k} z_{0k}^{\text{ЭКВ}} = i_{1k} z_{0k}^{\text{ЭКВ}}, \\ \dot{U}_{1k} &= \dot{I}_{1k} Z_{1k}, \quad k = \overline{1,3} \end{aligned} \quad (18)$$

Величина комплексного тока \dot{J}_1 , протекающего через начальный участок нулевого провода, вычисляется по следующей формуле:

$$\dot{J}_1 = i_{11} + i_{12} + i_{13},$$

а соответствующее напряжение

$$\dot{u}_1 = \dot{J}_1 z_1.$$

Далее рассматриваются участки трехфазной сети с координатами $(2, k)$, т.е. при $\nu = 1$. При этом будем считать, что на основе изложенной выше вычислительной процедуры найдены приращения фазовых сдвигов $\tilde{\alpha}_{1k}$ для соответствующих межабонентских фазных токов \tilde{i}_{2k} и их действующие значения I_{2k} . Тогда в соответствии с выражениями (2) оценки комплексных токов \dot{i}_{2k} вычисляются по формулам

$$i_{2k} = I_{2k} e^{j(\beta_k + \tilde{\alpha}_{2k})}, \quad k = \overline{1,3}, \quad (19)$$

где I_{2k} определяются выражениями (12).

Далее по известным значениям токов i_{2k} определяем оценки соответствующих комплексных напряжений \dot{u}_{2k} , \dot{u}_2 и тока \dot{J}_2 , протекающего через второй участок нулевого провода. Величины напряжений \dot{U}_{2k} на нагрузках, имеющих сопротивления Z_{2k} , определяются из балансовых соотношений для вторых контуров трехфазной сети (рис.1):

$$\dot{U}_{2k} = \dot{U}_{1k} - \dot{u}_{2k} - \dot{u}_2 = U_{2k} e^{j(\beta_k + \psi_{2k})}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (20)$$

Тогда комплексные токи \dot{I}_{2k} , протекающие через эти нагрузки Z_{2k} определяются по формулам

$$\dot{I}_{2k} = I_{2k} e^{j(\beta_k + \alpha_{2k})}, \quad (21)$$

где приращения фазовых сдвигов $\alpha_{2k} = \psi_{2k} + \varphi_{2k}$.

При этом значения межабонентских комплексных токов \dot{i}_{3k} вычисляются по выражениям (рис.1)

$$i_{3k} = i_{2k} - \dot{I}_{2k}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (22)$$

знание которых позволяет оценить величины напряжений \dot{u}_{3k} , \dot{u}_3 , \dot{U}_{4k} и токов \dot{I}_{4k} , \dot{J}_3 определяющих состояния контуров сети с координатами $(3, k)$.

Таким образом, продолжая изложенную выше вычислительную процедуру можно определить все комплексные переменные (токи, напряжения), определяющие электрическое состояние трехфазной сети, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений.

Заключение

Предложен новый метод идентификации математической модели четырехпроводной распределительной электрической сети, функционирующей в условиях несимметрии токов и напряжений. При этом переменные модели (токи, напряжения) представляются в комплексной форме, а в качестве исходной информации используются данные АСКУЭ. Проблема идентификации модели сводится к определению фазовых сдвигов ее переменных, определяющих электрическое состояние трехфазной сети. Получены математические соотношения, описывающие функциональные связи между переменными состояниями и параметрами трехфазной сети, а также алгебраические уравнения относительно искомым фазовых сдвигов. Для их нахождения вводится и минимизируется специально построенная критериальная функция на основе решения системы

обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. Полученные результаты ориентированы для решения задач диагностики состояний магистральной линии и мониторинга потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ.

Приложение

Для решения системы уравнений (16) будем использовать методику, предложенную в [19, 20] для синтеза систем автоматического управления. В соответствии с этой методикой на основе соотношений (16) вначале определяются ошибки идентификации $E_1(\alpha)$ и $E_2(\alpha)$:

$$\begin{aligned} E_1(\alpha) &= l_{2k} \cos \alpha_{2k} - F_{1k}^B \cos \tilde{\alpha}_{1k} + F_{1k}^M \sin \tilde{\alpha}_{1k}, \\ E_2(\alpha) &= l_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k} - F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} + F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}. \end{aligned} \quad (\text{П.1})$$

Далее для решения системы уравнений (П.1) в рассмотрение вводится квадратическая критериальная (штрафная) функция:

$$E(\alpha) = E_1^2(\alpha) + E_2^2(\alpha). \quad (\text{П.2})$$

В результате задача определения вектора $\alpha = [\tilde{\alpha}_{1k}, \tilde{\alpha}_{2k}]$, обеспечивающего решение системы уравнений (16), сводится к решению задачи минимизации:

$$\min_{\alpha \in R^2} E(\alpha) = E(\alpha^*), \quad (\text{П.3})$$

где R^2 – двумерное арифметическое пространство; $\alpha^* = [\tilde{\alpha}_{1k}^*, \tilde{\alpha}_{2k}^*]$ – вектор-параметр, обеспечивающий минимум критериальной функции $E(\alpha)$. Для того, чтобы найденный таким образом вектор-параметр α^* принять в качестве решения системы уравнений (16) достаточно выполнения следующего условия:

$$E(\alpha^*) < \delta, \quad (\text{П.4})$$

где δ – положительное число, близкое к нулю.

Для решения экстремальной задачи (П.4) используется следующее критериальное условие:

$$\int_0^t E \frac{dE}{dt} d\tau < 0, \quad (\text{П.5})$$

выполнение которого, обеспечивает минимизацию штрафной функции $E(\alpha)$ во времени t . Поиск искомых параметров на основе соотношений (П.5) осуществляется посредством уравнений адаптации компонентов вектора $\alpha = [\tilde{\alpha}_{1k}, \tilde{\alpha}_{2k}]$, во времени. Для получения этих уравнений вначале определяется производная штрафной функции:

$$\frac{dE}{dt} = 2E_1 \frac{dE_1}{dt} + 2E_2 \frac{dE_2}{dt} + 2E_3 \frac{dE_3}{dt}, \quad (\text{П.6})$$

При этом производные dE_1/dt , dE_2/dt и dE_3/dt можно вычислить на основе выражений (П.1):

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} &= (F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}) \frac{d\tilde{\alpha}_{1k}}{dt} - l_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k} \frac{d\tilde{\alpha}_{2k}}{dt}, \\ \frac{dE_2}{dt} &= (F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}) \frac{d\tilde{\alpha}_{1k}}{dt} - l_{2k} \cos \tilde{\alpha}_{2k} \frac{d\tilde{\alpha}_{2k}}{dt}, \end{aligned}$$

Подставляя полученные производные в выражение для dE/dt , определяемое формулой (П.6), получаем

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= 2 \left[E_1 (F_{1k}^B \sin \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^M \cos \tilde{\alpha}_{1k}) + E_2 (F_{1k}^M \sin \tilde{\alpha}_{1k} - F_{1k}^B \cos \tilde{\alpha}_{1k}) \right] \frac{d\tilde{\alpha}_{1k}}{dt} + \\ & 2 \left[E_2 l_{2k} \cos \tilde{\alpha}_{2k} - E_1 l_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k} \right] \frac{d\tilde{\alpha}_{2k}}{dt}. \end{aligned}$$

Теперь подставляя выражение для dE/dt в соотношение (П.5) на основе методики, изложенной в [19, 20], получаем следующие уравнения адаптации компонентов искомого вектор-параметра α :

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{\alpha}_{1k}}{dt} &= \gamma_1 f_{1k}(\alpha), \\ \frac{d\tilde{\alpha}_{2k}}{dt} &= \gamma_2 f_{2k}(\alpha), \\ \alpha^0 &= [\tilde{\alpha}_{1k}^0, \tilde{\alpha}_{2k}^0] \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

где α^0 значение вектора – параметра α в начальный момент времени $t_0 = 0$; $f_{1k}(\alpha)$, $f_{2k}(\alpha)$,

Функции определяемые по формулам:

$$f_{1k}(\alpha) = (E_1 F_{1k}^B + E_2 F_{1k}^M) \sin \tilde{\alpha}_{1k} - (E_1 F_{1k}^M + E_2 F_{1k}^B) \cos \tilde{\alpha}_{1k},$$
$$f_{2k}(\alpha) = E_1 l_{2k} \cos \tilde{\alpha}_{2k} - E_1 l_{2k} \sin \tilde{\alpha}_{2k},$$

где: γ_1, γ_2 – вещественные отрицательные числа, т.е. $\gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0$,

Далее определяем установившиеся решения системы дифференциальных уравнений (П.7):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\alpha}_{1k} = \tilde{\alpha}_{1k}^*, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\alpha}_{2k} = \tilde{\alpha}_{2k}^*.$$

В результате при выполнении условия (П.4) компоненты найденного вектора $\alpha^* = [\tilde{\alpha}_{1k}^*, \tilde{\alpha}_{2k}^*]$ являются оценками искомого приращений фазовых сдвигов, т.е. $\tilde{\alpha}_{1k} = \tilde{\alpha}_{1k}^*$, $\tilde{\alpha}_{2k} = \tilde{\alpha}_{2k}^*$.

Литература

1. Еремина М.А. Развитие автоматических систем коммерческого учета энергоресурсов (АСКУЭ) // Молодой ученый. 2015. №3. С. 135-138.
2. Сапронов А.А., Кужеков С.Л., Тынянский В.Г. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ // Известия вузов. Электромеханика. 2004. №1. С.55-58.
3. Ершов А.М., Филатов О.В., Молоток А.В. и др. Система защиты электрической сети напряжением 380В от обрывов воздушной линии // Электрический станции. 2016. №5. С.28-33.
4. Ключков А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2011. № 1. С. 221-223.
5. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К., Закиряев К.Э. К проблеме диагностики обрывов электрических линий трехфазных распределительных сетей в составе АСКУЭ // Электричество. 2018. №8. С.24-28.
6. Пономаренко О.И., Холиддинов И.Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. №12. С.6-8.
7. Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. №6. С. 8-12.
8. Авербух М.А., Жилин Е.В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. №6. С. 54-56.
9. Киселев М.Г., Лепанов М.Г. Симметрирование токов в сетях электроснабжения силовым электрическим регулятором неактивной мощности // Электротехника. 2018. №11. С.63-70.
10. Наумов И.В., Иванов Д.А, Подьячих С.В., и др. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом. Патент № 2490768 РФ. Бюлл. № 23. 20.08.2013.
11. Оморов Т.Т. Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 3. С. 194-200.
12. Оморов Т.Т., Такырбашев Б.К. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей // Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика. 2016. №6. С.11-15.
13. Кочергин С.В., Кобелев А.В., Хребтов Н.А., и др. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4кВ // Фрактальное моделирование. 2013. №1. С. 5-13.
14. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин А.В. Теоретические основы электротехники. Т.1. СПб.: Питер, 2009. 512 с.
15. Зеленский Е.Г., Кононов Ю.Г., Левченко И.И. Идентификация параметров распределительных сетей по синхронизированным измерениям токов и напряжений // Электротехника. 2016. №7. С. 3-8.
16. Степанов А.С., Степанов С.А., Костюкова С.С. Идентификация параметров моделей элементов электрических сетей на основе теоремы Теллегена // Электротехника. 2016. №7. С. 8-11.
17. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975. 632с.
18. Пшеничный Б.Н., Данилин Ю.М. Численные методы в экстремальных задачах. М.: Наука, 1975. 319 с.
19. Оморов Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез законов управления взаимосвязанными электроприводами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №10. С. 10-13.

20. Оморов Т.Т., Кожекова Г.А. Синтез системы управления синхронным генератором // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №1. С. 5-9.

Авторы публикации

Оморов Туратбек Турсунбекович – д-р техн. наук, член-корреспондент НАН КР, заведующий лабораторией «Адаптивные и интеллектуальные системы», Институт автоматики и информационных технологий, Национальная академия наук Кыргызской Республики (НАН КР).

Осмонова Рима Чынарбековна – млад. науч. сотр. лаборатории «Адаптивные и интеллектуальные системы», Институт автоматики и информационных технологий НАН КР.

Такырбашев Бейшеналы Касымалиевич – ведущий инженер лаборатории «Адаптивные и интеллектуальные системы», Институт автоматики и информационных технологий НАН КР.

References

1. Eremina MA. Development of automatic systems for commercial accounting of energy resources (AMRMS). *Molodoj uchenyj*. 2015;3:135-138.
2. Sapronov AA, Kuzhekov SL, Tynjanskij VG. Expedient identification of uncontrollable electricity consumption in electric networks up to 1 kV. *News of higher education institutions. Electromecanics*. 200;1:55-58.
3. Ershov AM, Filatov OV, Molotok AV. System of protection of an electrical network of 380В against breaks of an air-line. *Elektricheskie stancii*. 2016;5:28-33.
4. Klochkov AN. The device for detection of three-phase networks with break of a phase wire. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2011;1:221-223.
5. Omorov TT, Takyrbashev BK, Zakiriayev KE. On the Problem of Diagnosing Open-Circuit Faults of Electric Lines in Three-Phase Distribution Networks. *Electricity*. 2018;8:24-28.
6. Ponomarenko OI, Holiddinov II. Influence of the asymmetrical modes on losses of power in electrical networks of the distributed systems of power supply. *Energetik*. 2015;1:6-8.
7. Kosouhov FD, Vasilev NV, Filippov AO. Decrease in losses from asymmetry of currents and improvement of quality of electric energy in networks of 0,38 kV with household loadings. *Electrical Equipment*. 2014;6:8-12.
8. Averbuh MA, ZHilin EV. About losses of the electric power in systems of power supply of individual housing construction. *Energetik*. 2016;6:54-57.
9. Kiselev MG, Lapanov MG. Balancing currents in power supply networks with a power electric regulator of inactive power. *Elektrotehnika*. 2018;11:63-70.
10. Naumov IV, Ivanov DA, et al. *The symmetrizing device for three-phase networks with a zero wire*. Pat.№ 2490768 (RF). Byull. № 23. 20.08.2013.
11. Omorov TT. Balancing of the Distributed Electrical Network by Method of Digital Regulation. *Mechatronics, automation, management*. 2018;19(3):194-200.
12. Omorov TT, Takyrbashev BK. To a problem of optimization of asymmetrical working hours of distributive networks. *Devices and systems: Management, Control, Diagnostics*. 2016;6:11-15.
13. Kochergin SV, Kobelev AV, Hrebtov NA, et al. Modeling of rural distributive electric networks 10/0,4 of kV. *Fractal simulation Publ*. 2013;15-13.
14. Demirchjan KS, Nejman LR, Korovkin AV. *Theoretical foundations of electrical engineering*. 2009;1:512.
15. Zelenskii EG, Kononov SA, Kostyukova SS. Identification of parameters of distribution networks by synchronized current and voltage measurements. *Russian Electrical Engineering*. 2016;87(7):363-368.
16. Stepanov AS, Stepanov SA, Kostyukova SS. Identification of parameters of models of electric network elements on the basis of tellegen's theorem. *Russian Electrical Engineering*. 2016;87(7):369-372.
17. Bahvalov NS. *Numerical methods*. M.: The science, 1975. 632p
18. Pshenichnyi BN, Danilin UM. *Numerical methods in extreme*. M.: The science, 1975. 319 p.
19. Omorov TT, Kojekova GA. Synthesis of the laws of control of the interconnected electric drivers. *Devices and systems: Management, Control, Diagnostics*. 2009;10:10-13.
20. Omorov TT, Kojekova GA. Synthesis of control system by the synchronous generator. *Devices and systems: Management, Control, Diagnostics*. 2011;5(91):5-9.

Authors of the publication

Turatbek T. Omorov – National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz republic.

Rima Ch. Osmonova – National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz republic.

Beishenaly Takyrbashev – National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz republic.

Поступила в редакцию

12 апреля 2019г.



ОБ ОБЪЕДИНЕНИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО И СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ЗДАНИЯ ДЛЯ ЗАНЯТИЙ ВОДНЫМИ ВИДАМИ СПОРТА

С.В. Гужов

"Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

GuzhovSV@yandex.ru

Резюме: Прогнозирование спроса на тепловую энергию энергетическими комплексами зданий и сооружений является актуальной задачей. Для достижения необходимой точности расчёта принято использовать различные детерминированные способы, опирающиеся на имеющиеся изменяющиеся и мало изменяющиеся данные об объекте исследования. Вместе с этим статистические данные могут использоваться и при анализе стохастическими методами. Целью настоящей статьи является анализ вопроса допустимости объединения детерминированного и стохастического подходов с целью повышения точности расчёта. Показаны формулы расчёта составляющих расходной части теплового баланса на примере здания для занятий водными видами спорта. На основании приведённых формул проведён расчёт с ежемесячной дискретизацией в период с января 2009г. по январь 2019 г. Приведён пример расчёта точности прогноза спроса на тепловую энергию посредством многофакторного регрессионного анализа и применения искусственных нейронных сетей. На основании этих же данных проведено обучение искусственной нейронной сети по семи различным факторам: шести независимым и седьмым – идеализированным значением тепловых потерь здания через ограждающие конструкции. На примере анализа здания для занятий водными видами спорта показана недопустимость описанного подхода в случае использования в детерминированном и стохастическом способе одних и тех же исходных данных. Результаты: точность прогноза, выполненного с применением регрессионного анализа возрастает с увеличением числа факторов. Однако использование в стохастическом методе дополнительной группы факторов, например, численно являющихся обработанными климатическими данными, уже используемыми в качестве исходных, приведёт к необоснованному завышению значимости дважды используемого фактора. Присутствие в прогнозных моделях с применением искусственных нейронных сетей коллинеарности и мультиколлинеарности переменных не сказывается негативно на прогнозе. Вывод: объединение детерминированного и стохастического подходов при составлении прогнозного теплового баланса путём использования в детерминированном подходе только тех же входных данных, что используется в стохастическом подходе, является недопустимым.

Показано преимущество моделей расчётов потребности в спросе на энергоресурсы энергетическим комплексом с искусственными нейронными сетями относительно моделей, использующих многофакторный регрессионный анализ.

Ключевые слова:

сопоставимые условия; многофакторная регрессия; прогнозирование; спрос на тепловую энергию; искусственная нейронная сеть; погрешность

Благодарности: Работа выполнена по результатам проекта РНФ № 16-19-20568 «Исследование общих закономерностей и особенностей развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условиях».

Для цитирования: Гужов С.В. Об объединении детерминированного и стохастического подходов при прогнозировании теплового баланса здания для занятий водными видами спорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 103-112. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-103-112.

ABOUT COMBINING DETERMINATED AND STOCHASTIC APPROACHES FOR PREDICTION OF THE HEATING BALANCE OF THE BUILDING FOR WATER SPORTS

S.V. Guzhov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia
GuzhovSV@yandex.ru

Abstract: Forecasting the demand for thermal energy by energy complexes of buildings and structures is an urgent task. To achieve the necessary accuracy of the calculation, it is customary to use various deterministic methods based on the available changing and slightly changing data about the object of study. At the same time, statistical data can also be used in analysis by stochastic methods. The purpose of this article is to analyze the question of the admissibility of combining deterministic and stochastic approaches in order to increase the accuracy of the calculation. Formulas for calculating the components of the expenditure part of the heat balance are shown on the example of a building for water sports. Based on the above formulas, a calculation with a monthly discretization in the period from January 2009 is carried out. until January 2019. An example is given of calculating the accuracy of the forecast of demand for thermal energy through multivariate regression analysis and the use of artificial neural networks. Based on the same data, an artificial neural network was trained on seven different factors: six independent and seventh — the idealized value of the building's heat loss through the building envelope. An example of the analysis of a building for practicing water sports shows the inadmissibility of the described approach if the same initial data are used in the deterministic and stochastic method. Results: the accuracy of the forecast made using regression analysis increases with an increase in the number of factors. However, the use of an additional group of factors in the stochastic method, for example, which are numerically processed climate data that are already used as initial data, will lead to an unreasonable overestimation of the significance of the twice used factor. The presence in the predictive models using artificial neural networks of collinearity and multicollinearity of variables does not negatively affect the forecast. Conclusion: the combination of the deterministic and stochastic approaches in preparing the predicted heat balance by using only the same input data that is used in the stochastic approach in the deterministic approach is unacceptable.

Keywords: comparable conditions; multivariate regression; forecasting; demand for thermal energy; artificial neural network; error

Acknowledgments: The work was carried out according to the results of the RSF project No. 16-19-20568 "Study of the general laws and features of the development of urban energy systems in various socio-economic and natural-climatic conditions".

For citation: Guzhov S.V. About combining determinated and stochastic approaches for prediction of the heating balance of the building for water sports. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):103-112. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-103-112.

Введение

Техническое и энергетическое хозяйство современных энергетических комплексов и систем (ЭСиК) следует исследовать как большую и сложную систему, т.к. оно состоит из значительного количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов и составляет единое целое. Формулирование прогнозного спроса на энергоресурсы для энергокомплекса здания занятий водными видами спорта является актуальной задачей в свете необходимости определения перечня целесообразных на объекте энергосберегающих мероприятий (ЭСМ). Незначительные объёмы капитальных вложений и критика зачастую неудовлетворительного состояния инженерных коммуникаций с неизбежностью ставят вопрос о научном построении систем: нужно не только выбрать наиболее подходящий агрегат, но и правильно его смонтировать, а также обсуживать посредством привлечения квалифицированного персонала. В рамках настоящей статьи рассматривается вопрос

допустимости объединения детерминированного и стохастического подходов при составлении прогнозного теплового баланса на примере зданий для занятий водными видами спорта.

Оценить энергосберегающий эффект после внедрения ЭСМ достаточно сложно, т.к. расчётные данные по ожидаемому снижению удельных расходов приводятся, как правило, только для модернизируемого участка, а не ЭСМК в целом. Затраты на капитальный ремонт основных фондов теплотехнического оборудования потребителей и сетей растут с увеличением срока эксплуатации. Различные эксплуатирующие организации сталкиваются с проблемой роста накладных расходов, вызванных в т.ч. обслуживанием и ремонтом теплотехнического оборудования.

Актуальность задачи прогнозирования потребления энергоресурсов для отечественной электроэнергетики подтверждается и обширным списком научных работ, проведенных российскими исследователями. Следует отметить опубликованные за последние годы следующие работы Грицай А.С. [1], Абдурахманов А.М. [2, 3], Соломахо К.Л. [4, 5, 6], Хуссейн А.З., Кошарная Ю.В. [7, 8]; Гофман А.В. [9], Валь П.В. [10] и иностранных [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] авторов. При расчёте тепловой энергии, необходимой для отопления здания, в ряде случаев допустимо использовать упрощённые формулы:

$$Q_{зд}^{об} = \left(\frac{P}{S} + \frac{1}{H} \right) \frac{1,1t_0}{K_1} + \frac{1,1P}{S} K_2 \frac{0,7\mu \cdot H \cdot S^2}{P \cdot h} \cdot \Delta t + t_B \cdot \rho_0 \cdot C_0 \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n [K_{ni} \cdot V_{bi}] \quad (1)$$

где K_1 – расчётный коэффициент: $K_1 = \frac{1}{\alpha_H} + \frac{\delta_{ЖБ}}{\lambda_{ЖБ}} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{1}{\alpha_{ВН}}$; $Q_{р.о}$ – расчетное значение

$Q_{отопл}$, ккал/ч; K_2 – расчётный коэффициент: $K_2 = \left[\frac{1}{\alpha_H} + R_{OK} + \frac{1}{\alpha_{ВН}} \right]^{-1}$; $t_{вн}$ – расчетное

значение температуры воздуха внутри здания; $t_{р.о}$ – расчетное значение температуры воздуха снаружи здания, рассчитываемая для системы отопления как средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки; $t_{р.в}$ – расчетное значение температуры принимаемая для системы вентиляции как средняя температура воздуха наиболее холодного периода; $\alpha_H = 23 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha_{ВН} = 8,7 \text{ Вт/м}^2$ – коэффициенты теплоотдачи к стене соответственно от наружного и внутреннего воздуха; R_{OK} – термическое сопротивление стекла, $\delta_{ЖБ}$ – толщина железобетонной панели, м; $\lambda_{ЖБ}$ – теплопроводность железобетонной панели, Вт/м^2 ; $\delta_{шт}$ – толщина штукатурки, м; $\lambda_{шт}$ – теплопроводность штукатурки, Вт/м^2 ; h – средняя высота одного этажа включая толщину перекрытия; μ – коэффициента освещенности; S – площадь застройки; H – высота здания с перекрытием; P – периметр здания по наружному обмеру; $\Pi_{пт}$, $\Pi_{пл}$ – коэффициенты уменьшения расчетной разности температур для потолка верхнего и пола нижнего этажей соответственно.

Расчёт расхода тепловой энергии для системы вентиляции здания:

$$Q_{рв} = C_0 \cdot \rho_0 \cdot (t_{п} - t_{рв}) \sum_{i=1}^n [K_{ni} \cdot V_{bi}] \text{ ккал/ч}, \quad (2)$$

где K_{ni} (обм/ч) – кратность воздухообмена; V_{bi} (м^3) – внутренний объем, n – численность помещений в здании; ρ_0 – плотность воздуха при $t_{вн}$, кг/м^3 ; C_0 – удельная теплоемкость приточного газа, $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; $t_{п}$ – средняя температура приточного газа, прошедшего процедуру нагрева, $^\circ\text{C}$.

Материалы и методы

При проведения уточнённых расчётов теплотерь и тепловыделений необходимо использовать более детализированные подходы. Вместе с тем, детальный расчёт составляющих топливно-энергетического баланса (ТЭБ) неминуемо приводит к необходимости учёта определения множества показателей здания, получить которые зачастую не представляется возможным.

На практику прогнозирования W^0 накладывается жесткая система ограничений. Ранее рассмотрены несколько основных способов методов научно-технического прогнозирования, основанные на методах экстраполяции, экспертных оценках и формульном моделировании. Также показана непригодность данных методов по причинам:

- линейности трендов влияющих факторов;
- существенном загроблении результатов детерминированного расчета при анализе ЭСМК крупного и регионального уровня;

– подчинения рядов статистических данных негауссовым устойчивым распределениям с бесконечной дисперсией негауссовых распределений, приводящих к увеличению разброса средней величины, по сравнению с гауссовыми законами, что делает некорректным применение таких методов как метод простой экстраполяции, а также статистических методов, основанных на предположении нормальности закона распределения случайной величины.

Обзор и фактическое положение показывают определённое отставание в теплоэнергетике и теплотехнике современных методов прогнозирования. В теплотехнике в целом ранее формулировалась задача составления прогнозных ТЭБ для различных уровней иерархии и различных интервалов времени, но данная задача явно не решалась в свете новых задач внедрения широкого набора *smart*-технологий и транслируемых ими значительных объёмов информации, транспонируемых в *bigdata*.

Для составления предиктивных балансов ТЭР региональных ЭСЦ применение нейронных сетей мало возможно в силу относительно небольшого набора достоверных влияющих факторов. Поэтому для данного уровня теплотехнических систем наиболее целесообразно применить многофакторный регрессионный анализ.

Определение матрицы или отдельных её строк для момента времени t или в зависимости от заданного набора технологических, технико-экономических, климатических, социальных и прочих показателей выполнялось с помощью специализированного программного обеспечения. Параметры распределения случайной величины $x(t)$ существенно зависят от момента времени наблюдения t таких, что значения $x(t_i)$ и $x(t_j)$ в два различных момента времени $t = t_i$ и $t = t_j$ взаимозависимы.

Прогнозируемый на период $(t+1)$ показатель, характеризующий протекающий во времени процесс, в общем случае может являть функцией от четырёх переменных: развитие процесса в прошлом периоде; исходная величина текущего развития в момент времени t , независимая от развития в прошлом; компоненты процесса, независимые от развития в прошлом и исходной величины (эвристические компоненты); случайные величины (шум).

Сглаживание временных рядов производится посредством оценки детерминированной компоненты, параметры которой в большинстве случаев легко интерпретируются. Оценивается также вариация прогноза и коэффициент расхождения. Для нахождения тесноты линейной связи между отдельными элементами матрицы целесообразно определить линейные коэффициенты корреляции. При необходимости рекомендуется использовать метод наибольшего правдоподобия и оценки по Фишеру и Стьюденту. В отдельных случаях – выполнять исключение тренда из временных рядов показателей и факторов, выявлять временной лаг влияния факторов на выходной показатель, проверять наличие мультиколлинеарности.

Для примера, рассмотрим алгоритм объединения детерминированного и стохастического расчётов теплового баланса здания для занятий водными видами спорта.

I. Расчет тепловых потерь через светопрозрачные и светонепрозрачные ограждающие конструкции осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{огр},i} = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n_i \cdot (1 + \Sigma\beta) \cdot F_{\text{огр}} / R_o \cdot k, \quad (3)$$

где $t_{\text{в}}$ – температура внутреннего воздуха около i -го ограждения; $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха (или температура более холодного помещения), если разница температур более 5°C ; $F_{\text{огр},i}$ – расчетная площадь i -го ограждения, м^2 ; n_i – коэффициент, учитывающий ориентацию наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху ($n = 1$ – для наружных стен; $n = 0,9$ – для чердачных перекрытий); $\Sigma\beta$ – суммарный коэффициент добавочных потерь (для вертикальных ограждений, обращенных на север, северо-восток, северо-запад, восток $\beta = 0,1$; юго-восток и запад $\beta = 0,05$; в угловых помещениях $\beta = 0,05$, если хоть одно из них обращено на север, северо-запад, северо-восток, восток; в остальных случаях $\beta = 0,1$); $R_{o,i}$ – полное термическое сопротивление i -го ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$; $k_{\text{изн}}$ – коэффициент износа здания, принимаем $k_{\text{изн}} = 1$.

В угловых помещениях повышают расчетную температуру внутреннего воздуха на 2°C и добавку в 5% не вводят. Для двойных дверей с тамбуром между ними добавочные тепловые потери составляют: $\beta = 0,27\text{H}$.

II. Расчет тепловых потерь через крышу осуществляется по формуле:

$$Q = F_{\text{огр}} \cdot k \cdot \Delta T, \quad [\text{Вт}] \quad (4)$$

где $F_{\text{огр}}$ – площадь наружного ограждения (м^2); k – коэффициент теплопередачи через наружные ограждения [$\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]; ΔT – разность температур воздуха внутри помещения и снаружи здания ($^\circ\text{C}$).

III. Расчет тепловых потерь на инфильтрацию осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{инф}} = C_v \cdot (t_v - t_n) \cdot \Sigma l \cdot q_{\text{инф}} \cdot a, \quad (5)$$

где l , м – длина щелей притворов; a – поправочный коэффициент в зависимости от характера притвора; $q_{\text{инф}}$ – количество воздуха, поступающего через 1 м длины щели в зависимости от скорости ветра; $C_v = 1,005$ [кДж/(кг·К)] – удельная теплоемкость воздуха.

IV. Расчет теплопритоков через остекление от солнечной радиации:

$$Q_{\text{радост}} = F_{\text{ост}} \cdot A_{\text{ост}} \cdot q_{\text{ост}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{ост}}$ – поверхности остекления, м²; $q_{\text{ост}}$ – объем солнечной радиации через 1 м² остекления, существенно зависящий от ориентации по сторонам света, Вт/м²; $A_{\text{ост}}$ – коэффициент характеристики остекления.

V. Расчет теплопритоков от магистралей системы отопления и горячего водоснабжения (ГВС) осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{т.от.}} = k \cdot \pi \cdot d_{\text{ни}} \cdot l_i \cdot (1 - h_{\text{ни}}) \cdot (t_{\text{ми}}^{\text{ГБ}} - t_o), \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопередачи трубопровода (для неизолированного $k = 12$ Вт/(м²·К)); l_i – длина участка, м; $d_{\text{ни}}$ – наружный диаметр трубопровода; $h_{\text{ни}}$ – эффективность тепловой изоляции; t_o – температура окружающей среды в помещении; $t_{\text{ми}}^{\text{ГБ}}$ – средняя температура горячей воды на участке.

VI. Расчет тепловых потерь с вентиляцией осуществляется по формуле:

$$Q_l = 0,35 \cdot 0,89 \cdot n \cdot V \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где Q_l – мощность, требуемая для компенсации тепловых потерь с вентиляцией [Вт]; 0,35 – удельная теплоемкость воздуха; n – кратность воздухообмена в час; V – кубатура помещения, м³; 0,89 – коэффициент перехода тепла из воздухопроводов обратно в помещение (за подшивным потолком); Δt – разность температур, °С.

VII. Расход теплоты на подогрев приточного воздуха за отопительный период осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{прит.возд}} = c_v \cdot r_{\text{возд}} \cdot V_{\text{возд}} \cdot (t_{\text{вн.}} - t_{\text{отоп.пер.}}) \cdot z, \quad (9)$$

где $c_v = 1,005$ кДж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воздуха; $r_{\text{возд}}$ – средняя плотность приточного воздуха за отопительный период, кг/м³.

VIII. Система водоснабжения и канализации: тепловыделения в душевых комнатах, от ГВС в рукомойниках зависят от количества посетителей:

$$Q_{\text{душ}} = G_{\text{вд}} \cdot \frac{(t_{\text{rn}} - t_{\text{xn}})}{n \cdot J} \quad (10)$$

где $G_{\text{вд}}$ – удельный расход воды в душе, м³/с; t_{rn} – температура горячей воды в кране, °С; t_{xn} – температура холодной воды в кране, °С; n – количество посетителей душевой, ед.; τ – время использования душа, с.

IX. Тепловые поступления от персонала и от посетителей проводится по формуле:

$$Q_{\text{персонал}} = (\Sigma Q_{\text{муж}} + \Sigma Q_{\text{жен}} + \Sigma Q_{\text{дет}}) / T_{\text{раб}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{выд}}$ – выделяемое тепло 1 человеком; $n_{\text{м}}$ – количество мужчин; $n_{\text{ж}}$ – количество женщин; $T_{\text{раб}}$ – продолжительность рабочего дня; женщины примерно выделяют 85% тепла от количества тепла, выделяемого мужчиной, а дети до 12 лет – 75%.

X. Тепловые поступления от пловцов проводится по следующему алгоритму. Влагодоступления от пловцов:

$$W_{\text{пл}} = q \cdot n \cdot (1 - 0,33) \quad (12)$$

где 0,33 – доля времени, проводимая пловцами в бассейне.

Испарение влаги с поверхности бассейна определяется по формуле:

$$W_6 = \frac{A \cdot F \cdot \sigma_{\text{исп}} \cdot (d_w - d_n)}{1000} \quad (13)$$

где A – опытный коэффициент, учитывающий интенсификацию испарения с поверхности воды при наличии купающихся по сравнению со спокойной поверхностью. Для оздоровительных плавательных бассейнов $A = 1,5$; $\sigma_{\text{исп}}$ – коэффициент испарения, кг/м²·ч; $\sigma_{\text{исп}} = 25 + 19 \cdot V$, где V – подвижность воздуха над ванной бассейна из условий комфорта для обнаженных людей это значение должно лежать в пределах от 0,1 – 0,2 м/с;

Суммарное поступление влаги определяется по формуле:

$$\Sigma W = W_{\text{пл}} + W_6, \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad (14)$$

Полное тепло определяется по формуле:

$$\Sigma Q_{\text{п}} = Q_{\text{скр.б}} + Q_{\text{скр.пл}} + 3,6 \cdot \Sigma Q_{\text{я}} \quad (15)$$

Скрытая теплота, удаляемая с испаряемой влагой с поверхности бассейна:

$$Q_{\text{скр.б}} = W_6 \cdot (2501,3 - 2,33 \cdot t_{\text{пов}}), \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} \quad (16)$$

Скрытая теплота пловцов:

$$Q_{\text{скр.пл}} = k_{\text{п}} \cdot n \cdot (q_{\text{пол}} - q_{\text{явн}}) \cdot 3,6, \frac{\text{кДж}}{\text{ч}} \quad (17)$$

где $k_{\text{п}} = 0,67$ – коэффициент пребывания людей вне бассейна.

Результаты

Результат расчёта – расходная часть теплового энергобаланса для хорошо изученного объекта – здания для занятий водными видами спорта с достаточно подробной статистикой за 10 лет [18]. Нетрудно заметить, что для разных месяцев различия суммарных теплопотерь и суммарных теплопритоков колеблются в пределах от 2,54% до 97,48% [19].

В некоторых случаях, когда теплофизические характеристики отдельных элементов здания могут быть недоступны без специальных дополнительных исследований, выполнение не только уточнённого расчёта по формулам (3)–(17), но и упрощённого по формулам (1)–(2) станет невозможным для ЭСиК в условиях недостаточности данных.

Приведённый алгоритм наравне с достаточной для достижения требуемой точности расчёта наглядно демонстрирует малоприспособность его практического использования в виду невозможности в условиях эксплуатации объекта достоверно определить все требуемые для расчёта по формулам (3)–(17) параметры. Очевидно, формулирование прогнозной функции даже и по упрощённым формулам (1)–(2) для ЭСиК в условиях недостаточности данных выполнить затруднительно. Таким образом, применение стохастического подхода при формулировании функций прогнозного спроса на энергетические ресурсы не только возможно, но и необходимо.

Результаты расчёта прогнозной функции теплопотребления зданием посредством многофакторного регрессионного анализа (МФРА) приведены на рис. 1. В качестве входных данных приняты факторы: №1 – среднемесячная температура; №2 – абсолютная влажность воздуха; №3 – ежемесячный объём потребления электрической энергии; №4 – ежемесячное число посетителей; №5 – ежемесячное число часов работы саун; №6 – среднемесячная температура воздуха на бортике бассейна; №7 – средние ежемесячные расчётные теплопотери через ограждающие конструкции.

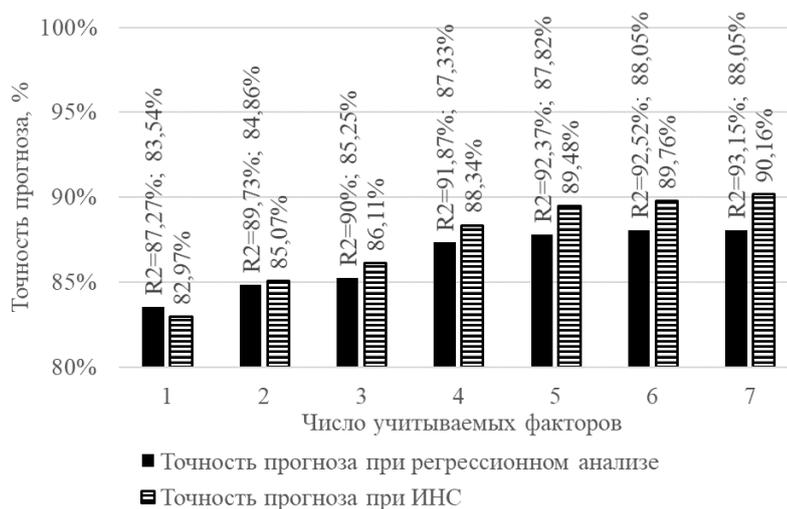


Рис. 1. Результаты расчёта прогнозной функции теплопотребления зданием бассейна НИУ «МЭИ» посредством регрессионного многофакторного анализа

В расчётах использовалась нейронная сеть с линейной нормализацией входных и выходных данных, одним скрытым слоем из 15 нейронов, функции активации – сигмоидные.

Обсуждение

Точность прогноза, выполненного с применением регрессионного анализа возрастает с увеличением числа факторов. Но точность не возрастает при включении в расчёт данных, полученных на основании детерминированного расчёта с использованием тех же исходных данных: значение 88,05% как для расчёта по шести факторам, так и по 7 в состав которых входит фактор «средние ежемесячные расчётные теплопотери через ограждающие

конструкции», полученный расчётным путём на основании первых шести факторов. Это свидетельствует о коллинеарности и мультиколлинеарности [20] нескольких переменных.

Точность прогноза, выполненного с применением ИНС при числе анализируемых факторов более 1 всегда оказывается выше, чем точность, полученная с применением многофакторного регрессионного анализа. Особого внимания заслуживает факт увеличения точности расчёта при расчётном эксперименте 7 относительно результатов расчётного эксперимента 6. В случае применения коллинеарных данных точность прогноза ИНС немного возрастает в то время как точность МфРА в таких же условиях снижается (рис. 2).

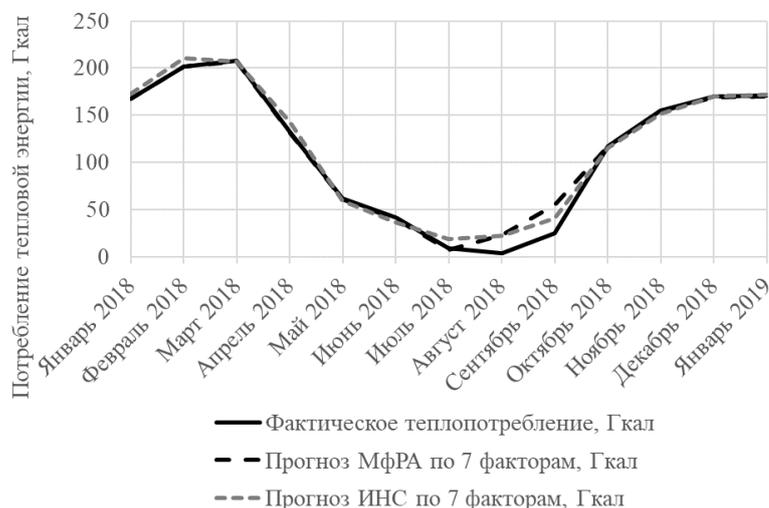


Рис. 2. График фактических и прогнозных суммарных теплопритоков за период с января 2009г. по январь 2019г. бассейном НИУ «МЭИ»

Заключение

Поставленная в настоящей статье задача определения возможности объединения детерминированного и стохастического подходов имеет негативное решение. Частные мнения о существенном повышении точности расчёта при условии имплементации в статистическую модель результатов расчётов на основе формул, полученных с достаточным уровнем достоверности, верно лишь отчасти. Выполненный анализ показал, что увеличение числа входных факторов не приводит к снижению точности прогноза. И при регрессионном анализе, и в ИНС присутствие неактуальных для прогнозной модели данных нивелируется снижением коэффициентов приданных переменных.

Кроме того, формулы (1)–(2) упрощённого расчёта и (3)–(17) более детализированного детерминированного расчёта теплопоступлений являются линейными законами. Оба подхода с качестве исходных данных используют мало изменяющиеся за рассматриваемый период времени данные об ограждающих конструкциях здания, а также существенно изменяющиеся климатические характеристики. Необходимо отметить, что стохастические методы ИНС и многофакторного регрессионного анализа опираются на те же исходные данные. Таким образом, использование в стохастическом методе дополнительной группы факторов, например, численно являющихся обработанными климатическими данными, уже используемыми в качестве исходных, приведёт к необоснованному завышению значимости дважды используемого фактора. В таком случае в ИНС говорят о переобученности сети, в регрессионных моделях – об ошибке в связи с коллинеарностью и мультиколлинеарностью переменных. Таким образом, объединение детерминированного и стохастического подходов при составлении прогнозного теплового баланса путём использования в детерминированном подходе только тех же входных данных, что используется в стохастическом подходе, является недопустимым. Необходимо отметить, что использование в детерминированном подходе статистических данных, не используемых в стохастическом расчёте является допустимым и корректным.

Показано преимущество моделей расчётов потребности в спросе на энергоресурсы энергетическим комплексом с искусственными нейронными сетями относительно моделей, использующих многофакторный регрессионный анализ. Присутствие коллинеарности и мультиколлинеарности переменных негативно сказывается на прогнозе регрессионным анализом и слегка положительно отражается на прогнозе с применением искусственных нейронных сетей.

Литература

1. Грицай А.А. Сравнительный анализ методик оценки экономического развития предприятия // *Материалы Международной научно-практической конференции*. В 2-х частях. 2018. №2. С. 136-142.
2. Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю., и др. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2016. №1. С.3-23.
3. Абдурахманов А.М., Рябченко В.Н. Аналитические формулы вычисления вероятностей переходов в марковских моделях надежности // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2016. №4 (2). С.52-59.
4. Соломахо К.Л. Тенденции изменения процесса энергопотребления на примере энергосбытового предприятия // *Электротехнические комплексы и системы управления*. 2015. №1. С.60-63.
5. Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л. Обоснование использования метода главных компонент при прогнозировании объемов электроэнергии // *НАУКА ЮУРГУ Материалы 66-й научной конференции*. 15-17 апреля 2014 г. Ответственный за выпуск: Ваулин С.Д.. 2014. Челябинск. 2014 г. – С. 1304-1309.
6. Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л. Исследование методов прогнозирования электропотребления сбытового предприятия // *Современные технологии в физико-математическом образовании сборник трудов научно-практической конференции*. 26-28 июня 2014 г. Под редакцией С.А. Загребинной. 2014. Челябинск. 2014 г. С. 45-49.
7. Кошарная Ю.В. Методика анализа параметров электропотребления для нормирования и оценки энергосбережения при проведении энергоаудита предприятий и организаций // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2016. № 4. С. 56-69.
8. Кошарная Ю.В. Оптимизация структуры электропотребления металлургического предприятия для оценки потенциала энергосбережения // *Промышленная энергетика*. 2016. № 10. С. 22-29.
9. Ведерников А.С., Ярыгина Е.А., Гофман А.В. Выбор метода для задач краткосрочного прогнозирования электропотребления собственных нужд ТЭЦ // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2018. № 6. С. 32-38.
10. Воевода А.Е., Харитонова Д.Д., Валь П.В. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на основе метода случайного леса // *Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 Материалы 7 Международной молодежной научно-технической конференции*. В 3 т.. 2016. С. 124-127.
11. Dong Q., Xing K., Zhang H. Artificial neural network for assessment of energy consumption and cost for cross laminated timber office building in severe cold regions // *Sustainability*. 2017. Т. 10. № 1. С. 84.
12. Firsova I.A., Vasbieva D.G., Kosarenko N.N., et al. Energy consumption forecasting for power supply companies // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. Т. 9. № 1. С. 1-6.
13. Popov V., Fedosenko M., Tkachenko V., et al. Forecasting consumption of electrical energy using time series comprised of uncertain data // *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2019 - Proceedings 6*. 2019. С. 201-204.
14. Lemke F. Probabilistic energy forecasting based on self-organizing inductive modeling // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Т. 871. С. 405-420.
15. Wang J., Zeng N., Zhou B., Zhang F., Shi X., Liu Z. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms // *Jisuanji Yanjiu yu Fazhan*. 2019. Т. 56. № 8. С. 1587-1603.
16. Jiang P., Dong J., Huang H. Forecasting china's renewable energy terminal power consumption based on empirical mode decomposition and an improved extreme learning machine optimized by a bacterial foraging algorithm // *Energies*. 2019. Т. 12. № 7. С. 1331.
17. Runge J., Zmeureanu R. Forecasting energy use in buildings using artificial neural networks: a review // *Energies*. 2019;12(17):3254.
18. Гужов С.В., Глазов В.С., Шувалов С.Ю. Показатели ежемесячного потребления тепловой энергии зданием и иных факторов зданием бассейна. С. 45-47 (электронный ресурс) Доступно по: https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamapai/enmie/employee_performance/2018-0115%20-%20typical%20energy-saving%20measures%20in%20the%20power%20system.pdf. Ссылка активна на: 16 апреля 2020.
19. Гужов С.В. Исследование и прогнозирование качества функционирования энергосистем зданий для занятий водными видами спорта при разнообразных внешних воздействиях // *Вестник МЭИ*, №5, 2016, стр. 88-93.
20. Гужов С.В., Гашо Е.Г., Шепель В.А. Составление прогнозного топливно-энергетического баланса котельной в условиях недостаточности данных. Энергетические системы // *Материалы 4 Междунар. науч.-техн. конф / Белгор. гос. технол. ун-т; Белгород*, 2019. С. 33-39.

Авторы публикации

Гужов Сергей Вадимович – канд. техн. наук, доцент, Директор Центра подготовки и профессиональной переподготовки "Энергоменеджмент и энергосберегающие технологии", "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

References

1. Gritsai AA. *Sravnitel'nyi analiz metodik otsenki ekonomicheskogo razvitiya predpriyatiya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2-kh chastyakh.* 2018;2:136-142.
2. Abdurakhmanov AM, Volodin MV, Zybin E.u, et al. Metody prognozirovaniya elektropotrebleniya v raspredelitel'nykh setyakh (obzor). *Elektrotehnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal.* 2016;13–2:3.
3. Abdurakhmanov AM, Ryabchenko VN. Analiticheskie formuly vychisleniya veroyatnostei perekhodov v markovskikh modelyakh nadezhnosti. *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal.* 2016;4 (2):52-59.
4. Solomakho K.L. Tendentsii izmeneniya protsessa energopotrebleniya na primere energosbytovogo predpriyatiya. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya.* 2015;1:60-63.
5. Kirpichnikova IM, Solomakho KL. Obosnovanie ispol'zovaniya metoda glavnykh komponent pri prognozirovanii ob'emov elektroenergii. *NAUKA YuURGU Materialy 66-i nauchnoi konferentsii.* 15-17 aprelya 2014 g. 2014. Chelyabinsk. 2014. .pp. 1304-1309.
6. Kirpichnikova IM, Solomakho KL. Issledovanie metodov prognozirovaniya elektropotrebleniya sbytovogo predpriyatiya. *Sovremennye tekhnologii v fiziko-matematicheskoy obrazovanii sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii.* 26-28 iyunya 2014.Chelyabinsk. 2014.pp. 45-49.
7. Kosharnaya YuV. Metodika analiza parametrov elektropotrebleniya dlya normirovaniya i otsenki energosberezheniya pri provedenii energoaudita predpriyatii i organizatsii. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont.* 2016;4:56-69.
8. Kosharnaya YuV. Optimizatsiya struktury elektropotrebleniya metallurgicheskogo predpriyatiya dlya otsenki potentsiala energosberezheniya. *Promyshlennaya energetika.* 2016;10:22-29.
9. Vedernikov AS, Yarygina EA, Gofman AV. Vybor metoda dlya zadach kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya sobstvennykh nuzhd TETs. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta.* 2018;6:32-38.
10. Voevoda AE, Kharitonova DD, Val' PV. Kratkosrochnoe prognozirovanie elektropotrebleniya na osnove metoda sluchainogo lesa. *Elektroenergetika glazami molodezhi - 2016 Materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii.* 2016. P. 124-127.
11. Dong Q, Xing K, Zhang H. Artificial neural network for assessment of energy consumption and cost for cross laminated timber office building in severe cold regions. *Sustainability.* 2017;10(1):84.
12. Firsova IA, Vasbieva DG, Kosarenko NN, et al. Energy consumption forecasting for power supply companies. *International Journal of Energy Economics and Policy.* 2019;9(1):1-6.
13. Popov V, Fedosenko M, Tkachenko V, Yatsenko D. Forecasting consumption of electrical energy using time series comprised of uncertain data. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2019 - Proceedings* 6. 2019. pp. 201-204.
14. Lemke F. Probabilistic energy forecasting based on self-organizing inductive modeling // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019;871:405-420.
15. Wang J, Zeng N, Zhou B, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithm. *Jisuanji Yanjiu yu Fazhan.* 2019;56(8):1587-1603.
16. Jiang P, Dong J, Huang H. Forecasting china's renewable energy terminal power consumption based on empirical mode decomposition and an improved extreme learning machine optimized by a bacterial foraging algorithm. *Energies.* 2019;12(7):1331.
17. Runge J, Zmeureanu R. Forecasting energy use in buildings using artificial neural networks: a review. *Energies.* 2019;12(17):3254.
18. Guzhov SV, Glazov VS, Shuvalov SYu. Pokazateli ezhesemyachnogo potrebleniya teplovoi energii zdaniem i inykh faktorov zdaniem basseina. Available at: https://mpei.ru/Structure/Universe/peep/structure/hamapai/enmie/employee_performance/2018-01-15%20-%20typical%20energy-saving%20measures%20in%20the%20power%20system.pdf Accessed to: 16 th April. 2020.
19. Guzhov S.V. Issledovanie i prognozirovanie kachestva funktsionirovaniya energosistem zdanii dlya zanyatii vodnymi vidami sporta pri raznoobraznykh vneshnikh vozdeistviyakh. *Vestnik MEI.* 2016;5:88-93.

20. Guzhov SV, Gasho EG, Shepel' VA. Sostavlenie prognoznogo toplivno-energeticheskogo balansa kotel'noi v usloviyakh nedostatochnosti dannykh. *Energeticheskie sistemy: materialy 4 Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* 2019 g. BGTU; Belgorod, 2019. pp. 33-39.

Authors of the publication

Sergey V. Guzhov – National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia. Email: GuzhovSV@yandex.ru.

Поступила в редакцию

16 апреля 2020 г.



МОДУЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Тюрина Э. А., Медников А. С., Елсуков П. Ю.

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

Резюме: Высокая цена квалифицированного жидкого топлива в отдаленных районах Сибири и Дальнего Востока, а так же значительные запасы древесной биомассы в этих районах определяют актуальность представляемых исследований. Комплексная переработка древесной биомассы в синтетические жидкие топлива и электроэнергию позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность переработки техногенных отходов, а так же улучшить экологическую обстановку указанных районов.

Целью работы является технико-экономическая оптимизация параметров модульных установок комбинированного производства электроэнергии и метанола из древесной биомассы.

В статье приведен анализ ранее выполненных работ по теме исследований. На его основе выбрано одно из эффективных направлений переработки древесной биомассы: окислительная конверсия этого сырья газифицирующим агентом с получением газа, обогащенного водородом и оксидами углерода; синтез из него квалифицированных жидких топлив; получение электроэнергии путем утилизации тепла конверсии, синтеза и тепла при сжигании продувочного газа процесса синтеза.

Приведена технологическая схема модульной энерготехнологической установки (МЭТУ), математическая модель ее элементов и схемы в целом. На основе разработанных методических подходов выполнены оптимизационные исследования технико-экономических параметров и конструкции модульной энерготехнологической установки.

В результате исследований получены оптимальные показатели представляемой технологии. Показано, что производство электроэнергии и метанола на основе биомассы с учетом комбинирования процессов повышает термический КПД процесса синтеза на 12% и выше, уменьшает инвестиции на 15-20% по сравнению с отдельным производством. При заданной эффективности инвестиций 15% стоимость метанола, произведенного из древесной биомассы составит 275-317 дол./т у.т. При такой стоимости метанол может конкурировать с как котельно-печным, так и моторным топливом в восточных регионах России.

Ключевые слова: метанол; переработка древесной биомассы; производство электроэнергии; модульные установки; синтетические жидкие топлива.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-08-01184 А) и госзадания по проекту 17.1.1 (рег. ном. АААА-А17-117030310433-6).

Для цитирования: Тюрина Э.А., Медников А.С., Елсуков П.Ю. Модульные установки комбинированного производства электроэнергии и жидких топлив на основе древесной биомассы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 113-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-113-127.

MODULAR PLANTS FOR COMBINED BIOMASS-BASED PRODUCTION OF ELECTRICITY AND SYNTHETIC LIQUID FUEL

E.A. Tyurina, A.S. Mednikov, P.Yu. Elsukov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
Irkutsk, Russia

Abstract: *The high costs of qualified liquid fuels in remote areas of Siberia and the Far East, as well as significant stocks of wood biomass in these areas determine the relevance of the presented studies. The integrated processing of woody biomass into synthetic liquid fuel and electricity will increase the energy and economic efficiency of processing technological waste, as well as improve the environmental situation in these areas.*

The aim of the work is technical and economic optimization of parameters modular installations of the combined production of electricity and methanol from woody biomass.

The article presents an analysis of previously performed work on the topic of research and, based on them, selected one of the most effective ways to process wood biomass - oxidative conversion of this raw material to produce gas enriched in hydrogen and carbon oxides, synthesis of qualified liquid fuels and generating electricity when burning purge gas synthesis process.

The technological scheme of modular plants for combined biomass-based production of electricity and synthetic liquid fuel, its mathematical model of its elements and the scheme as a whole are given. On the basis of the selected methods, optimization studies of the operation of a modular energy technology installation were carried out.

Analysis of the results showed that the combined production of electricity and methanol based on biomass increases the thermal efficiency of the process by 12% and reduces investment by 15-20% compared with separate production. With an internal rate of return of capital of 15%, the cost of methanol from biomass will be 275-317 dollars per ton. At such a cost, methanol can compete with both boiler-furnace and motor fuels in the eastern regions of Russia.

Keywords: *methanol; processing wood biomass; electricity production; modular plants; synthetic liquid fuels.*

Acknowledgments: *The research was carried out under State Assignment, Project 17.1.1 (reg. no. AAAA-A17-117030310433-6) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and the Russian Foundation for Basic Research (project 18-08-01184 A).*

For citation: Tyurina EA, Mednikov AS, Elsukov PYu. Modular plants for combined biomass-based production of electricity and synthetic liquid fuel // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):113-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-113-127.

Введение

Значительность когенерации синтетических жидких топлив (СЖТ) и электроэнергии на основе каталитических методов получения СЖТ из продуктов газификации древесной биомассы обусловлена, с одной стороны, высокой ценой квалифицированного жидкого топлива в отдалённых районах Сибири и Дальнего Востока, с другой стороны, значительными запасами древесной биомассы в этих районах. Совмещение химических процессов с выработкой электроэнергии повышает эффективность переработки техногенных отходов. Другой важной особенностью комбинированных процессов является их экологическая чистота, что обусловлено высокими требованиями по чистоте синтез-газа со стороны катализаторов синтеза и низкими выбросами NO_x , связанными с малыми

объемами продувочных газов, сжигаемых в камере сгорания газовой турбины энергоблока. Также низкие объёмы дымовых газов энергоблока, по сравнению с традиционными энергетическими установками позволяют с большей эффективностью утилизировать CO_2 . Экономическая и энергетическая эффективность такой комплексной технологии значительно выше, чем отдельных производств.

Рассматривается одно из возможных и эффективных направлений переработки древесной биомассы – окислительная конверсия этого сырья с получением газа, обогащённого водородом и оксидами углерода, синтез квалифицированных жидких топлив и получение электроэнергии при сжигании продувочного газа процесса синтеза. В качестве квалифицированного жидкого топлива, в первую очередь, могут рассматриваться такие перспективные экологически чистые энергоносители, как метанол и диметилвый эфир, которые могут использоваться не только в качестве энергетического, но и дизельного и моторного топлив [1,2].

Комбинированию производств СЖТ и электроэнергии уделено значительное внимание научной мировой общественности. С точки зрения технико-экономического анализа систем производства энергии и метанола из биомассы, с использованием солнечной и ветровой энергии для получения необходимого для производства водорода, интересна работа *Firmansyah H.* и др. [3]. В работе *Martin M, Grossmann I.E.* [4] предлагается интегрированная выработка метанола из биомассы и используется выделенный в процессе очистки синтез газа CO_2 для его последующей гидрогенизации. Процесс состоит из двух стадий: переработки биомассы на основе проса в синтез-газ и его превращение в метанол, а также электролитической секции, где образуется водород для гидрогенизации CO_2 , получаемого в процессе очистки синтез-газа. *Yang S.* и др. [5]. представили проект и техникоэкономический анализ установки на основе двухступенчатого поточного газогенератора биомассы под давлением (процесс *Carbo-V*). *Moellenbruck F.* и др. [6] исследовали когенерацию электроэнергии и метанола в составе традиционной электростанции в Германии. Для производства метанола используется CO_2 , выделенный из дымовых газов силовой установки, и H_2 , получаемый электролизом воды. В работе *Bai Z.* и др. [7] представлен термодинамический и экономический анализ производства метанола и электроэнергии из хлопкового стебля. Для обеспечения газификации биомассы используется высокотемпературная концентрированная солнечная энергия, получаемая на основе оптического усиления с направленным пучком. В результате вырабатывается синтез-газ для синтеза метанола. Непрореагировавший синтез-газ и выделенное в процессах тепло используются в комбинированном парогазовом цикле для выработки электроэнергии.

В исследованиях имеются значительные отличия от представляемой работы, например в компоновке схем, в использовании исходного сырья, в условиях работы установок и методах определения эффективности.

Если говорить об исследованиях таких сложных систем как энерготехнологические установки комбинированного получения электрической, тепловой энергии и синтетических жидких топлив в мире и России (*Choren Industries, Uhde, Sasol, Lurgi*, ИВТ РАН и др.), то основная их часть посвящена изучению отдельных процессов и аппаратов.

Отметим, что некоторые разработки газификаторов освоены в опытно-промышленных масштабах. На настоящий момент известны газогенераторы *Bioneer* и *Pyroflow* (производитель – финская компания *Foster Wheeler Energia Oy*), реакторы PRM (*Energy Systems, Inc.*, США), а также компаний *Lurgi Energie und Umwelt* (Германия) и *TPS Termiska Processer AB* (Швеция). Достаточно крупными производителями газогенераторов являются *PRIMENERGY Inc.*, США, *Babcock & Wilcox Volund ApS*, Дания, *Future Energy GmbH*, Германия и др. [8].

Комплексные исследования технологий получения электрической, тепловой энергии и синтеза синтетических жидких топлив, в основном, основаны на термодинамическом анализе эффективности. Для таких сложных технических систем, какими являются

энерготехнологические установки комбинированного производства СЖТ и электроэнергии, исследования проводятся на основе вариантных расчетов [9-17].

Содержание настоящей работы посвящено комплексной оптимизации схем и параметров модульных установок комбинированного производства электроэнергии и синтетических жидких топлив на основе древесной биомассы по критериям экономической и энергетической эффективности. Объектом для исследования являются подробные, эффективные с вычислительной точки зрения, модели энергетических и химико-технологических систем и элементов, учитывающих нелинейность происходящих в них процессов. В результате получаются оптимальные технико-экономические показатели, определяющие условия конкурентоспособности изучаемых технологий

Технологическая схема МЭТУ

Из технологий переработки биомассы в квалифицированные топлива (пиролиз, газификация, гидрогенизация и др.) самой востребованной считается получение синтез-газа газификацией биомассы с последующей выработкой метанола из него. На это есть следующие причины.

Газификация биомассы отработана в опытно-промышленных масштабах. Суммарная мощность газификаторов по синтез-газу около 45 ГВт. Перспективным направлением использования произведенного синтез-газа – синтез метанола, который является проработанным в больших масштабах, непрерывным, высокопроизводительным и селективным гетерогенно-каталитическим процессом. Заводы производят около пятидесяти миллионов тонн метанола в год. Причем, потребность в метаноле возрастает. Это обусловлено появлением новых сфер его использования. Являясь самым важным, крупномасштабным и востребованным сырьем для химической промышленности, метанол – универсальный экологически чистый энергоноситель. Он служит компонентом и источником энергии для производства высокооктановых добавок, моторных топлив, электроэнергии и т. д. Продукты его сгорания не содержат вредных выбросов. Так как метиловый спирт является жидкостью, его удобно хранить и перевозить, в том числе существует возможность дальнейшей передачи по трубопроводам [2]. Насущные проблемы энергетики, транспорта, экологии могут быть разрешены при его использовании. Для производства электроэнергии, выделяющиеся при объединении процессов газификации и синтеза тепло и горючие газы, могут быть утилизированы в энергоустановке комбинированного цикла.

Комбинированные энерготехнологические системы, описанные в этой статье, содержат теплоэнергетические установки (комбинированный цикл) и химико-технологические установки синтеза метанола. МЭТУ можно разделить на три основные подсистемы (блока): газификация древесной биомассы с использованием паровоздушного газифицирующего агента, синтез метанола на основе современных высокопроизводительных катализаторов и блок получения электроэнергии. В блоке газификации реализуются процессы паровоздушной конверсии растительной биомассы в реакционной зоне газогенератора. Продукты газификации охлаждаются в надслоевом пространстве и теплообменниках конвективной шахты газогенератора, а затем очищаются в системе глубокой очистки с получением синтез-газа, пригодного для синтеза метанола. При этом вырабатывается пар высокого и низкого давления, поступающий в котел-утилизатор энергоустановки. Процесс каталитического синтеза метилового спирта происходит в подсистеме синтеза. В теплообменных аппаратах, расположенных между полками (реакционными зонами реактора) катализатора, расположены теплообменные поверхности для выработки пара низкого давления, используемого для производства электрической энергии. Продувочный газ блока синтеза сжигается в камере сгорания газовой турбины. Электричество вырабатывается в паровых и газовых турбинах, пар высокого и низкого давления в котле-утилизаторе. Производительность установок по переработке биомассы при необходимости может быть увеличена за счет компактных модульных блоков.

Технологическая схема МЭТУ построена исходя из аналитического обзора и анализа перспективных технологий газификации, синтеза и генерации электроэнергии. Схема МЭТУ приведена на рис.1.

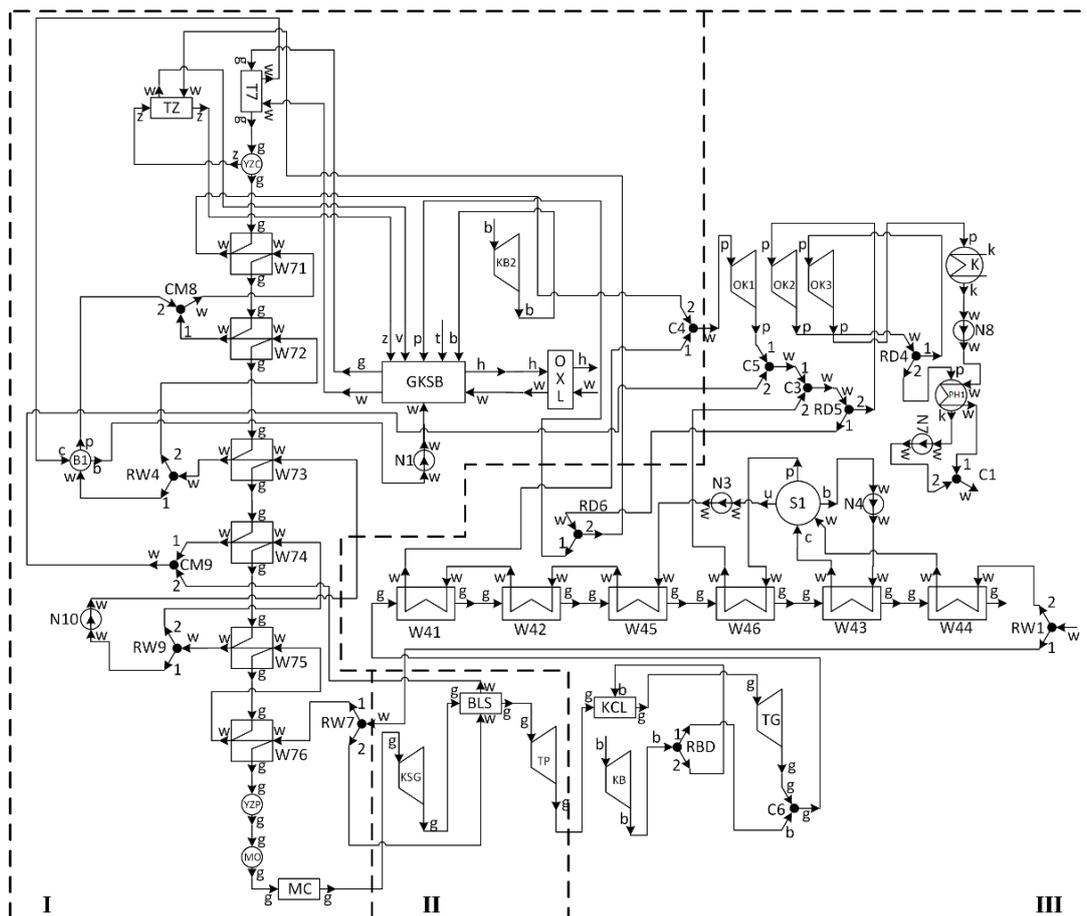


Рис.1. Схема МЭТУ: I – блок газификации, II – блок синтеза метанола, III – энергетический блок.

Обозначения: *t*-биомасса, *z*-зола, *p*-пар, *w*-вода, пар, пароводяная смесь, охлаждающая вода, *v*-транспортный пар, *g*-продукты газификации, синтез-газ, продувочный газ, продукты сгорания, *h*-шлак, *b*-воздух, *kk*-конденсат, *u*, *b*, *c* -вода на циркуляционный насос, 1, 2 – раздвоение, смешение потоков, T7 – радиационный теплообменный аппарат на продуктах газификации, GKSB – реакционная камера газогенератора, MO – скруббер мокрой газоочистки, MC – система глубокой очистки продуктов газификации, KSG – компрессор синтез-газа, BLS– блок синтеза метанола, TP – расширительная турбина, TG – основная газовая турбина, KB – компрессор воздушный, KCL – камера сгорания, RBD – разделитель воздуха, CMG – смеситель потоков газа и воздуха, W41-W44 – конвективные теплообменные аппараты котла-утилизатора, OK1-OK3 – отсеки паровой турбины, PH1 – регенеративный подогреватель, K – конденсатор паровой турбины.

Генераторы газа с псевдооживленным слоем и удаление сухого шлака были выбраны для конверсии биомассы с использованием газифицирующего агента пар-воздух под давлением. Газогенераторы этого типа аналогичны тем, которые используются в промышленных масштабах газовыми генераторами Винклера (чаще всего используются для синтеза синтетических топлив). Для синтеза метилового спирта используются прямоточные реакторы, состоящие из полок с катализатором и межзонных теплообменников для

охлаждения продуктов синтеза кипящей водой и отвода тепла синтеза. Выбор схемы обусловлен более ранними исследованиями химико-технологических схем (с реактором синтеза выше по потоку, изотермическим реактором, с охлаждением продуктов синтеза свежим синтез-газом и т. д.). Электричество производится на установке с комбинированным циклом.

Методы и подходы к математическому моделированию МЭТУ

Отметим, что для большинства энергетических элементов МЭТУ существуют ранее созданные математические модели [18-23].

Новый ключевой элемент энерготехнологической установки – каталитический реактор синтеза метанола. Математическая модель реактора разработана на основе механизма синтеза метилового спирта и кинетических уравнений, созданных в Институте нефтехимического синтеза им А. В. Топчиева РАН [24-26].

Несколько адиабатных зон (полок), заполненных катализатором представляют собой реактор синтеза метанола. Конвективные теплообменные аппараты, в которых отводится тепло синтеза и генерируется пар низкого давления, поступающий в котел-утилизатор энергетического блока, расположены между зонами

Уравнения, описывающие процессы, протекающие в каждом из участков реакторов k_{p1}, k_{p2} синтеза, даны ниже.

Материальные балансы по отдельным химическим элементам:

$$\text{Углероду } \dot{m}_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{CO}} + \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}} = \ddot{m}_{\text{CO}_2} + \dot{m}_{\text{CO}} + \dot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (1)$$

$$\text{Водороду } \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{H}_2} + 2 \cdot \ddot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \ddot{m}_{\text{H}_2} + 2 \cdot \ddot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}} \quad (2)$$

Кислороду

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} + 0,5 \cdot (\dot{m}_{\text{CO}} + \ddot{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \ddot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}) = \dot{m}_{\text{CO}_2} + 0,5 \cdot (\dot{m}_{\text{CO}} + \ddot{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \ddot{m}_{\text{CH}_3\text{OH}}) \quad (3)$$

$$\text{Азоту } \dot{m}_{\text{N}_2} = \ddot{m}_{\text{N}_2} \quad (4)$$

где \dot{m}_i, \ddot{m}_i – мольные расходы соответственно i -го компонента газовой смеси ($\text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{N}_2, \text{CH}_4\text{O}$) на входе и выходе участка.

Кинетические уравнения скоростей образования CH_4O и CO :

$$N_{\text{CH}_4\text{O}} = \ddot{m}_{\text{CH}_4\text{O}} - \dot{m}_{\text{CH}_4\text{O}} = v_{\text{CH}_4\text{O}} \cdot m_k = v_{\text{CH}_3\text{O}} \cdot A \cdot \rho_c \cdot L, \quad (5)$$

$$N_{\text{CO}} = \ddot{m}_{\text{CO}} - \dot{m}_{\text{CO}} = v_{\text{CO}} \cdot m_k = v_{\text{CO}} \cdot A \cdot \rho_c \cdot L \quad (6)$$

где $N_{\text{CH}_3\text{OH}}, N_{\text{CO}}$ – количество молей CH_4O и CO , образующиеся в единицу времени; L – длина полки, A – площадь поперечного сечения участка; m_k – масса катализатора на полке; ρ_c – «насыпная» плотность катализатора; $v_{\text{CH}_3\text{OH}}, v_{\text{CO}}$ – удельные скорости образования CH_4O и CO , которые рассчитываются следующим образом:

$$v_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{k_3 \cdot k_{\text{CO}_2} \cdot (P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2} - \frac{P_{\text{CH}_3\text{OH}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{k_{p1} \cdot p_{\text{H}_2}^2})}{(1 + k_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}) \cdot (1 + k_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}) - 1}, \quad (7)$$

$$V_{CO} = - \frac{k_4 \cdot k_{H_2O} \cdot (P_{CO} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{k_{p_2}})}{(1 + k_{CO_2} \cdot P_{CO_2}) \cdot (1 + k_{H_2O} \cdot P_{H_2O}) - 1} \quad (8)$$

где k_3 – константа скорости образования метанола, k_4 – константа скорости образования СО, P_i – парциальное давление i -ого компонента (СО, СО₂, Н₂, Н₂О, СН₄О) на входе в участок, k_{H_2O}, k_{CO_2} – константы равновесия соответствующих стадий образования промежуточных соединений, k_{p1}, k_{p2} – константы равновесия реакций синтеза СН₄О и конверсии СО.

Парциальное давление i -го компонента синтез-газа

$$P_i = \frac{\dot{m}_i}{m_\Sigma} \cdot P' \quad (9)$$

Тепловой баланс определяется без учета теплообмена с окружающей средой

$$\sum_{i=1}^6 H_i(T') \cdot \dot{m}_i = \sum_{i=1}^6 H_i(T'') \cdot \dot{m}_i, \quad (10)$$

где H_i – полная энтальпия соответствующей i -ой компоненты газовой смеси, T' и T'' – температура газа на входе и выходе участка.

Гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя катализатора определяется следующим образом:

$$dP = P' - P'' = k_c \cdot \frac{L}{D_{eq}} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w^2}{2} \quad (11)$$

где P' и P'' – входное и выходное давление участка реактора, k_c – коэффициент сопротивления фильтрующего слоя, зависящий от типа катализатора, D_{eq} – эквивалентный диаметр между таблетками катализатора, ρ_2 – плотность синтез-газа, w^2 – средняя скорость синтез-газа

$$k_c = \begin{cases} 270/Re, & \text{if } Re \leq 50, \\ 11.6/(Re^{0.25}), & \text{if } Re > 50 \end{cases} \quad (12)$$

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot \phi}{A_t} \quad (13)$$

$$w = \dot{m}_{gm} / (\rho_2 \cdot A_p \cdot \phi), \quad (14)$$

где A_t – удельная, на единицу объема, поверхность таблеток катализатора, Re-критерий Рейнольдса, A_p – площадь поперечного сечения слоя, \dot{m}_{gm} – массовый расход синтез-газа, входящий в реактор, ϕ – порозность таблеток катализатора.

Представленная система уравнений содержит нелинейные алгебраические и трансцендентные уравнения (1-4), (7-14) и нелинейных дифференциальные уравнения первого порядка (5-6). Итерационное решение указанной системы проводится на основе метода Рунге-Кутты четвёртого порядка [26, 27] [27-28]. Последовательность решения системы уравнений (1-14) основана на оригинальном подходе – делении адиабатной зоны на, так называемые, «большие» (по давлению и константам равновесия и скорости

образования CH_4O и CO) и «малые» участки (для расчета мольных долей компонентов газовой смеси соответственно, что позволяет сократить время вычислительного процесса и его объем.

Технологическая схема блока синтеза метилового спирта приведена на рис.2.

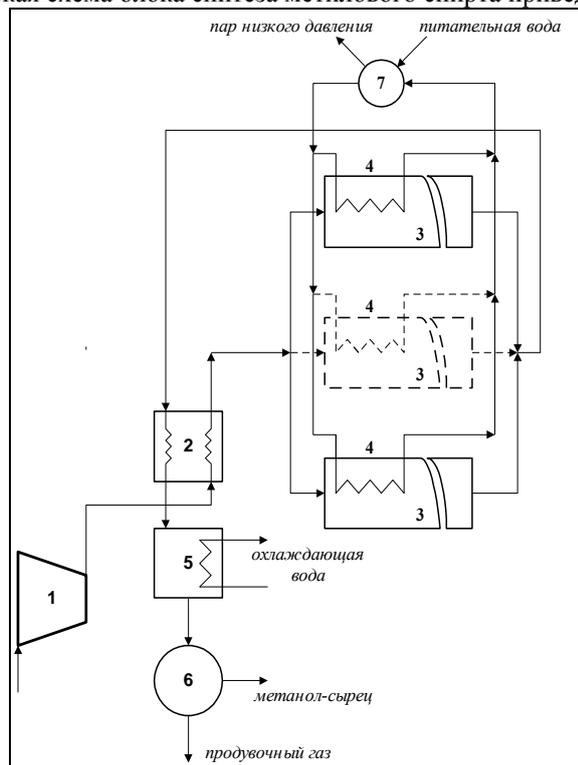


Рис.2. Технологическая схема синтеза метанола.

1 – компрессор, 2 – газо-газовый теплообменник, 3 – реактор синтеза метанола, 4 – газовойодяной теплообменник, 5 – холодильник-конденсатор, 6 – сепаратор метанола-сырца, 7 – барабан-сепаратор.

Из системы глубокой очистки продуктов газификации древесной биомассы, полученный синтез-газ поступает в блок синтеза для каталитического получения метилового спирта. Этот газ сжимается в компрессоре синтез-газа до необходимого давления для эффективного синтеза метанола, нагревается до определенной температуры в регенеративном теплообменнике и подается на вход реакторов. Реактор разделен на заполненные катализатором адиабатные участки. Тепло, выделяющееся во время синтеза, отводится теплообменными аппаратами, встроенными между участками. Образующийся при этом пар низкого давления служит для производства электроэнергии в паровой турбине. Для синтеза метилового спирта используется высокоселективный низкотемпературный медьсодержащий катализатор СМ-У. После реакторов газ охлаждают в регенеративном теплообменнике и конденсаторе неочищенного метанола-сырца. В последнем случае при охлаждении до заданной температуры большая часть метанола и водяного пара конденсируется. Разделение неочищенного метанола и неконденсированного продувочного газа происходит в сепараторе. Сырой метанол удаляется из установки. Оставшийся газ поступает в камеру сгорания газовой турбины.

Методика построения математической модели МЭТУ. Для построения математических моделей различных энергетических и энерготехнологических установок в ИСЭМ СО РАН разработан уникальный автоматизированный программно-вычислительный комплекс - система машинного построения программ (СМПП). Используя архивную

информацию о математических моделях отдельных энергетических и технологических элементах, о термодинамических связях между ними, комплекс автоматически генерирует математическую модель установки, которая представляет собой программный модуль на языке *FORTRAN*.

Создана методика и её программная реализация для схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических и энерготехнологических установок различных типов, которые позволяют найти решения, наилучшие как по энергетической, так и экономической эффективности. Для решения задач нелинейного программирования используется также созданный в ИСЭМ СО РАН метод «с памятью», основанный на сочетании известных методов «погружения» и «возможных направлений» и показавший высокую эффективность в применении. Разработан методический подход к оптимизации параметров ТЭУ и ЭТУ с учетом переменных условий их функционирования, основанный на проведении согласованного конструкторского и поверочных расчетов и позволяющий улучшить технико-экономические показатели и обеспечить допустимость работы на всей области возможных режимов. Разработаны методы решения задач оптимизации установок с учетом переменных условий функционирования. Данный комплекс не имеет аналогов в мире и России.

Наличие математической модели каждого элемента, а также информационной связи на месте технологической связи – главные отличия схемы расчета МЭТУ от технологической. Математическая модель МЭТУ синтеза метанола содержит более двух тысяч переменных, сотни алгебраических и трансцендентных уравнений. Для итерационного решения системы уравнений, описывающих установку, используется метод Зейделя.

Математическая модель МЭТУ настроена на конструкторский расчет элементов и подсистем установки. В результате расчета на моделях находятся массы металлов труб и площадей поверхностей нагрева и охлаждения всех теплообменных аппаратов, объемы катализатора на полках реактора, Размеры реактора и газогенератора, мощности газовых, паровых турбин, расходы и термодинамические параметры продуктов газификации, синтез-газа, продуктов сгорания, воды, пара, пароводяной смеси в различных точках схемы.

Результаты исследования МЭТУ

При исследованиях МЭТУ наибольший интерес вызывает нахождение оптимальной комбинации производства электроэнергии и СЖТ.

Стоимость установки и ее тепловая эффективность зависит от соотношения между производством электроэнергии и метанола. Ключевым параметром, влияющим на соотношение производимой продукции является состав синтез-газа, который определяется подачей воздуха и пара на газифицирующий агент в газогенераторы. Поэтому варианты технико-экономической оптимизации параметров МЭТУ назначались с учетом различных соотношений состава газифицирующего агента (пара и воздуха) при условии соблюдения температуры газификации древесной биомассы.

Сопоставимость исследуемых вариантов МЭТУ обеспечивается нелинейной оптимизация ее основных термодинамических и конструктивных параметров при соблюдении ограничений. Критерием экономической эффективности сравниваемых вариантов служит цена производимой продукции при фиксированном приемлемом уровне коммерческой эффективности инвестиционного проекта МЭТУ.

С целью нахождения оптимальных вариантов МЭТУ решались задачи нелинейного математического программирования. В результате находились оптимальные параметры установки, предоставляющие наименьшее значение цены на производимый метанол при предложенном уровне нормы доходности инвестиций, ценах на древесную биомассу (топливо) и отпускаемую электроэнергию. Кроме того контролировались технологические ограничения на параметры установки.

Постановка задачи оптимизации параметров МЭТУ

$$\min_{dw, db} C_{meth}(x, y, dw, db, B_w, KI, P_{meth}, P_{el}, c_w, c_{el}, IRR_z)$$

при условиях:

$$H(x, y) = 0,$$

$$G(x, y) \geq 0,$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

$$IRR = IRR_z$$

где x – вектор независимых оптимизируемых параметров; y – вектор зависимых вычисляемых параметров; H – вектор ограничений в форме неравенств (ограничения на материальные, энергетические балансы, гидравлические и аэродинамические сопротивления, теплопередачу и т.д.); G – вектор ограничений в форме равенств (температуры газификации и синтеза, на входе газовой турбины и др.); x_{\min}, x_{\max} – вектора, которыми задаются верхняя и нижняя границы изменения соответствующих оптимизируемых параметров; dw, db – удельное (на кг биомассы) потребление пара и воздуха на газифицирующий агент в газогенератор; B_w – годовое потребление биомассы; – KI – капиталовложения в МЭТУ; P_{el} – годовое производство электроэнергии; P_{meth} – годовое производство метанола; C_{meth}, C_w, C_{el} – цена метанола, биомассы, электроэнергии; IRR_z – внутренняя норма доходности инвестиций.

Вектор независимых оптимизируемых параметров включает температуры, энтальпии, давления и расходы рабочих тел установки, объем катализатора на участках реактора синтеза и др. В качестве ограничений-равенств и -неравенств приняты: температура синтеза и газификации, температура и давления в газовой турбине теплопередача в теплообменных аппаратах, давления проточной части отсеков паровой турбины, температуры и механические напряжения металла труб теплообменных аппаратов и др. Контролируется их неотрицательность и соответствие расчетным значениям. Исходная технико-экономическая информация получена на основе анализа смет технологических и энергетических производств [18-23]. Цена древесной биомассы принята равной пятьдесят дол./т у.т. с учетом условий функционирования МЭТУ, цена отпускаемой электроэнергии 8 цент/кВт ч, температура газификации 1173 К. Заданная эффективность проекта составляет 15%. Состав древесной биомассы (%): С= 0,443, Н= 0,055, S = 0,003, О = 0,14, N = 0,004, H₂O = 0,1, А=0,047, низшая теплотворная способность - 17 МДж/кг.

В табл.1 показаны основные результаты оптимизации вариантов МЭТУ с различными параметрами газифицирующих агентов. В табл. 2 даны технико-экономические показатели оптимальных вариантов МЭТУ.

Таблица 1

Оптимальные варианты МЭТУ

Показатели	Варианты		
	0,3	0,6	0,9
Удельное потребление пара на газификацию, кг /кг биомассы	0,3	0,6	0,9
Удельное потребление воздуха на газификацию, кг /кг биомассы	1,41	1,52	1,66
Продукты газификации, кг/с:			
водород	0,14	0,16	0,168
окись углерода	2,12	1,78	1,52
двуокись углерода	0,67	1,22	1,62
водяные пары	0,42	1,03	1,7
азот	2,66	2,9	3,16
Метанол из сепараторов, кг/с:	1,2	1,1	0,93

Продолжение таблицы 1

Подувочный газ в камеру сгорания газовой турбины, кг/с:			
водород	0,014	0,068	0,088
окись углерода	0,936	0,124	0,132
двуокись углерода	0,98	2,28	2,5
метанол	0,012	0,016	0,02
азот	2,66	2,9	3,16
Весовой расход продуктов сгорания, кг/с:			
азот	7,76	5,08	7,08
кислород	0,88	0,058	0,384
двуокись углерода	2,47	2,5	2,74
вода	0,202	0,65	0,87
Масса катализатора в реакторах синтеза, т	85	91,6	110,2
Пар высокого давления на паровую турбину, кг/с	2,04	2,24	2,56
Пар из испарителей низкого давления на паровую турбину, кг/с	4,88	4,72	4,38
Мощности:			
паровой турбины, МВт	4,3	4,29	4,24
расширительной турбины, МВт	0,4	0,5	0,58
воздушного компрессора газовой турбины, МВт	2,62	1,16	2,04
воздушных компрессоров газогенератора, МВт	1,32	1,44	2,36
компрессора синтез-газа, МВт	1,7	2,28	2,56
собственных нужд, МВт	3,08	3,76	4,16
Площадь поверхностей блока газификации, м ²	1477	870	1027
Площадь поверхностей блока синтеза, м ²	191,6	436	599,4
Площадь поверхностей энергоблока, м ²	3141,8	2277,6	1787
Полезная мощность установки, МВт	5,7	4,9	5,42
Термический КПД производства метанола	74,6	69,6	61

Таблица 2

Технические и экономические характеристики вариантов

Показатель	Расход пара на газифицирующий агент в газогенератор, кг/кг топлива		
	0,3	0,6	0,9
Потребление условного топлива, тыс. т у.т./год	38		
потребление натурального топлива, тыс. т/год	64		
Производство метанола, тыс. т у. т./год	21,88	19,92	16,86
Производство метанола, тыс. т/год	30,8	28	23,6
Отпуск электроэнергии, млн. кВт ч/год	30,34	33	36,48
Полезная мощность установки, МВт	5,7	4,9	5,42
Капиталовложения в установку, млн. дол.	30,36	24,12	23,76
Термический КПД производства метанола, %	74,6	69,6	61
Цена метанола, дол./т. у. т.	317	275	300

Выводы и обсуждение

На основе представленных результатов можно сделать следующие заключения.

Для производства метанола оптимальный состав синтез-газа, определяющий выработку продукции, характеризуется более низкими значениями дутья в газогенератор и,

соответственно, пониженными объемами продуктов газификации. Но объемы производства метанола не покрывают капитальные затраты на его выработку, что вызывает рост цены на метанол по сравнению с оптимальным вариантом.

С увеличением дутья увеличивается производство электроэнергии и уменьшается производство метанола, так как значительные объемы остаточного CO после синтеза сгорают в энергетическом блоке. Но увеличение производства электроэнергии не окупает инвестиции при заданной $IRR=15\%$, что обуславливает рост цены на производимый в установке метанол.

Оптимальным вариантом является вариант с высоким производством метанола и электроэнергии и термическим КПД синтеза метанола, и с расходом пара на газифицирующий агент в газогенератор, равным 0,6 кг/кг.

Отметим, что не смотря на значительное отличие состава синтез-газа от стехиометрически необходимого для синтеза метанола (меньшее соотношение H^2/CO) производительность проточных реакторов синтеза, в отличие от реакторов с рециркуляцией, значительно повышается (почти в 2 раза). Это обусловлено использованием свежего синтез-газа, связанным с высокими расходами продувочных газов блока синтеза. При этом происходит снижение энергетических потерь. Полученный избыток оксида углерода сгорает в энергоустановке. Отказ от блока конверсии оксида углерода, уменьшение подачи водяного пара в газогенераторы, повышение энергетической эффективности использования химической энергии древесной биомассы – результат применения прямоточных реакторов.

Уменьшение вложений на 15-20% по сравнению с отдельным производством и увеличение термического КПД процесса на 12% являются результатами исследований технологии совместной выработки электроэнергии и метанола.

Стоимость метанола из биомассы составит 275-317 дол./т у.т. (при внутренней норме возврата капиталовложений 15%). При такой стоимости метанол может конкурировать с как котельно-печным, так и моторным топливом в восточных регионах России.

Литература

1. George A., Olah., Alain Goeppert, et al. Beyond Oil and Gas. 2 ed/ Wiley.-CH The Methanol // Economy. 2011. 356 p.
2. Sunggyu Lee., James G. Speight., Sudarshan K. Loyalka. Handbook of Alternative Fuel Technologies, Second Edition. CRC Press // Taylor & Francis Group, LLC, 2015. 712 p.
3. Firmansyah H., Tan Y., Yan J. Power and methanol production from biomass combined with solar and wind energy: analysis and comparison // Energy Procedia 2018. V.145. pp.576-81.
4. Yang S, Li B, Zheng J, Kankala RK. Biomass-to-Methanol by dual-stage entrained flow gasification: Design and techno-economic analysis based on system modeling. Journal of Cleaner Production 2018; 205:364-74.
5. Martín M, Grossmann IE. Towards zero CO₂ emissions in the production of methanol from switch grass. CO₂ to methanol. Computers & Chemical Engineering 2017. V.105. pp.308-16.
6. Moellenbruck F, Kempken T, Dierks M, Oeljeklaus G, Goerner K. Cogeneration of power and methanol based on a conventional power plant in Germany // Journal of Energy Storage 2018.V.19. pp.393-401.
7. Bai Z., Liu., Gong L., et al. Thermodynamic and economic analysis of a solar-biomass gasification system with the production of methanol and electricity // Energy Procedia. 2018. V.152. pp. 1045–1050.
8. Клер АМ Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение. Монография. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 145 с.

9. Gao Z., Huang W., Yin L., Xie K. Liquid-phase preparation of catalysts used in slurry reactors to synthesize dimethyl ether from syngas: Effect of heat-treatment atmosphere // *Fuel Processing Technology*. 2009. V.9. pp.1442-1446.
10. Guang-jian L., Zheng L., Ming-hua W., Wei-dou N. Energy savings by co-production: A methanol/electricity case study // *Applied Energy*. 2010. V.8. pp. 2854-2859.
11. Hetland J., Anantharaman R. Carbon capture and storage (CCS) options for co-production of electricity and synthetic fuels from indigenous coal in an Indian context // *Energy for Sustainable Development*. 2009. V.13. pp. 56-63.
12. Larson E., Fiorese G., Liu G., et al. (), Co-production of decarbonized syngas and electricity from coal + biomass // *Energy Environ Science*. 2010. V.3. pp. 28-42.
13. Manzolini G., Macchi E., Gazzani M. (), CO₂ capture in Integrated Gasification Combined Cycle with SEWGS – Pt B: Economic assessment, *Fuel*. 2013. V.105. pp. 220-227.
14. Pellegrini L., Soave G., Gamba S., Lange S. Economic analysis of a combined energy–methanol production plant // *Applied Energy*. 2011. V.88. pp. 4891-4897.
15. Robinson K., Tattersson D. Economics on Fischer–Tropsch coal-to-liquids method updated // *Oil Gas J.* 2008. V.106. pp. 22-52.
16. Sajo P., Naik, Taegong Ryu, Vy Bui, et al. Synthesis of DME from CO₂ /H₂ gas mixture // *Chemical Engineering Journal*. 2011;167(1):362-368.
17. Sun S., Jin H., Gao L., Han W. Study on a multifunctional energy system producing coking heat, methanol and electricity // *Fuel*. 2010;89:1353-1360.
18. Kler А.М., Tyurina ЕА., Mednikov АS. A plant for methanol and electricity production: Technical-economic analysis // *Energy* 2018. V.165. pp. 890-899.
19. Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А. и др. Теплоэнергетические системы: Оптимизационные исследования. Новосибирск: Наука, 2005. 236 с.
20. Kler А.М., Tyurina ЕА., Mednikov АS. Energy-technology installations for combined production of hydrogen and electricity with CO₂ removal systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, V. 36, Issue 1, pp. 1230–1235.
21. Kler А.М., Zharkov P.V., Epishkin N.O. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016. V. 23. № 2. pp. 289-296.
22. Kler АМ, Tyurina ЕА. Production of products of deep coal processing: modeling of technologies, comparison of efficiency // *The burning and plasma chemistry* 2007.V.4. pp. 276-81.
23. Тюрина ЭА, Клер АМ. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 298 с.
24. Berezina LA., Matyshak VA., Korchak VN., et al. An in SITU IR spectroscopic study of methanol conversion on an SNM-1 catalyst // *Kinetics and Catalysis*. 2009. V. 50. № 5. С. 775-783.
25. Rozovskii A.Ya., Lin G.I. Fundamentals of methanol synthesis and decomposition *Topics in Catalysis*. 2003. T. 22. № 3-4. С. 137-150.
26. Розовский А.Я., Лин Г.И. Теоретические основы процесса синтеза метанола. М.: Химия, 1990. 272 с.
27. Skvortsov L. Explicit stabilized Runge-Kutta methods // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2011. V. 51. pp. 1153-1166.
28. Martín-Vaquero J., Kleefeld B. Extrapolated stabilized explicit Runge–Kutta methods // *Journal of Computational Physics*. 2016. V. 326. pp. 141–155.

Авторы публикации

Тюрина Элина Александровна – д-р техн. Наук, ведущий научный сотрудник лаборатории теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск.

Медников Александр Станиславович – канд. Техн. Наук, научный сотрудник лаборатории теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск.

Елсуков Павел Юрьевич – канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск.

References

1. George A. Olah, Alain Goepfert, Surya GK. Prakash Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. Wiley-VCH; 2 ed. 2011.356 p.
2. Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka *Handbook of Alternative Fuel Technologie*. 2 ed. CRC Press. Taylor & Francis Group, LLC, 2015. 712 p.
3. Firmansyah H, Tan Y, Yan J. Power and methanol production from biomass combined with solar and wind energy: analysis and comparison. *Energy Procedia*. 2018; 145:576–81.
4. Martin M, Grossmann IE. Towards zero CO₂ emissions in the production of methanol from switch grass. CO₂ to methanol. *Computers & Chemical Engineering*. 2017; 105:308-16.
5. Yang S, Li B, Zheng J, et al. Biomass-to-Methanol by dual-stage entrained flow gasification: Design and techno-economic analysis based on system modeling. *Journal of Cleaner Production* 2018; 205:364–74.
6. Moellenbruck F, Kempken T, Dierks M, Oeljeklaus G, Goerner K. Cogeneration of power and methanol based on a conventional power plant in Germany. *Journal of Energy Storage* 2018; 19:393-401.
7. Bai Z, Liu Q, Gong L, et al. Thermodynamic and economic analysis of a solar-biomass gasification system with the production of methanol and electricity. *Energy Procedia* 2018; 152:1045-50.
8. Kler AM. *Effective methods of circuit-parametric optimization of complex heat and power plants: development and use*. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2018. 145 p. doi: 10.21782/B978-5-6041446-0-2.
9. Gao Z, Huang W, Yin L, et al. Liquid-phase preparation of catalysts used in slurry reactors to synthesize dimethyl ether from syngas: *Effect of heat-treatment atmosphere*, *Fuel Processing Technology*. 2009;90:1442-1446.
10. Guang-jian L, Zheng L, Ming-hua W, et al. Energy savings by co-production: A methanol/electricity case study. *Applied Energy*. 2010;87:2854-2859.
11. Hetland J, Anantharaman R. Carbon capture and storage (CCS) options for co-production of electricity and synthetic fuels from indigenous coal in an Indian context. *Energy for Sustainable Development*. 2009;13:56-63.
12. Larson E, Fiorese G, Liu G, et al. Co-production of decarbonized syngas and electricity from coal + biomass. *Energy Environ Science*. 2010;3:28-42.
13. Manzolini G, Macchi E, Gazzani M. CO₂ capture in Integrated Gasification Combined Cycle with SEWGS – Pt B: Economic assessment. *Fuel*. 2013;105:220-227.
14. Pellegrini L, Soave G, Gamba S, Lange S. Economic analysis of a combined energy–methanol production plant. *Applied Energy*. 2011;88:4891-4897.
15. Robinson K, Tatterson D. Economics on Fischer–Tropsch coal-to-liquids method updated. *Oil Gas J*. 2008;106:22-52.
16. Sajo P, Naik, Taegong Ryu, Vy Bui, et al. Synthesis of DME from CO₂ /H₂ gas mixture. *Chemical Engineering Journal*. 2011;167(1):362-368.
17. Sun S, Jin H, Gao L, et al. Study on a multifunctional energy system producing coking heat, methanol and electricity. *Fuel*. 2010;89:1353-1360.
18. Kler AM, Tyurina EA, Mednikov AS. A plant for methanol and electricity production: Technical-economic analysis. *Energy*. 2018;165:890–899.
19. Kler AM, Dekanova NP, Tyurina EA. *Thermal Power Systems: Optimization Studies*. Novosibirsk: Nauka; 2005.
20. Kler AM, Tyurina EA, Mednikov AS. Energy-technology installations for combined production of hydrogen and electricity with CO₂ removal systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(1):1230–1235 pp.
21. Kler AM, Zharkov PV, Epishkin NO. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2016;23(2):289-296.

22. Kler AM, Tyurina EA. Production of products of deep coal processing: modeling of technologies, comparison of efficiency. *The burning and plasma chemistry* 2007; 4:276-81.

23. *Optimization studies of power plants and complexes*. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 2016. 298 p.

24. Berezina LA, Matyshak VA, Korchak VN, et al. An in SITU IR spectroscopic study of methanol conversion on an SNM-1 catalyst. *Kinetics and Catalysis*. 2009;50(5):775-783.

25. Rozovskii AYa, Lin GI. Fundamentals of methanol synthesis and decomposition. *Topics in Catalysis*. 2003;22(3-4):137-150.

26. Rozovsky AYa, Lin GI. *The theoretical basis of the process of methanol synthesis*. М.: Chemistry, 1990. 272 p.

27. Skvortsov L. Explicit stabilized Runge-Kutta methods. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2011;51:1153–1166. doi: 10.1134/S0965542511070165.

28. Martin-Vaquero J, Kleefeld B. Extrapolated stabilized explicit Runge–Kutta methods. *Journal of Computational Physics*. 2016;326:141–155.

Authors of the publication

Elina A. Tyurina – Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov str., Irkutsk, Russia.
E-mail: tyurina@isem.irk.ru.

Alexander S. Mednikov – Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov str., Irkutsk, Russia.
E-mail: mednikov@isem.irk.ru.

Pavel Yu. Elsukov – Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov str., Irkutsk, Russia.
E-mail: els@isem.irk.r.

Поступила в редакцию

17 октября 2019 г.



РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

М.В. Дебиев

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. акад. М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия
mair76@mail.ru

Резюме: В статье представлен обзор современного состояния энергетики в мире и России, которая сосредоточена на развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведен анализ тенденции в производстве и потреблении энергоресурсов, а также оценки использования ВИЭ в России. Определены стимулы развития возобновляемых источников энергии с характеристиками имеющимися в мире. Сделаны выводы о важности развития данной отрасли как в России, так и в Чеченской Республике, как одного из ее регионов. Дана оценка развития ветровой и солнечной энергетики России. Рассмотрена действующая структура электроснабжения Чеченской Республики, где приведены показатели максимальной электрической мощности, потребляемой электроэнергии, а также генерации электроэнергии республики. Проведен анализ возможности использования ресурсов ветровой и солнечной энергии, а также малой гидроэнергетики Чеченской Республики. Рассмотрены варианты освоения и эффективно применения возобновляемых источников энергии, с учетом того, что использование энергоресурсов на основе современных инновационных технологий, внедрение новых перспективных альтернативных источников, поиска путей стимулирования использования ВИЭ, где предполагается организация и внедрение тарифной политики, является одной из главных задач развития энергетики, которые дают полное системное представление о масштабах проблемы перевода системы энергетики на инновационные рельсы. Предложены некоторые варианты наиболее целесообразного развития энергосистемы Чеченской Республики, строительством небольших опытных установок, использующих ВИЭ, с целью фактического (экспериментального) подтверждения прогнозных расчетных значений, а также постепенным массовым внедрением установок, использующих ВИЭ в частном секторе с созданием необходимых тарифных условий для использования и строительства установок в промышленных масштабах в рамках энергетических частных или государственных компаний. Поставлены первоочередные задачи перспективного развития энергетики республики внедрением возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: электроэнергетика, энергосистема, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, ветроэлектростанция, солнечная энергетика, малая гидроэнергетика, генерация, природные ресурсы, тариф.

Для цитирования: Дебиев МВ. Развитие энергетики Чеченской Республики. // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 128-135. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-128-135.

ENERGY DEVELOPMENT IN THE CHECHEN REPUBLIC

MV Debiev

Grozny State Oil Technical University them. Acad. M.D. Millionschikova
Grozny, Russia

Abstract: The article provides an overview of the current state of energy in the world and in Russia, which focuses on the development of renewable energy sources (RES). An analysis is made

of the trend in the production and consumption of energy resources, as well as an assessment of the use of renewable energy in Russia. Incentives for the development of renewable energy sources with the characteristics available in the world are determined. Conclusions are drawn about the importance of developing this industry both in Russia and in the Chechen Republic, as one of its regions. An assessment is given of the development of wind and solar energy in Russia. The current power supply structure of the Chechen Republic is considered, where the indicators of maximum electric power, consumed electric power, and also electric power generation of the republic are given. The analysis of the possibility of using wind and solar energy resources, as well as small hydropower of the Chechen Republic. Options for the development and effective use of renewable energy sources are considered, taking into account the fact that the use of energy resources based on modern innovative technologies, the introduction of new promising alternative sources, and the search for ways to stimulate the use of renewable energy sources, where it is supposed to organize and introduce a tariff policy, is one of the main tasks of energy development which give a complete systemic idea of the scale of the problem of transferring the energy system to innovative rails. Some options are proposed for the most expedient development of the energy system of the Chechen Republic, the construction of small pilot plants using renewable energy sources, with the goal of actual (experimental) confirmation of the predicted calculated values, as well as the gradual mass introduction of plants using renewable energy sources in the private sector with the creation of the necessary tariff conditions for use and construction installations on an industrial scale within the framework of energy private or public companies. Priority tasks have been set for the prospective development of the republic's energy sector by introducing renewable energy sources.

Key words: electric power industry, power system, renewable energy sources, wind power, wind power plant, solar power, small hydropower, generation, natural resources, tariff.

For citation: Debiev MV. Energy development in the Chechen Republic. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(1):128-135. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-128-135.

Введение

В настоящее время многие страны мира в большей или меньшей степени «обратили свои взоры» на возобновляемую энергетику и имеют определенные программы по её развитию. Некоторые из них добились существенных результатов в использовании «зеленой» энергии и постепенно переводят свою экономику на альтернативные источники, в частности на ветровую и солнечную энергетику (рис. 1) [1].

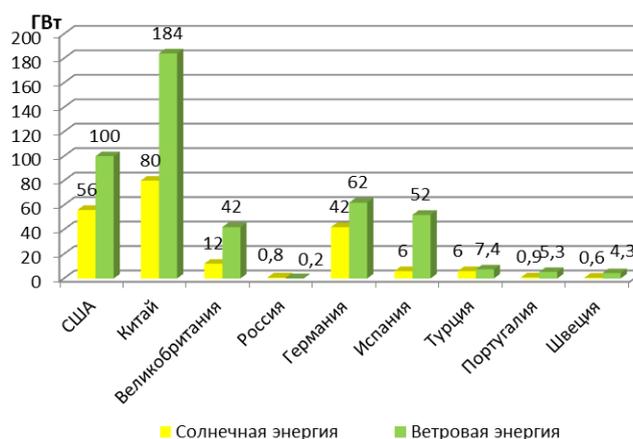


Рис.1. Развитие солнечной и ветровой энергии в мире

Больших результатов в этом вопросе достигла Германия. Почти половина генерирующих источников страны составляют ветропарки и солнечные электростанции. Примером широкого внедрения в жизнь немцев альтернативной энергетики является 1-е января 2018 года, когда вся страна на несколько часов почти полностью перешла на возобновляемые источники энергии. То есть, практически все традиционные электростанции всей Германии в эти часы в соответствии с диспетчерским графиком были остановлены и электроснабжение всей страны обеспечивалось только ветрогенераторами и

солнечными панелями. Наверное, при таком раскладе называть это направление энергетики альтернативной для Германии уже будет некорректно. Конечно, это была временная ситуация, были выходные, основная промышленность страны не работала, но в то же время это уже весомый сигнал и серьезная заявка от «зеленой» энергетики в одной из самых развитых стран мира.

Материалы и методы

Германия является крупнейшей экономикой Европы, но это не единственная страна, демонстрирующая здоровые показатели возобновляемой энергии [2,3,4]. К 2025 году Германия планирует увеличить выработку электроэнергии из возобновляемых источников (солнечной, ветровой, водной) до 147,4 ГВт, что в 1,7 раза больше показателя за 2018 год. Консалтинговая компания *GlobalData* прогнозирует, что к этому сроку ВИЭ обгонят другие способы генерации и будут доминировать в энергобалансе страны: их доля вырастет с 45 процентов почти до 60. Этим результатам предшествовала длительная законодотворческая работа.

В начале прошлого года Португалия смогла произвести больше возобновляемой электроэнергии, чем потребовалось всего электричества за весь месяц марта, и в стране было несколько почти трехдневных отрезков, когда спрос на электроэнергию удовлетворялся только за счет возобновляемой электроэнергии.

Общая мощность всех ветроустановок в мире на конец 2017 г. составила порядка 530 ГВт, что почти в полтора раза превысила общую мощность зарегистрированных в 32 странах мира 439 ядерных энергетических реакторов суммарной мощностью 340 ГВт. Так, в 2017 г. в мире было введено в эксплуатацию 52 ГВт от ветроустановок, что было абсолютно беспрецедентным. Все это результат направленной политики государства перехода к чистой энергетике, соответствующей уровню развивающихся современных мировых инновационных технологий [5,6].

Россия является одной из самых богатых стран природными ресурсами [7]. Но на сегодняшний день структура промышленных секторов в России напрямую связана с топливно-энергетическим комплексом, вектор их развития, который в основном является сырьем, не соответствует критериям, характеризующим энергию развитых стран. Такое развитие, с истощением природных ресурсов, может привести к тому, что энергетический сектор России станет заторможенным [1,8].

Альтернативная энергетика в России развивается очень медленно, так в 2014-2016 годах в России были введены в строй объекты возобновляемой энергетики мощностью около 130 МВт, в 2017 году – 140 МВт. В 2018 году была введена в строй самая мощная солнечная электростанция в России – Сорочинская СЭС «Уран» мощностью 60 МВт. Планируется, что к 2023 году суммарная мощность солнечных электростанций в России достигнет 1,5 ГВт. Примерно такая же мощность у Белоярской АЭС, самой старой атомной электростанции в РФ. По состоянию на 01.01.2018 этот показатель был меньше почти что втрое – 534 МВт. В Ростовской области активно ведется строительство ветроэнергетической станции (ВЭС). Планируется, что всего будут размещены 78 ветроэнергетических установок (ВЭУ) датской компании *Vestas* мощностью в 3,8 МВт каждая [8,9,10].

По данным системного оператора Единой энергетической системы РФ, российские ветроэлектростанции в 2018 году суммарно выработали 217,8 миллионов киловатт-часов электроэнергии – и это на 66% больше, чем за 2017 год. Для сравнения, прирост по выработке электроэнергии на солнечных электростанциях за этот же период времени составил 34,7%.

Тем не менее, 217 миллионов киловатт-часов – это просто капля в море, 0,02% от общего количества электроэнергии, которое произведено в стране за прошлый год. Для сравнения: по данным отчета *Renewables 2018 Global Status Report* вклад ветровой энергетики в общемировую выработку составляет 5,6%. Разница более чем в 200 раз.

Результаты и обсуждения

В 2018 г. собственный максимум нагрузки Чеченской энергосистемы составил 486 МВт (рис. 2), вследствие чего темпы электропотребления имеют динамику определенного роста потребления электроэнергии. В Чеченской Республике в результате развития инфраструктуры, а также продолжающихся строительно-восстановительных работ, в сравнении с 2017 годом, уровень электропотребления увеличился на 6% и достиг значения 2862,8 млн. кВт/ч. (рис. 3) [10,11].

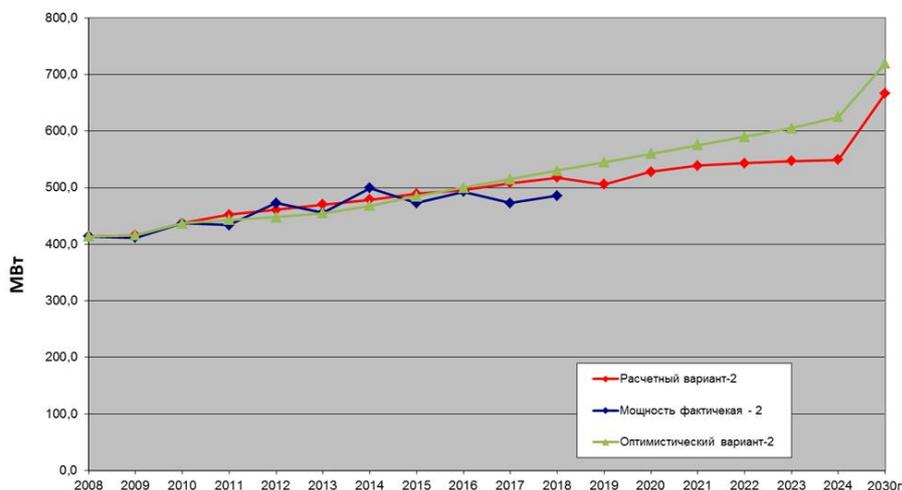


Рис. 2. Диаграмма максимальной мощности

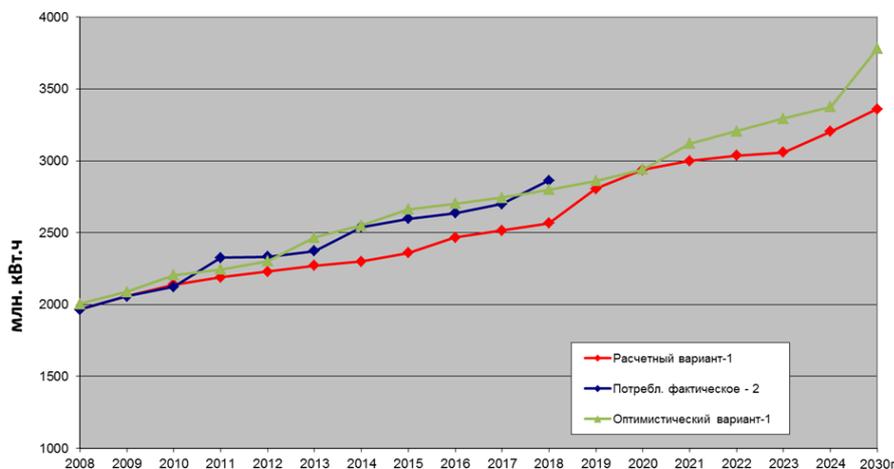


Рис. 3. Диаграмма электропотребления

Электроснабжение Чеченской Республики осуществляется перетоками мощности по сети 110 кВ от соседних энергосистем и по сети 330 кВ от подстанции «ПС 330 кВ Грозный». Максимум потребления мощности в 2018 году в Чеченской энергосистеме, с учетом работавшей с выдачей в сеть электроэнергии Грозненской ТЭС покрывался следующим образом (рис.4):



Рис. 4. Поступление электроэнергии в энергосистему Чеченской Республики

Традиционная энергетика в Чеченской Республике представлена двумя блоками ГТУ по 180 МВт (1-очередь) Грозненской ТЭС. Альтернативная энергетика представлена Кокадойской мини – ГЭС на реке Аргун в Итум-Калинском районе с установленной мощностью 1,3 МВт.

Можно сказать, что электрогенерация в Чеченской Республике сегодня находится на начальном этапе возрождения – введенная в эксплуатацию 1-очередь Грозненской ТЭС при работе даже в базовом режиме позволит обеспечить порядка 60% от потребной электрической мощности в максимум зимних нагрузок Чеченской Республики. Но,

действующие блоки газотурбинной установки (ГТУ) по своим техническим характеристикам эффективны в режиме пиковых нагрузок.

Природные ресурсы Чеченской Республики обязывают развивать промышленность по разным направлениям и в первую очередь нефтедобычу, нефтепереработку, строительную индустрию [12,13]. Понятно, что этим трем направлениям жизненно необходима большая энергетика и необходимость её развития не вызывает сомнений. Но, это одна из сторон реальной экономики.

Опыт развития передовых стран требует развивать и другие секторы – туристический бизнес, сельское хозяйство. Широко развивается мелкий бизнес и частное предпринимательство, авторемонтные станции, торговые учреждения и т.д.

Согласно программе развития энергетики Чеченской Республики на 2011-2030 гг. в республике планировалось построить ветропарк, состоящий из 24 ВЭУ мощностью 1,5 МВт каждая, с общей установленной мощностью 36 МВт [3]. Стоимость проекта с учетом затрат на оборудование и строительства, проектных работ, исследований характеристик ветра, выбора площадки, ПИР и т.д., необходимые инвестиции составляют 1,5 млрд. руб. Годовая выработка электроэнергии – 72 тыс. кВт/ч. К сожалению, этот проект до настоящего времени не начат.

Учитывая, что Чеченская Республика обладает значительными гидроресурсами и большими возможностями использования солнечной и ветровой энергии, необходимо сегодня определить направление развития энергетики Чеченской Республики на многие годы вперед [14,15].

Развивать энергетику можно двумя путями:

1) Воссозданием тепловых электростанций с использованием в качестве топлива природного газа или нефтепродуктов. Первым шагом в этом направлении является Грозненская ТЭС, которая в настоящее время работает в режиме ГТУ. Плановый (проектный) объем потребляемого природного газа составляет 127 тыс. м³/ч или 108 тыс. т.у.т. в год и экологи могут сказать, сколько вредных веществ выделяется при сжигании такого количества газа. Поэтому этот путь, несмотря на любые экологические мероприятия, ведущие к снижению вредных выбросов в окружающую среду, все равно ранее пройденное «наступление» на экологические грабли.

2) Путь по которому пытаются идти передовые страны, предполагает взаимодополняющий симбиоз тепловых электростанций в необходимом для специфических целей объеме и широкая «зеленая» энергетика, зеленый свет которой в Чеченской Республике можно дать сегодня и которая в перспективе вплетется в структуру выработки и потребления электроэнергии республики и тем самым позволит уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Чеченская Республика имеет уникальную географию, где на небольшой территории находятся высокие южные горы с солнечными альпийскими лугами и продуваемыми ущельями и равнинные степные районы с большим количеством солнечных дней в году и сильными степными ветрами [10,12,16]. Этот уникальный «букет» позволяет с уверенностью предположить о возможности и обязанности современников, имеющих возможность влияния на эти процессы, предпринять определенные шаги в направлении развития «зеленой» энергетики.

Учитывая вышеизложенное, развитие альтернативной энергетики в Чеченской Республике, которая в перспективе станет основной, необходимо осуществить в 2 этапа:

1) Строительство небольших опытных установок, использующих ВИЭ, с целью фактического (экспериментального) подтверждения прогнозных расчетных значений.

2) Постепенное массовое внедрение установок, использующих ВИЭ в частном секторе с созданием необходимых тарифных условий для использования и строительства установок в промышленных масштабах в рамках энергетических частных или государственных компаний [1,3,16].

Оба этапа можно начинать реализовывать одновременно.

Для реализации 1-го этапа необходима государственная помощь и привлечение инвестиционных средств.

Для реализации 2-го этапа в первую очередь необходима подготовка законодательной базы с учетом возможности тарифного регулирования для обеспечения экономически обоснованных тарифов на «зеленую» электроэнергию хотя бы на республиканском уровне, например, на переходный период или на период реализации программы.

Необходимо обеспечить оптимальный симбиоз между индивидуальными (частными) установками ВИЭ и существующей системой выработки и поставки потребителям электроэнергии.

Конечно пока себестоимость киловатта энергии, полученного из альтернативных источников, кратно дороже стоимости киловатта, выработанного на ТЭС или ГЭС, отрасль будет оставаться дотационной. Да и мировые тренды добычи газа и нефти говорят о том, что глобальный отказ от ископаемого топлива еще за горизонтом.

Наверное, и у каждой страны и региона свои специфические причины, побуждающие переводить энергетику на «зеленые» рельсы, они есть и у Чеченской Республики. Поэтому необходимо тщательно изучить опыт передовых в этих вопросах стран и поэтапно начинать работать в этом направлении.

Заключение

Необходимо изыскать средства и на законодательном уровне рассмотреть возможность организации льгот предприятиям, частникам и предпринимателям, внедряющих и использующих у себя «зеленую» энергетику. Пусть вначале это будут ветрогенератор, например, на чабанских точках или солнечные панели у административных зданий или мини-ГЭС на горных реках.

В дальнейшем можно привлекать инвесторов и попробовать организовать производство и ветровых установок и гелиоустановок.

Первоочередными задачами развития энергетики республики являются нижеследующие:

- разработка современной программы развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на территории Чеченской Республики;
- организация гидрологического мониторинга на горных реках республики с целью выбора оптимальных мест размещения МГЭС;
- организация комплексных метеорологических наблюдений (солнечная радиация, скорость и направление ветра на разных высотах и др.) в различных районах республики с целью выбора оптимальных мест размещения солнечных и ветровых энергоустановок;
- выполнение фундаментальных и прикладных НИР в области возобновляемой энергетики;
- разработка рекомендаций и инвестиционных предложений для промышленных предприятий и ЖКХ республики.

Литература

1. Баринаева В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. 2016. Т. 7. № 2. С. 259-270.
2. Gasch Robert and Twele Jochen. Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. Springer, Wiesbaden. 2013. p. 569.
3. Walwyn, David Richard; Brent, Alan Colin (2015). "Renewable energy gathers steam in South Africa". Renewable and Sustainable Energy Reviews.
4. The Guardian «Electric cars and cheap solar 'could halt fossil fuel growth by 2020'». Accessed to: 20 march 2017.
5. U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis". URL: NREL.gov. Accessed to: 20 march 2017.
6. Renewables 2015: Global Status Report, REN21, Available at: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2015/07/GSR2015_Key Findings_lowres.pdf. Accessed to: 21 may 2015.
7. Кобышева Н.В., Хайрулина К.Ш. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации. Спб.: Гидрометиздат, 2005. 319 с.
8. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии. М.: КНОРУС, 2010. 232 с.
9. Энергетическая стратегия на период до 2030 года. Доступно по: URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategy>. Ссылка активна на: 16 марта 2013.
10. Керимов И.А., Минцаев М.Ш., Дебиев М.В. Основные этапы реализации программы развития энергетики Чеченской Республики. В сборнике: Геоэнергетика 2019 // Материалы 4 Всероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 38-56.
11. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. Программа развития энергетики Чеченской Республики на 2011-2030 гг. // Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 10-летию со дня основания КНИИ РАН. Грозный, 2011. С.38-63.

12. Дебиев МВ. Анализ эффективности развития региональной энергетической промышленности (на примере Чеченской Республики): дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2014. 212 с.

13. Дебиев МВ., Попов Г.А. Анализ схем развития энергетических мощностей в регионе на основе сценарного подхода // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2012. №1. С. 35-40.

14. Керимов ИА., Дебиев МВ., Магоматов Р.А-М., и др. Ресурсы солнечной и ветровой энергии Чеченской Республики [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, 2012. №1. Доступен по: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/677>.

15. Керимов., Дебиев МВ., Магоматов Р.А-М, и др. Использование гидроаккумулирующих агрегатов в энергосистеме Чеченской Республики // Электронный журнал. Инженерный вестник Дона, 2012. № 1.

16. Бурмистров АА., Виссарионов ВИ., Дерюгини ГВ. и др. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии. М.: МЭИ, 2009.144 с.

Автор публикации

Дебиев Майрбек Вахаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электропривод», Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия.

Reference

1. Barinova VA, Lanshina TA. Features of the development of renewable energy sources in Russia and in the worl. *Russian Entrepreneurship*, 2016;17(2):259-270.

2. Gasch, Robert and Twele, Jochen (ed.) (2013) *Windkraftanlagen. Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Springer, Wiesbaden 2013, p. 569.

3. Walwyn, David Richard; Brent, Alan Colin (2015). Renewable energy gathers steam in South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 41: 390. doi:10.1016/j.rser.2014.08.049.

4. *The Guardian* «Electric cars and cheap solar 'could halt fossil fuel growth by 2020'». Accessed to: March 20, 2017.

5. U.S. *Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis*.URL: NREL.gov. Accessed to: March 20, 2017.

6. Renewables 2015: *Global Status Report*, REN21, http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2015/07/GSR2015_Key_Findings_lowres.pdf. Accessed to: May 21, 2015.

7. Kobysheva NV, Khairulina KSh. Encyclopedia of climatic resources of the Russian Federation St. Petersburg:Gidrometizdat, 2005. 319 p.

8. Sibikin YuD, Sibikin MYu. *Unconventional renewable energy sources*. М.: KNORUS, 2010. P. 232 .

9. *Energy strategy for the period until 2030*. Available at: URL: <http://www.minenergo.gov.ru/activity/energostrategyю>. Accessed to: March 16, 2013.

10. Kerimov IA, Mintsaeв MSh, Debiev MV. The main stages of the implementation of the energy development program of the Chechen Republic In the collection: *Geoenergy-2019 Materials of the 4 All-Russian Scientific and Technical Conference*. 2019. pp. 38-56.

11. Kerimov IA, Gaysumov MYa, Akhmatkhanov RS. Energy Development Program of the Chechen Republic for 2011-2030. Science and education in the Chechen Republic: state and development prospects. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 10th anniversary of the foundation of the Research Institute of the Russian Academy of Sciences*. Grozny, 2011.pp. 38-63.

12. Debiev MV. *Analysis of the development efficiency of the regional energy industry* (on the example of the Chechen Republic): dis. Cand. tech. Sciences: 05.13.01. Volgograd state. tech. un-t Volgograd. 2014. 221p.

13. Debiev MV, Popov GA. *Analysis of the development schemes of energy capacities in the region on the basis of a scenario approach*. Vestnik ASTU. Series: Management, Computing and Informatics, 20;1:35-40.

14. Kerimov IA, Debiev MV, Magomadov R.A.M, et al. Resources of solar and wind energy of the Chechen Republic *Engineering Bulletin of the Don*, 2012. N. 1. Accessed to: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/677>.

15. Kerimov IA, Debiev MV, Magomadov R.A-M, Khamsurkaev KhI. The use of pumped storage units in the energy system of the Chechen Republic. *Electronic journal. Engineering Herald of the Don*, 2012. № 1.

16. Burmistrov AA, Vissarionov VI, Deryugini G.V, et al. *Methods for calculating the resources of*

Проблемы энергетики, 2020, том 22, № 1

renewable energy sources. Moscow: MPEI, 2009. 144 p.

Author of the publication

Mairbek V. Debiev – Grozny State Oil Technical University them. Acad. M.D. Millionschikova Grozny, Russia. Email: mair76@mail.ru.

Поступила в редакцию

21 января 2019г.



ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ РЕГУЛЯТОРОВ ЧАСТОТЫ НА АМПЛИТУДУ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: Рассмотрено применение автономных электротехнических комплексов, имеющих в своем составе параллельно работающие дизель-генераторные агрегаты на основе синхронных генераторов. Описана проблема существования обменных колебаний мощности в таких технических системах. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования автономного электротехнического комплекса. Графическую визуализацию зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от постоянных времени в контурах регулировки частоты вращения дизель-генераторов предложено реализовывать в виде карт настройки. Приведен пример применения предложенной методики конкретного электротехнического комплекса. Обоснована возможность уменьшения амплитуды обменных колебаний мощности путем уменьшения значений постоянных времени контуров регулирования частоты, что является основой нового метода устранения обменных колебаний мощности и дает возможность совершенствования метода, который основан на изменении коэффициентов передачи регуляторов частоты.

Ключевые слова: обменные колебания мощности, параллельная работа, автономный электротехнический комплекс, генераторный агрегат, экспериментальные исследования

Для цитирования: Савенко АЕ., Савенко ПС. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 136-144. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144.

INFLUENCE OF TIME CONSTANTS OF FREQUENCY REGULATORS ON THE AMPLITUDE OF POWER EXCHANGE FLUCTUATIONS IN AUTONOMOUS DIESEL POWER PLANTS

AE Savenko, PS Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: The application of autonomous electrical complexes with parallel diesel generator sets based on synchronous generators is considered. The problem of the existence of exchange power fluctuations in such technical systems is described. A mathematical model has been developed that allows conducting research of an autonomous electrical complex. It is proposed to implement graphical visualization of the dependence of the amplitude of power exchange fluctuations on time constants in the speed control circuits of diesel generators in the form of configuration maps. An example of using the proposed method for a specific electrical complex is given. The possibility of reducing the amplitude of exchange power fluctuations by reducing the values of time constants of frequency control circuits is justified, which is the basis of a new method for eliminating exchange power fluctuations and makes it possible to improve the method, which is based on changing the transmission coefficients of frequency regulators.

Keywords: exchange power fluctuations, parallel operation, autonomous electric power complex, generating set, experimental research.

For citation: Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):136-144. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144.

Введение

Централизованное электроснабжение стало привычным для многих регионов Российской Федерации. Предприятия и население просто не смогут работать и жить без электрической энергии [1]. Десятки атомных, тепловых и гидроэлектростанций производят электрическую энергию для энергосистемы нашей страны и экспорта в соседние государства. Вместе с тем, чрезвычайно востребованными являются автономные электротехнические комплексы с собственным производством электрической энергии [2,3]. Наиболее рациональным и целесообразным оказалось применение в таких комплексах параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов или газотурбинных установок. Автономные электростанции не имеют альтернативы и повсеместно применяются на морских и речных судах во время плавания, там они обеспечивают выполнение производственных и технологических задач и безопасность груза и экипажа [4,5].

Целые населенные пункты, например, в Якутии получают электричество от автономных дизельных электростанций, где зимние температуры опускаются ниже -50 градусов и жизнь проживающих там людей полностью зависит от них. Группа предприятий на Таманском полуострове также имеет собственную генерацию. Республика Крым обеспечивалась электрической энергией после воссоединения с Российской Федерацией десятками параллельно работающими газогенераторными и дизель-генераторными установками. В настоящее время Республика Крым живет за счет работы газотурбинных генераторов Балаклавской и Таврической электростанций по 470 МВт каждая. Есть еще Сакская и Керченская ТЭЦ, ветровые и солнечные электростанции. Таким образом, энергосистема Крыма работает в автономном режиме, а энергомост является резервной линией связи с единой энергосистемой страны.

В автономных электротехнических комплексах с параллельной работой дизель-генераторных агрегатов возникают обменные колебания мощности (ОКМ) [6], которые ограничивают использование электрического оборудования по мощности, уменьшают его ресурс и коэффициент полезного действия и могут привести к обесточиванию, что может иметь катастрофические последствия в критических условиях эксплуатации электростанций [7,8,9]. Системные экспериментальные исследования с использованием современного сертифицированного оборудования, которые длительное время проводились во всех режимах работы электростанции судна морского флота, а затем на его математической модели, позволяют считать наличие люфтов в контурах регулирования частоты основной доказанной причиной ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов [10]. В результате дальнейших исследований разработан метод, позволяющий устранить полностью обменные колебания мощности или существенно уменьшить их амплитуду. Метод основывается на уменьшении коэффициентов передачи регуляторов частоты. Не смотря на эффективность метода, интересны дальнейшие исследования, которые могут позволить совершенствовать предложенный метод или разработать новый.

Методы

Для проведения дальнейших исследований, направленных на поиск новых методов устранения ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов автономной электростанции целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшую себя математическую модель [11,12,13], позволяющую наблюдать изменение наиболее важных величин Mg_1 , Mg_2 – моментов на валах, I_{A1} , I_{A2} – активных токов, ω_{r1} , ω_{r2} – частот вращения валов, Tet_1 , Tet_2 – электрических углов нагрузки двух синхронных генераторов в режиме их параллельной работы.

Подтверждена целесообразность математического моделирования приводного дизельного двигателя уравнениями в упрощенной форме

$$J_m \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_g ;$$
$$M_d = K_m h , M_g = \Psi_{sq} i_{sd} - \Psi_{sd} i_{sq} ,$$

где J_m – приведенный момент инерции валов дизель-генераторной установки, M_d – механический момент развиваемый дизельным двигателем, M_g – электромагнитный момент нагрузки на дизельный двигатель, развиваемый генератором, h – регулирующее перемещение топливной рейки, K_m – коэффициент передачи дизельного двигателя по каналу управления частотой вращения.

Для математического описания элемента, оказывающего наиболее значимое влияние на параметры ОКМ – регулятора частоты вращения дизельного двигателя, используем аperiodическое звено первого порядка

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} U_{\varepsilon} - h,$$

где T_{ω} – постоянная времени регулятора частоты, K_{ω} – коэффициент передачи управляющего сигнала регулятора, U_{ε} – разность между сигналами заданной частоты вращения ω_{r0} и реальной частотой вращения ω_r дизельного двигателя.

Для математического описания люфта (рис. 1) с зазором D_n в контуре регулирования частоты вращения дизельного двигателя используем следующее выражение

$$U_{\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{l} U_{\varepsilon} = \text{const} \text{ для } |U_{\varepsilon} k \varepsilon| \leq D_n \\ k \left(\varepsilon - D_n \text{sign} \left(\frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \right) \right) \text{ для } \frac{dU_{\varepsilon}}{dt} \neq 0 \end{array} \right\},$$

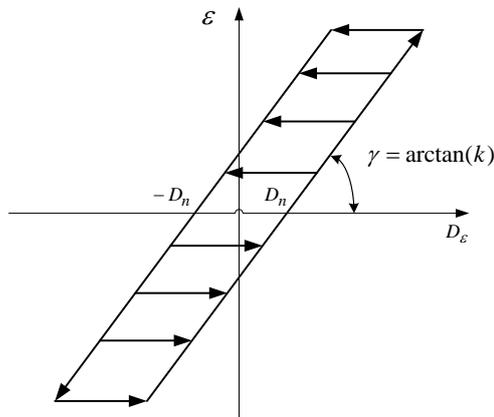


Рис. 1. График характеристики типа люфт контура регулирования частоты вращения дизельного двигателя

где: k – коэффициент передачи, D_n – значение зазора люфта, ε – разность между заданной частотой вращения ω_{r0} и действительной частотой вращения ω_r дизельного двигателя.

Результаты математического моделирования для значений зазоров люфтов первого и второго дизель-генератора представлены на рис. 2. Соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, равными коэффициентами передачи $K_{\omega1} = K_{\omega2} = 50$, уставками по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянными времени $T_{\omega1} = T_{\omega2} = 60$. Графики представлены для квазиустановившегося режима работы на интервалах 3-7 с.

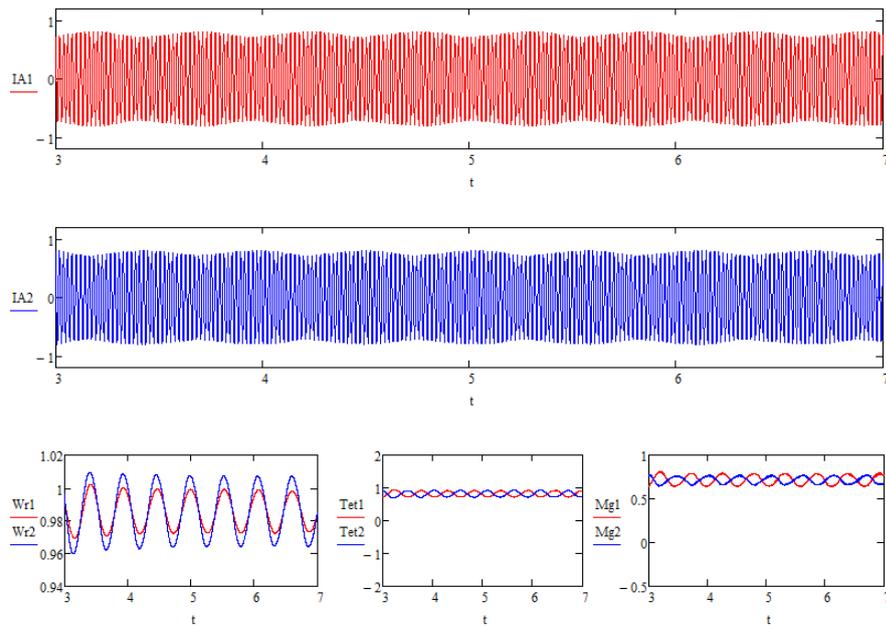


Рис.2. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$.

Результаты математического моделирования, представленные на рис. 2 наглядно иллюстрируют существование ОКМ при параллельной работе дизель-генераторных агрегатов с разными значениями зазоров люфтов в контурах регулирования частоты вращения. Это видно по графикам токов, где максимумы огибающей тока первого дизель-генератора соответствуют минимумам огибающей тока второго дизель-генератора и наоборот, что является главным признаком обменных колебаний мощности. Кроме того, дополнительным подтверждением можно обоснованно считать противофазные изменения углов электрической нагрузки и моментов нагрузки на валах параллельно работающих дизель-генераторов. Результаты, приведенные на рис. 2, всесторонне исследовались ранее [14,15], однако значения постоянных времени регуляторов частоты дизельных двигателей принимались неизменными.

Основной задачей нового исследования является поиск ответа на вопрос, есть ли связь между значениями постоянных времени контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторных агрегатов и амплитудой ОКМ при параллельной работе.

Математическая модель дает возможность проведения анализа ОКМ, наблюдаемых при длительной параллельной работе двух синхронных генераторов автономного электротехнического комплекса в квазиустановившихся режимах. При проведении исследований примем постоянными значения коэффициентов передачи регуляторов K_{ω} , уставок по частоте вращения регуляторов ω_{r0} , зазоры люфтов контуров регулирования скорости вращения дизель-генераторов установим соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$. Для исключения влияния переходных процессов на результаты выберем временной диапазон от 3 до 7 секунд, что соответствует квазиустановившемуся режиму работы.

Результатами проводимого исследования будем считать амплитуды ОКМ, которые удобнее и правильнее всего характеризовать активными токами I_{A1} , I_{A2} генераторов при их параллельной работе.

Результаты

Натурные экспериментальные исследования достоверно подтвердили существование ОКМ во всех режимах работы автономной дизель-генераторной электростанции парома «Ейск» [6]. Это судно около тридцати лет перевозило людей, транспорт и грузы на Керченской паромной переправе между портами «Крым» и «Кавказ» до ввода в эксплуатацию Крымского моста. В настоящее время судно находится в резерве и готово выполнить рейс в случае необходимости. В математическую модель внесены численные значения элементов электротехнического комплекса парома «Ейск».

Диапазоны изменения значений постоянных времени $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ регуляторов

частоты вращения расположены от 10 до 100, при этом обеспечивается устойчивая работа судового электротехнического комплекса. Поэтому, целесообразно провести вычисления и определить соответствующие амплитуды ОКМ именно в этих диапазонах изменения постоянных времени. В наших исследованиях шаг выбран равным 10, это обеспечивает достаточную наглядность и информативность. При необходимости шаг может быть как увеличен, так и уменьшен. Полученные результаты исследований занесены в табл. 1, по данным которой представлена графическая визуализация на рис.3.

Таблица 1.

Зависимость амплитуды ОКМ от значений постоянных времени регуляторов частоты

$T_{\omega 1}/T_{\omega 2}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	0	0	0	0,015	0,037	0,05	0,045	0,045	0,045	0,05
20	0	0	0,022	0,015	0,045	0,052	0,06	0,08	0,07	0,06
30	0	0,022	0,045	0,045	0,052	0,055	0,062	0,065	0,065	0,065
40	0	0,005	0,037	0,037	0,05	0,056	0,06	0,067	0,067	0,067
50	0,005	0,03	0,03	0,037	0,04	0,052	0,055	0,067	0,067	0,067
60	0,005	0,03	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,06	0,065	0,067
70	0,045	0,022	0,015	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,06	0,067
80	0,015	0,015	0,015	0,02	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05	0,055
90	0,03	0,012	0,015	0,017	0,022	0,023	0,03	0,037	0,043	0,05
100	0,037	0,01	0,01	0,015	0,022	0,022	0,025	0,03	0,035	0,043

Построенный график зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ регуляторов частоты вращения представляет собой карту настроек. Из полученной табл. 1 и карты на рис. 3 видно, что амплитуда ОКМ изменяется в зависимости от значений постоянных времени регуляторов частоты и их соотношения. Обменных колебаний мощности практически не возникает при значениях постоянных времени равным 10 или 20 в различных комбинациях. При увеличении значений постоянных времени больше 20 наблюдается возникновение небольших по амплитуде обменных колебаний. Дальнейшему увеличению постоянных времени соответствует еще больший рост амплитуды ОКМ. Максимальное значение амплитуды при проведенном исследовании составляет 0,067, что является значительной величиной. При анализе результатов математического моделирования необходимо отметить, что при значениях постоянных времени больше 40-50, период обменных колебаний постоянен. При уменьшении значений постоянных времени меньше 40-50, вместе с уменьшением амплитуды обменных колебаний, происходит увеличение их периода и огибающая токов становится практически прямой линией, что свидетельствует об исчезновении обменных колебаний. Для диагностики существования обменных колебаний при малых значениях постоянных времени необходимо рассматривать графики моментов и углов нагрузки параллельно работающих генераторов. На рис. 4 приведены результаты математического моделирования параллельной работы двух дизель-генераторных установок для значений зазоров люфтов соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, равными коэффициентами передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставками по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянными времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 20$. Из графиков видно, что, начиная примерно с 5 секунды, когда заканчиваются переходные процессы, обменные колебания исчезают.

Обсуждение

Результаты исследования работы автономного электротехнического комплекса, полученные при помощи методов математического моделирования, показывают, что амплитуда ОКМ параллельно работающих дизель-генераторных агрегатов изменяется в зависимости от значений постоянных времени в контурах управления частотами вращения. Информация в табл.1 и на рис. 3 и 4 дает основания для заключения о том, что при малых значениях постоянных времени обменные колебания практически отсутствуют, а их увеличение соответствует увеличению амплитуды обменных колебаний, при этом все остальные параметры автономного электротехнического комплекса не изменялись. Результаты получены для значений зазоров люфтов двух дизель-генераторов соответственно $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, которые в свою очередь являются основной причиной обменных колебаний и от значений которых зависит амплитуда обменных колебаний мощности [10]. Таким образом, для получения исчерпывающей информации необходимо для каждой пары значений люфтов в диапазоне

их изменения (табл. 2) провести аналогичные исследования и получить локальные карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений постоянных времени контуров регулирования частоты. Значения амплитуды ОКМ в табл. 2 получены для

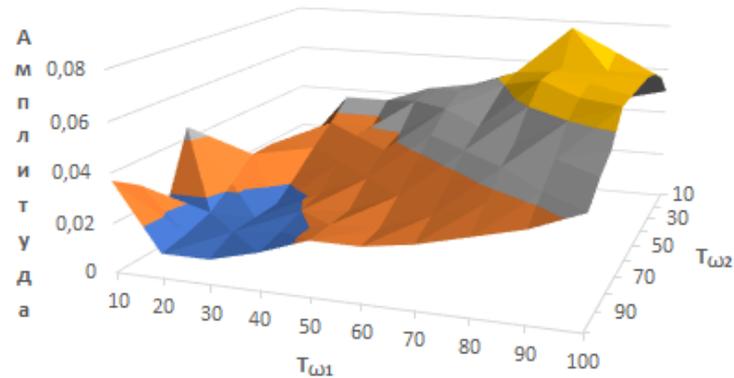


Рис. 3. Карта настроек зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени регуляторов частоты. $T_{\omega 1}$ и $T_{\omega 2}$ – постоянные времени регуляторов частоты двух параллельно работающих дизель-генераторных установок соответственно.

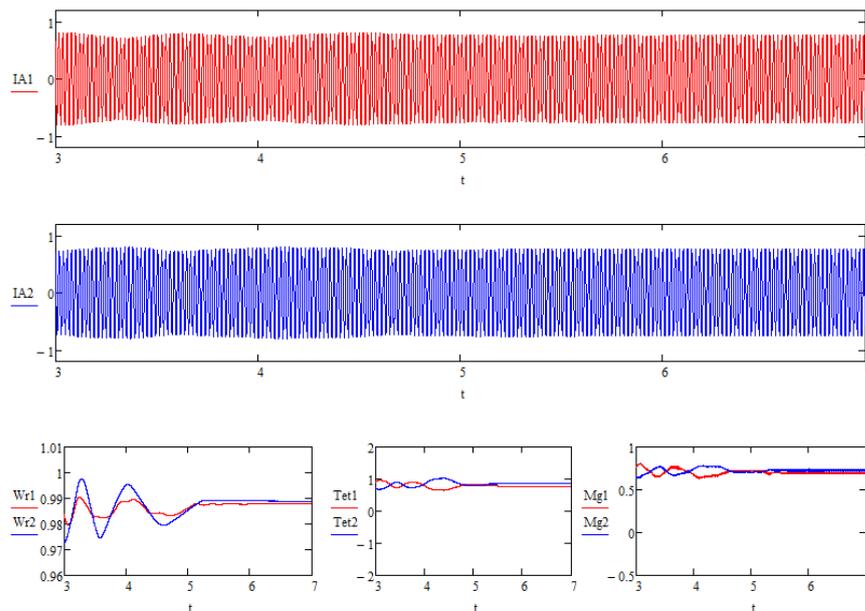


Рис.4. Результаты моделирования. Зазоры люфта $D_{n1}=0,002$ и $D_{n2}=0,01$, коэффициенты передачи $K_{\omega 1} = K_{\omega 2} = 50$, уставки по частоте вращения $\omega_{r01} = \omega_{r02} = 1$ и постоянные времени $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 20$.

Их изменения (табл. 2) позволяют провести аналогичные исследования и получить локальные карты зависимости амплитуды обменных колебаний мощности от значений постоянных времени контуров регулирования частоты. Значения амплитуды ОКМ в табл.2 получены для постоянных времени регуляторов частоты вращения $T_{\omega 1} = T_{\omega 2} = 60$. Результатом таких исследований будет семейство поверхностей, аналогичных поверхности, изображенной на рис. 3. Так как результаты исследования, представленные в таблице 1 и на рис. 3, получены с использованием численных значений дизель-генераторов 6VD26/20-AL-2 и генераторов S450MG 800кВА, которые установлены на пароме «Ейск», то информация детально описывает ОКМ для этого электротехнического комплекса. Аналогичные результаты в виде карт зависимости амплитуд ОКМ от значений постоянных времени.

Зависимость амплитуды ОКМ от значений зазоров люфта

D_{n1} / D_{n2}	0	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,02
0	0	0,011	0,021	0,031	0,04	0,052	0,065	0,071	0,083	0,095	0,1
0,002	0,01	0,0015	0,011	0,021	0,033	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09	0,1
0,004	0,02	0,01	0,002	0,012	0,021	0,035	0,045	0,056	0,068	0,076	0,09
0,006	0,028	0,018	0,007	0,003	0,013	0,024	0,034	0,048	0,057	0,07	0,081
0,008	0,04	0,03	0,02	0,0065	0,0025	0,0135	0,024	0,036	0,048	0,058	0,068
0,01	0,05	0,04	0,03	0,018	0,0075	0,0062	0,0145	0,024	0,039	0,048	0,058
0,012	0,065	0,051	0,038	0,028	0,0165	0,007	0,004	0,015	0,025	0,038	0,048
0,014	0,075	0,063	0,052	0,04	0,028	0,015	0,006	0,004	0,015	0,027	0,039
0,016	0,09	0,08	0,063	0,051	0,04	0,0255	0,015	0,0045	0,006	0,015	0,027
0,018	0,1	0,09	0,075	0,06	0,051	0,036	0,027	0,015	0,045	0,0075	0,015
0,02	0,117	0,1	0,086	0,075	0,062	0,05	0,04	0,027	0,015	0,006	0,0065

контуров регулирования частоты могут быть получены для произвольных автономных дизельных электростанций.

Основным теоретическим результатом проведенных исследований является возможность разработки нового метода устранения обменных колебаний мощности путем уменьшения значений постоянных времени контуров частоты. Также возможно дополнение ранее разработанного метода, в котором обменные колебания мощности устранялись за счет изменения коэффициентов передачи регуляторов частоты параллельно работающих генераторов, т.е. можно одновременно или поочередно изменять значения постоянных времени и коэффициентов передачи контуров частоты.

Заключение

Представленные в статье результаты представляют собой развитие и совершенствование чрезвычайно важной работы [6], направленной на разработку методов и средств устранения ОКМ в автономных дизельных электростанциях с использованием параллельной работы. Они позволяют существенно повысить показатели качества и эффективности работы таких технических систем. Разработанная и представленная методика построения карт зависимости амплитуды ОКМ от значений постоянных времени контуров регулирования частоты продемонстрирована на примере автономного электротехнического комплекса конкретного объекта. Обоснована возможность уменьшения амплитуды ОКМ путем уменьшения значений постоянных времени контуров регулирования частоты, что является основой нового метода устранения обменных колебаний мощности и дает возможность совершенствования метода, который основан на изменении коэффициентов передачи регуляторов частоты.

Литература

1. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019 с. 361-367.
2. Delgado C., Dominguez-Navarro J.A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // Ninth international conference on publication year (EVER). 2014. pp. 1-8.
3. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
4. Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // Электротехника. 2016. № 3. С. 35-40.
5. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., и др. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки // Морской вестник. 2013. № 1. С. 40-42.
6. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново. 2016. 172 с.
7. Sylvain L.S. Voltage oriented control of three- phase boost pwm converters. Göteborg: Chalmers University of Technology. 2010. 114 p.
8. Nguyen Q.-K., Schuster J., Roth-Stielow J. Energy Optimal Control of an Electrically Excited Synchronous Motor used as Traction Drive. 9th International Conference on Power Electronics. ECCE

Asia June 1-5, 2015. pp. 2789-2795.

9. Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcov'a V. Design of Rotating Electrical Machines // John Wiley & Sons, Ltd. 2008. 31 p.

10. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46-54.

11. Савенко А.Е. Математическая модель судового электротехнического комплекса // Вестник ИГЭУ. 2015. № 5. С. 54-59.

12. Голубев А.Н., Мартынов В.А., Алейников А.В. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. 2015. № 1. С. 10-13.

13. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. 2017. № 5. С. 37-43.

14. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. Taylor and Francis Group, LLC, 2006. 545 p.

15. Тютиков В.В., Воронин А.И. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 3(164). С. 154-164.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет.

Савенко Павел Станиславович – курсант, Керченский государственный морской технологический университет.

References

1. Gracheva EI, Alimova AN. Calculating Methods and Comparative. *Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2019. pp. 361-367

2. Delgado C, Dominguez-Navarro JA. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. *Ninth international conference on publication year (EVER)*. 2014. pp. 1-8.

3. Hvatov OS, Dar'enkov AB. Elektrostantsiya na baze dizel'-generatora peremennoy chastoty vrashcheniya. *Elektrotehnika*. 2014;3:28-32.

4. Hvatov OS, Dar'enkov AB. Edinaya elektrostantsiya transportnogo ob'ekta s elektrodvizheniem na baze dizel'-generatornoj ustanovki peremennoy chastoty vrashcheniya. *Elektrotehnika*. 2016;3:35-40.

5. Kalmykov AN, Kuznetsov VI, Sen'kov AP. et al. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki. *Morskoy vestnik*. 2013;1:40-42.

6. Savenko AE, Golubev AN. Obmennye kolebaniya moshchnosti v sudovykh elektrotekhnicheskikh kompleksa. *Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiiy universitet imeni V.I. Lenina*. Ivanovo. 2016. 172 p.

7. Sylvain LS. Voltage oriented control of three- phase boost PWM converters. *Göteborg: Chalmers University of Technology*. 2010. 114 p.

8. Nguyen Q.-K, Schuster J, Roth-Stielow J. Energy Optimal Control of an Electrically Excited Synchronous Motor used as Traction Drive. *9th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia June 1-5, 2015*. pp. 2789-2795.

9. Pyrhonen J, Jokinen T, Hrabovcov'a V. Design of Rotating Electrical Machines. *John Wiley & Sons, Ltd*. 2008. 531 p.

10. Savenko AE, Savenko PS. Vlijanie ljufta na amplitudu obmennykh kolebanij moshhnosti v avtonomnykh jelektrotekhnicheskikh kompleksah. *Izvestija vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki*. 2018;20(5-6):46-54.

11. Savenko AE. Matematicheskaya model' sudovogo elektrotekhnicheskogo kompleksa. *Vestnik IGEU*, 2015;5:54-59.

12. Golubev AN, Martynov VA., Aleynikov AV. Matematicheskaya model' dlya rascheta elektromagnitnykh sil v sinkhronnom elektroprivoде s postoyannymi magnitami. *Vestnik IGEU*, 2015;1:10-13.

13. Golubev AN, Martynov VA, Aleynikov AV. Razrabotka utochnennoj matematicheskoy modeli sinhronnogo dvigatelja s postoyannymi magnitami dlja raschetov v real'nom vremeni. *Vestnik IGEU*.

2017;5:37-43.

14. Reimert D. Protective relaying for power generation systems. *Taylor and Francis Group, LLC*, 2006. 545 p.

15. Tyutikov VV, Voronin AI. Metodika sinteza regulyatorov dlya nezavisimogo formirovaniya staticheskikh i dinamicheskikh pokazateley nelineynykh ob'ektov. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015;3(164):154-164.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia. Email: Savenko-70@mail.ru.

Pavel S. Savenko – Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia.

Поступила в редакцию

28 января 2019г.

Сдано в набор 09.01.2020
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ №
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная