



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**2020
№ 1**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова
(БГТУ им. В.Г. Шухова)**



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научный журнал

2020 год, № 1



ENERGY SYSTEM

Scientific journal

2020, Vol. 1

Сайт журнала: <http://j-es.ru/>

Тел.: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru.

Год основания журнала – 2016.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права и плагиата и принципах, изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции. Авторы статей сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы и вправе использовать свои произведения независимо от журнала.

© БГТУ им. В.Г. Шухова



Websity: <http://j-es.ru/>

Telephone: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru.

The journal was founded in 2016.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright and plagiarism and the principles in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers.

All published materials are presented in the author's edition. The authors of the articles retain exclusive rights to the materials placed in the collection and have the right to use their works regardless of the journal.

© Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Трубаев Павел Алексеевич, председатель (главный редактор)

Д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Белоусов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, зав. каф. электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Бирюков Алексей Борисович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной теплофизики ДонНТУ (г. Донецк)

Гашо Евгений Геннадиевич

Д-р техн. наук, доц., проф. кафедры Промышленных теплоэнергетических систем института проблем энергетической эффективности Национального исследовательского университета «МЭИ», эксперт аналитического центра при правительстве РФ (г. Москва)

Мозговой Николай Васильевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (г. Воронеж)

Радченко Вадим Витальевич

Канд. экон. наук, заместитель председателя Совета депутатов города Белгорода, директор ООО «Центр энергосервисных технологий» (г. Белгород)

Севостьянов Владимир Семенович

Д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель РФ, зав. каф. технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Удовиченко Злата Викторовна

Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.).

Marina Kozhukhova

PhD, COLLEGE OF Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee)

Корнилова Наталья Вячеславовна, научный секретарь

Ст. преп. кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

EDITORIAL BOARD

Pavel Trubaev, Chief editor

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor of the Department of Energy engineering of heat technology BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexandr Belousov

Cand. of Tech. Sciences (PhD), head of the Faculty of Energy, information technology and control systems BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexey Birukov

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial Thermal Physics Donetsk National Technical University (Donetsk)

Evgeniy Gasho

Dr. of Tech. Sciences (DSc), Professor of the Department of Industrial heat and energy systems Moscow Power Engineering Institute, Expert of Analytical Center Under the Government of the Russian Federation (Moscow)

Nikolay Mozgovoy

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial ecology and Safety Voronezh State Technical University (Voronezh)

Vadim Radchenko

Cand. of Econom. Sciences (PhD), Vice-chairman of the Belgorod City Council, CEO of the Center of Energy Technologies Ltd (Belgorod)

Vladimir Sevostyanov

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Head of the Department Technological complexes, machines and mechanisms BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Marina Kozhukhova

PhD, Adjunct Professor University of Wisconsin-Milwaukee (Milwaukee)

Zlata Udovichenko

Cand. of tech. Sciences (PhDS), Associate Professor (Reader) of the Department of Heat and gas supply and ventilation Donbass Academy of Architecture and Construction (Makeyevka)

Natalia Kornilova, Scientific secretary

Senior Lecturer of the Department of Power engineering and automatics BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....11

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Гашо Е.Г., Киселева А.И., Темеров А.В.
Практика внедрения гибридных систем теплоэнергоснабжения в России.....13

Корякина Л.В., Новикова О.В.
Некоторые аспекты развития рационального ТЭК с учетом уровня энергобезопасности19

Медведева О.Н., Первалов С.Д.
Логистико-математическая модель эффективности применения сжиженного природного газа28

Руцков А.Л., Фёдоров Я.П., Волков Л.В.
Технико-экономическая оптимизация объектов топливно-энергетического комплекса с применением элементов нечёткой логики и искусственных нейронных сетей34

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Абед А.Х., Хусейни Х.А., Пахалуев В.М.
Повышение тепловых характеристик радиатора с вертикальным обребрением при использовании аэрозольно-испарительного охлаждения42

Костарев В.С., Ширманов И.А., Аникин А.А., Щеклеин С.Е.
О возможности получения суперсверхкритических параметров пара на АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с использованием неядерного перегрева пара.....52

Мильто О.А., Амосов Н.Т.
Применение конденсационных теплоутилизаторов для повышения эффективности работы котельных агрегатов59

Пащенко В.С.
Оптимизационный расчет радиальной микротурбины с водяным или пентанфторпропановым паром в программной среде67

Серебряков А.С., Осокин В.Л., Семенов Д.А., Дулепов Д.Е.
Новое устройство для контроля качества высоковольтной электрической изоляции76

Хараим М.П., Костарев В.С., Акифьева Н.Н., Южакова А.А., Жукова Л.В., Корсаков А.С.
О возможности применения инфракрасных кристаллических световодов для передачи сигнала температуры от подшипников внутри гермообъема АЭС.....86



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**Влацкая Л.А., Семенова Н.Г.**

Сравнительный анализ стохастических алгоритмов выбора мощности компенсирующих устройств в узлах электрической сети.....94

Дадабаев Ш.Т.

Исследования провалов напряжения в сети при пусковых режимах мощных асинхронных двигателей102

Романюк Н.В., Новикова О.В.

Повышение энергоэффективности путем уменьшения хищения электроэнергии108

Фёдорова В.А., Кириченко В.Ф., Глазырин Г.В.

Метод ускоренной синхронизации генератора с контролем угла включения.117

Герман Л.А., Серебряков А.С., Осокин В.Л., Дулепов Д.Е.

Комплексная система регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации в системе с распределенной нагрузкой.....126

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**Аникина И.Д., Калмыков К.С.**

Использование тепловых насосов на ТЭЦ с поперечными связями в условиях дефицита сбросной теплоты.....137

Байда Б.Ю., Карнаух В.В., Бирюков А.Б.

Энергетическое и эксергетическое исследование R1234YF, R1234ZE для парокомпрессионной теплонасосной установки.....145

Говоркова Л.К., Анохина О.К.

Качество водной среды обитания гидробионтов в зоне действия теплоэлектростанции153

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**Воскресенская С.Н., Бекиров Э.А., Енина А.А.**

Разработка программы расчета фотоэлектрической системы166

Корнилова Н.В., Трубаев П.А.

Расчет совместного сжигания биогаза и RDF топлива173

Леонов Е.С., Трубаев П.А.

Исследование влияние состава биогаза на свойства факела.....183

Маринина С.С., Яворовский Ю.В., Султангузин И.А.

Солнечное теплоснабжение индивидуального дома с использованием льдоаккумуляторной установки190

Муровский С.П., Муровская А.С., Иванова Е.В.

Повышение эффективности комбинированных систем энергоснабжения удаленных объектов200



ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ**Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В., Иванова С.В.**

Исследование процесса рекуперации теплоты внутри футеровки высокотемпературной установки за счет термического разложения метана ..209

Калайда М.Л., Гордеева М.Э.

Кластерная характеристика вод, используемых объектами энергетики, по величине суммарной антиоксидантной активности219

Фролов В.В., Приходько О.Ю., Слипченко С.Е.

Расчет энергоэффективных режимов резания токарной обработки.....228

СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**Васильковский А.Р.**

Гибридная электростанция для экономически выгодного электроснабжения собственных нужд подстанций237

Ворогушина Н.И.

Анализ эффективности пароорганической технологии с внутренней регенерацией в органическом цикле Ренкина242

Воронкова А.С.

Анализ показателей эффективности двухтопливных парогазовых установок с параллельной схемой работы.....249

Дыбова О.А.

Моделирование переходного процесса с учетом изменения температуры электрической цепи256

Елисеев А.А.

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебное исследование разделительных трансформаторов в частотной области261

Ионова В.И.

Моделирование влияния трансформатора на характер переходного процесса в линиях системы электроснабжения267

Ионова В.И.

Учет временной диаграммы нагрузки оборудования при выборе компенсирующих устройств в системах электроснабжения272

Русинов В.Л., Воловиков А.А., Буровов А.В.

Многоточечный измеритель температуры277

Чехранова О.А.

Улучшение экологической ситуации и безопасности мегаполиса путем модернизации энергопромышленного комплекса283



CONTENT

Preface	11
POWER SYSTEMS AND COMPLEXES	
E.G. Gasho, A.I. Kiseleva and A.V. Temerov Russian experience of heat-and energy supply hybrid systems implementation	13
L.V. Koriakina and O.V. Novikova Some aspects of fuel and energy complex rational development in terms of energy security	19
O.N. Medvedeva and S.D. Perevalov Logistic and mathematical model of the effectiveness of liquefied natural gas use	28
A.L. Rutskov, Ya.P. Fedorov and L.V. Volkov Electrical energy consumption optimization for fuel and energy complex facilities based on the fuzzy logic model and artificial neural networks.....	34
HEAT AND POWER ENGINEERING	
A.H. Abed, H.A. Hussein and V.M. Pakhaluev Study of thermal characteristics of the radiator with vertical finning using aerosol evaporative cooling	42
V.S. Kostarev, I.A. Shirmanov, A.A. Anikin and S.E. Shcheklein Implementation of non-nuclear superheating of steam to obtain ultra-supercritical parameters at NPP with fast neutron reactors.....	52
O.A. Milto and N.T. Amosov Condensing heat recovery unit use for operation efficiency increase of boiler units	59
V.S. Pashchenko Optimization calculation of radial microturbine with water or pentanforpropane steam in the Python environment	67
A.S. Serebryakov, V.L. Osokin, D.A. Semyonov and D.E. Dulepov Device for quality control of high voltage electrical isolation	76
M.P. Kharam, V.S. Kostarev, N.N. Akif'eva, A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova and A.S. Korsakov Use of infrared crystal fiber in bearings temperature sensing system inside an NPP containment	86
ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING	
L.A. Vlatskaya and N.G. Semenova Stochastic algorithms comparative analysis of power selection for compensating device in electric network nodes.....	94



S.T. Dadabaev

Study of voltage dips in electrical line at startup mode of powerful asynchronous motors 102

Y.V. Romaniuk and O.V. Novikova

Increase of energy efficiency by electricity theft elimination 108

V.A. Fedorova, V.F. Kirichenko and G.V. Glazyrin

Method of rapid generator synchronization with switching angle control 117

L.A. German, A.S. Serebryakov, V.L. Osokin and D.E. Dulepov

The complex system of power control of transverse capacitive compensation device in a system with distributed load 126

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY, POWER ECOLOGY**I.D. Anikina and K.S. Kalmykov**

Use of heat pumps in chp with cross-connections in a context of waste heat deficit 137

Energy and exergy study of freon's R1234YF and R1234ZE for a vapor compression heat pump unit 145

L.K. Govorkova and O.K. Anokhina

Quality of hydrobiont's aquatic habitat near a thermal power plant 153

ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES**S.N. Voskresenskaia, E.A. Bekirov and A.A. Enina**

Development of software for photoelectric system calculation 166

N.V. Kornilova and P.A. Trubaev

Calculation of biogas and RDF cofiring 173

E.S. Leonov and P.A. Trubaev

Analysis of biogas composition influence on the flame characteristic 183

S.S. Marinina, Y.V. Yavorovsky and I.A. Sultanguzin

Solar heating supply of an individual home using an ice accumulating unit 190

S.P. Murovskii, A.S. Murovskaia and E.V. Ivanova

Efficiency increase of combined power supply systems of remote facilities 200

ENERGY AND RESOURCE SAVING IN TECHNOLOGIES**E.G. Neshporenko, S.V. Kartavtcev and S.V. Ivanova**

Study of heat recovery process inside a lining of a high-temperature plant using thermal decomposition of methane 209

M.L. Kalayda and M.E. Gordeeva

Classification of waters, used by energy facilities, by summary antioxidant activity value 219

Frolov V.V., Prikhodko O.Yu. and Slipchenko S.E.

Calculation of the energy-efficient cutting modes in turning operation 228



YOUNG RESEARCHERS SECTION**A.R. Vasilkovskii and V.V. Kovalenko**

A hybrid power plant for cost-effective electric power supply to substations for their own needs.....237

N.I. Vorogushina and P.A. Shchinnikov

Analysis of the efficiency of steam-organic technology with internal regeneration in the organic renkin cycle242

A.S. Voronkova and O.V. Borush

Data analysis of the effectiveness of dual-fuel combined-cycle plants with the parallel scheme of operation.....249

O.A. Dybova and D.P. Andrianov

Transient process modeling with the consideration of an electrical circuit temperature change.....256

A.A. Eliseev and V.E. Shmelev

Electromagnetic compatibility in electric power production industry: educational research of isolation transformers in the frequency domain261

V.I. Ionova and D.P. Andrianov

Modeling of the transformer influence on a character of the transient process in transmission lines of an electrical power supply system.....267

V.I. Ionova and D.P. Andrianov

Consideration of the timing load diagram of equipment when selecting compensating devices in electric power supply systems272

V.L. Rusinov, A.A. Volovikov and A.V. Burovov

Multipointed temperature meter277

O.A. ChEkhranova and E.G. Gasho

Improvement of environmental conditions and safety of a metropolitan city by energy industrial complex modernization.....283



Предисловие

В выпуске журнала представлены материалы V-ой международной научно-технической конференции «Энергетические системы», которая состоялась 19-20 ноября 2020 г. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова).

Проведение конференции способствовало решению фундаментальных научных проблем в области энергетики с позиций системного подхода, что обусловлено укрупнением и усложнением изучаемых систем, потребностями управления большими системами и интеграции знаний. Так же одной из задач конференции было широкое привлечение к исследованиям молодых ученых – студентов, магистрантов, аспирантов.

Рабочие языки конференции – русский и английский. На конференцию после прохождения процедуры рецензирования было отобрано 86 докладов – 24 русскоязычных в основных секция конференции, 9 докладов в секции молодых ученых, 53 докладов на английском языке.

В связи с коронавирусными ограничениями, конференция проводилась дистанционно на платформе zoom.



The V International Scientific and Technical Conference “Energy systems” (ICES - 2020) was hosted by the federal state budget institution of higher education “Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov” (BGТУ named after V.G. Shukhov) on November 19-20, 2020.

The conference suggested the solution to fundamental scientific problems in the field of energy. The main point is a systematic approach. The studied systems are complex and require the management of large systems and integration of knowledge. Also, one of the objectives of the conference was the wide involvement of young scientists – students, undergraduates, and graduate students.

The working languages of the conference were English and Russian. 86 reports were selected for the conference. As a result of the conference 33 Russian-language reports were prepared in the main section of the conference, 53 reports were in English.

Due to the COVID-19 epidemic the organizing committee decided to hold NMCI 2020 virtually/online in ZOOM.



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

POWER SYSTEMS AND COMPLEXES



УДК 620.9

ПРАКТИКА ВНЕДРЕНИЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В РОССИИ

Д-р техн. наук, доцент **Гашо Е.Г.**¹Аспирант **Киселева А.И.**¹Генеральный директор **Темеров А.В.**²¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва²ООО «АльтЭнергия», г. Анапа

***Аннотация.** В исследовании проведен анализ потенциала нетрадиционных и возобновляемых источников для систем энергообеспечения объектов. Рассмотрен мировой опыт внедрения альтернативных источников энергии и дана оценка состоянию и внедрению гибридных схем в России. Предложены варианты гибридных схем энергообеспечения для объектов различного назначения. Рассматриваются ключевые проблемы активно-го использования гибридных систем и предлагаются пути их решения.*

***Ключевые слова:** нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, теплоэнергоснабжение, гибридные системы, солнечные электростанции*

Задача создания комбинированных источников энергии для покрытия разноплановых (тепловых, электрических и др.) нагрузок является не совсем новой. В последнее время системы гибридного энерго-снабжения становятся весьма популярны [1]. Они предусматривают использование различных источников энергии. Электрическая энергия генерируется с использованием солнечных фотоэлектрических панелей, ветряных турбин или других систем преобразования. Генерирование тепловой энергии для систем отопления, горячего водоснабжения и технологических процессов осуществляется с использованием солнечных коллекторов (плоских и вакуумных трубчатых), геотермальных систем, а также других преобразователей тепловой энергии. Повышение энергетической эффективности и необходимость ресурсосбережения являются актуальными проблемами практически во всех странах мира. Для решения этих проблем в последние годы разрабатывается новая энергетическая политика, основанная на использовании гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии (HRES — Hybrid Renewable Energy System).



За период 2013-2018 гг. наметился определённый прогресс в развитии возобновляемой энергетики в России. Правительством РФ принято ряд Постановлений и Распоряжений по организации работ в области ВИЭ. Однако, несмотря на обширный список документов, призванных обеспечить развитие ВИЭ в России, в реальности они носят в основном декларативный характер и слабо применяются на практике. При этом, по оценкам российских специалистов, потенциал ВИЭ в России составляет более чем 270 млн т усл. топл. — около 30% от общей первичной поставки энергоресурсов. К сожалению, первоначально установленная доля ВИЭ – 4,5% от общего производства электроэнергии в 2020 году, была снижена до 2,5%. Сегодня в России речь идет о достижении экономического роста, потребности в освоении пространства с разными климатическими условиями, соответствующем строительстве больших объемов жилья и эффективных производственных мощностей [2]. Рациональное применение комбинированных, гибридных систем на основе ВИЭ в этих случаях вполне может способствовать более эффективным решениям, приводящим к различным системным (мультипликативным) эффектам.

В России насчитываются тысячи отдельных объектов и целых населенных пунктов, которые не имеют доступа к централизованному энергоснабжению и используют в качестве источников энергии дизельные и бензиновые электростанции. Подача электричества здесь зачастую нестабильна и зависит от завоза топлива, а обслуживание установок сопряжено с высокими эксплуатационными затратами. Для создания независимых энергокомплексов в таких районах все чаще стали применяться ветро-солнечные электростанции, которые отличаются большей экологичностью, экономичностью и безопасностью в сравнении с традиционными способами генерации электричества. Однако превалирование их положительных особенностей не гарантирует должной степени надежности эксплуатации, ведь работа систем на основе ВЭУ и СЭС подвержена определенным рискам [3]. Так, определяющим фактором, от которого напрямую зависит производительность установки, являются погодные условия в данной местности (скорость и продолжительность ветра, мощность солнечного излучения и т. д.) [4].

Для теплоснабжения частных домов широкое распространение вне зависимости от климатической зоны получили тепловые насосы [5]. Использование теплового насоса позволяет в холодное время года отапливать жилой дом, в теплое – охлаждать. На примере индивиду-



ального жилого дома (Республика Бурятия) можно оценить эффективность использования гибридных систем тепло- и холодоснабжения.

На рис. 1 представлена схема энергоснабжения жилого дома с использованием реверсивного грунтового теплового насоса и солнечных коллекторов. Источником тепла и холода являются три скважины глубиной 100 м.

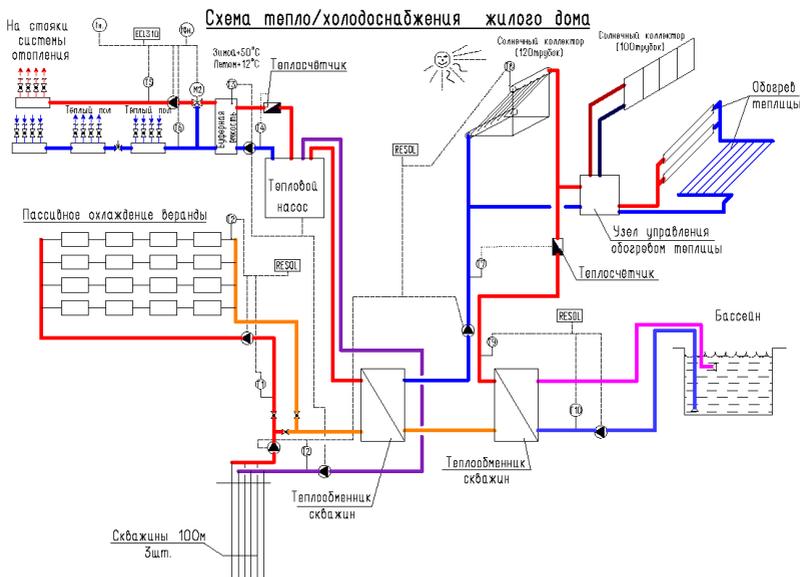


Рис. 1. Схема гибридного энергоснабжения жилого дома

Две группы вакуумных солнечных коллекторов (рис. 2, 3): на крыше дома 120 трубок и на теплице 100 трубок (итого 18 м²). У СК несколько режимов (вариантов) работы:

1) зимой (отопительный период) все 220 трубок работают на подогрев низкого контура ТН и покрывают 15-17% годового потребления тепловой энергии на отопление;

2) с середины марта (конец отопительного сезона) месяца 100 трубок, установленных на теплице, переключаются на обогрев почвы в теплице и уже через месяц, в середине апреля, высаживается рассада. В конце мая все коллекторы работают на подогрев воды в уличном бассейне и на подогрев скважин.





Рис. 2. Группа солнечных коллекторов для энергообеспечения жилого дома (расположение - крыша)



Рис. 3. Группа солнечных коллекторов для энергообеспечения жилого дома (расположение - теплица)

Такое сочетание источников энергии «тепловой насос и солнечный коллектор» является наиболее распространенным на территории Российской Федерации. Почти вся территория России подвержена инсоляции в той или иной мере, поэтому таких примеров немало: гибридная солнечная электростанция мощностью 45 кВт в Краснодарском крае, каскад геотермальных насосов в Омской области, солнечная гибридная система, обеспечивающая высокую степень бесперебойности электроснабжения в Ростове-на-Дону, геотермальный тепловой насос в Ленинградской области и т.д. [6].

Выводы: Успешное применение ВИЭ и тепловых насосов в России все еще остается уделом групп энтузиастов без государственной политики и поддержки, в результате страна не реализует дополнительные возможности развития экономики и промышленности. Сегодня в России речь идет о достижении экономического роста, потребности в освоении пространства с разными климатическими условиями, соответствующем строительстве больших объемов жилья и эффективных производственных мощностей. Рациональное применение комбинированных, гибридных систем на основе ВИЭ в этих случаях вполне может способствовать более эффективным решениям, приводящим к различным системным (мультипликативным) эффектам.

По мнению авторов рассмотренных проектов [1, 7], ключевыми мерами системной поддержки развития и реализации ВИЭ являются:

– увеличение рынка путем предоставления дотаций на приобретение техники на основе ВИЭ;

- предоставление льготных кредитов на приобретение и установку техники через уполномоченные банки;
- стимулирование строительства энергоэффективного жилья с установкой систем на основе ВИЭ и ТНУ в качестве источников теплоэнергоснабжения;
- применение понижающих коэффициентов к местному тарифу на электроэнергию для пилотных установок на ВИЭ (как это делается для домов, оборудованных электроплитами);
- создание (актуализация) отечественных нормативов, стандартов, сводов правил, ГОСТов, регламентирующих применение соответствующих установок на ВИЭ в российских условиях;
- широкая информационная поддержка успешных проектов в разных сферах и областях.

Библиографический список

1. Возобновляемая энергетика: примеры и практики реального использования / Под редакцией Е.Г. Гашо, Р.Н. Разеренова. М.: РИА, 2019. 80 с. URL: https://mpei.ru/personal/Lists/CadrePapers/Attachments/2997/ВИЭ_чистовик_2001.12.19.pdf.
2. Power Systems of the Future: A 21st Century Power Partnership Thought Leadership Report [Электронный ресурс] / О. Zinaman, М. Miller, А. Adil et al. Denver: National Renewable Energy Laboratory. 2015. 45 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62611.pdf>
3. **Li X., Min Z., Zhu P.** Storage and Recycling of Interfacial Solar Steam Enthalpy // Joule. 2018. V 2. P. 247-248. DOI: [10.1016/j.joule.2018.08.008](https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.008).
4. **Дашев С.С., Малышев Е.А.** Солнечная энергетика: состояние и перспективы // Вестник науки и образования. 2018. № 17-1 (53). С. 51-53. [eLIBRARY ID: [36551134](https://elibrary.ru/36551134)]
5. Combined heat and power from hydrothermal geothermal resources in Germany: An assessment of the potential / S. Eyerer, C. Schiffechner, S. Hofbauer et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. V 120. P. 109661. DOI: [10.1016/j.rser.2019.109661](https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109661).
6. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы / О.В. Григоращ, С.В. Божко, А.Ю. Попов и др. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2012. 174 с. [eLIBRARY ID: [19011873](https://elibrary.ru/19011873)]
7. **Даменов Е.А., Рустамов Н.Т.** Создание гибридных энергетических систем // Техника. Технологии. Инженерия. 2018. № 2 (8). С. 33-35. [eLIBRARY ID: [32779034](https://elibrary.ru/32779034)]



RUSSIAN EXPERIENCE OF HEAT-AND ENERGY SUPPLY HYBRID SYSTEMS IMPLEMENTATION**E.G. Gasho¹, A.I. Kiseleva¹ and A.V. Temerov²**¹*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow*²*Altenergy Ltd, Anapa*

Abstract. The article has examined variants of combined heat supply systems development using solar panels and heat pumps in different climatic zones of Russia. The successful operation of renewable energy sources and heat pumps in Russia still depends on enthusiasts without government support. Rational use of combined and hybrid systems based on renewable sources of energy in these cases might quite possibly lead to more efficient solutions which result in different system`s multiplicative effects.

Keywords: alternative and renewable sources of energy, heat and energy supply, hybrid systems, solar power stations.



УДК 658.5.011

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ТЭК С УЧЕТОМ УРОВНЯ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ

Студент **Корякина Л.В.**

Канд. эк. наук, доц. **Новикова О.В.**

*Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. *В статье рассмотрены особенности и угрозы для энергетической безопасности Республики Саха (Якутия). Проанализирован топливно-энергетический баланс региона. Проведена оценка энергетической безопасности региона по индикативному методу. Проанализированы возможности оптимизации и повышения энергетической безопасности топливно-энергетического комплекса региона.*

Ключевые слова: *топливно-энергетический баланс, энергетическая безопасность, метод индикативного анализа, возобновляемые источники энергии (ВИЭ)*

Актуальность: Оценка уровня энергетической безопасности (ЭБ) должна быть использована для согласования с планами развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) региона с точки зрения максимизации ЭБ. Рассмотрение тактических и стратегических планов на региональных уровнях и проведение оценки учета влияния на уровень ЭБ региона также являются актуальными.

В исследовании рассмотрены характеристики ТЭБ и показателей ЭБ Республики Саха (Якутия). Интерес к данному региону обусловлен наличием частично децентрализованных зон электроснабжения и происходящими в настоящее время изменениями в организационных формах управления энергохозяйством региона.

Цель работы состоит в максимизации использования ресурсного потенциала региона для повышения уровня ЭБ.

Объектом исследования является ТЭК Республики Саха (Якутия).

Предметом исследования является энергетическая безопасность с учетом ресурсного потенциала.

Задачи исследования:

- исследование ресурсного потенциала и особенностей экономики региона;
- оценка уровня ЭБ по индикативному методу анализа;



– выявление особенности повышения ЭБ Республики Саха и сопоставление с планами развития ТЭК региона.

Энергетическая безопасность

Энергетическая безопасность, связанная с социально-экономическим развитием государства, до сих пор не имеет единого общепринятого определения [1]. В Доктрине энергетической безопасности РФ, утвержденной указом Президента РФ от 13 мая 2019 года, ЭБ заключается в защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при которой обеспечивается выполнение требований к топливо- и энергоснабжению потребителей. Международное энергетическое агентство (МЭА) определяет ЭБ как «бесперебойную доступность источников энергии по доступной цене» [2].

С точки зрения обеспечения ЭБ Республика Саха – один из самых неоднозначных регионов. Энергосистема республики имеет сложную организацию, причиной чему служат большая площадь, низкая плотность населения и географическая отдаленность. Республику можно описать как регион со слабыми электрическими связями, имеющий участки централизованного и децентрализованного электроснабжения. Централизованным электроснабжением охвачено только 36% территории региона, где проживает 85% населения. Энергоснабжение децентрализованной зоны энергоснабжения обеспечивается дизельными электростанциями, мини-ТЭЦ в п. Депутатский и возобновляемыми энергоисточниками (солнечными и ветроэлектростанциями).

Основными рисками территориального расположения республики являются периферийное экономико-географическое положение, суровые природно-климатические условия, труднодоступность территории, зависимость экономики и жизни людей во многих районах республики от поставок топлива и продовольствия из других регионов.

На территориях северных регионов, таких, как Республика Саха, степень выполнения энергетикой своих функций, т.е. снабжение населения и субъектов хозяйственной деятельности топливом и электро- и тепловой энергией в достаточном количестве и необходимого качества, невероятно важна. Это объясняется большой уязвимостью ЭБ подобных районов и требует государственного контроля [3].

Основными проблемами, характерными для энергосистемы республики, являются:

– наличие большого количества энергоисточника и дизельных электростанций (ДЭС) малой мощности, работающих изолированно;



- значительный износ зданий и сооружений ДЭС, на что повлияли «вечная мерзлота» (многолетняя криолитозона) и стихийные бедствия;
- затраты на привозное топлива со сложной логистикой;
- климат, осложняющий эксплуатацию электрооборудования;
- разнотипность оборудования, осложняющая процессы их сервисного обслуживания, ремонта и эксплуатации;
- неразвитость сетевой инфраструктуры, низкий территориальный охват;
- необходимость реконструкции около 50% распределительных сетей.

Экономическое состояние региона

Экономическое состояние республики можно охарактеризовать умеренным стабильным ростом ВРП. По данным Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по РС(Я) и Министерства экономики РС(Я) за 2015-2019 гг. объем ВРП увеличился более чем в 1,5 раза и составил более 1191 млрд. руб. На рис. 1 представлен график производства ВРП в республике за 2019 г. текущих и сопоставимых ценах 2015 г. В структуре ВРП на 2019г. наибольшую долю заняла добыча полезных ископаемых (более 47%). В 2019 г. по уровню производства ВРП на душу населения Якутия занимает девятое место в России и четвертое в ДФО, уступив Сахалинской, Магаданской областям и Чукотскому автономному округу.



Рис. 1. Производство ВРП в текущих и сопоставимых ценах, млрд руб.



Промышленность, являясь базовой отраслью в экономике республики, на начало 2019 г. в общей стоимости основных фондов имеет удельный вес, равный 60,8%, а в объеме ВРП за 2019 г. – 60,4%. За период с 2015 по 2019 гг. наблюдается тенденция увеличения доли отраслей ТЭК до 51,9%, увеличившись с 2015 г. на 5,3%.

Анализ топливно-энергетического баланса региона

В связи с растущим спросом на энергетические ресурсы со стороны стран Азиатско-Тихоокеанского региона в Якутии неуклонно увеличивается их добыча. Подавляющая часть добываемых и производимых энергоресурсов в Якутии представлена углем и нефтью, увеличение добычи которых обеспечило значительный рост производства. В период с 2015 по 2019 гг. в республике наблюдался рост добычи сырой нефти, чья доля в структуре производства в рассматриваемом периоде возросла на 4%. Структура производства энергоресурсов в регионе за 2015 и 2019 гг. представлены на рис. 2.



Рис. 2. Структура производства энергоресурсов за 2015 и 2019 гг.

По данным Схемы и программы развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2020-2024 годы по сравнению с вывозом, ввоз энергоресурсов в республику незначителен (в 2019 г. вывоз составил 32880 т усл. топл., а ввоз 1985 т усл. топл.). Нефтепродукты в общей структуре ввоза за 2019 год составили 92,2%. Большую долю вывоза энергоресурсов республики составляют сырая нефть и уголь. В связи с отсутствием в республике крупных нефтеперерабатывающих предприятий, потребности в нефтепродуктах почти полностью удовлетворяются за счет привозного сырья (добыча сырой нефти в 2019 г. составила 20448 тыс. т усл. топл., а вывоз – 19813 тыс. т усл. топл.).

Наибольшие доли в структуре потребления первичных топливно-энергетических энергоресурсов (ТЭР), сократившемся за период с 2015 по 2019 гг., имеют уголь, нефть и природный газ. Преобладающими видами ТЭР в конечном потреблении являются нефтепродукты и тепловая энергия.

Таким образом, проанализировав топливно-энергетический баланс, можно сделать вывод, что для дальнейшего развития Республики Саха (Якутия) требуется развивать не только добывающую промышленность, но и обрабатывающие производства, например, переработку нефти непосредственно в республике, что привлекло бы в регион квалифицированные трудовые ресурсы.

Оценка энергетической безопасности

Существует несколько методов оценки ЭБ, чаще всего используются методы индикативного анализа. Индикативные показатели, разделяются на семь блоков: обеспеченности э\э и т\э, обеспеченности топливом, структурно-режимный, воспроизводства ОПФ в энергетике, экологический, финансово-экономический, энергосбережения и энергетической эффективности. [4] Индикатор может быть описан тремя состояниями: нормальное, критическое и предкритическое [5]. Была проведена оценка состояния по индикаторам ЭБ Республики Саха (Якутия), результат представлен в табл. 1.

Таблица 1

Оценка состояния по индикаторам ЭБ РС(Я)

Индикатор	Пороговые значения	Значение	Состояние
1. Блок обеспеченности электрической и тепловой энергией			
1.1. $\sum P_{расп} / N_{макс}$, где $P_{расп}$ – располагаемая мощность региона, МВт; $N_{макс}$ – максимальная электрическая нагрузка потребителей, МВт	Крит. – до 0,3; предкрит. – от 0,3 до 0,5; норм – более 0,5	2,55	Норм.
1.2. $P_{общ} / Д * 100\%$, где $P_{общ}$ – общее потребление котельно-печного топлива; Д – ресурсы, добытые из собственных источников региона	Крит. – до 40; предкрит. – от 40 до 60; норм – более 60	100	Норм.



Окончание табл. 1

Индикатор	Пороговые значения	Значение	Состояние
2. Блок обеспеченности топливом			
2.1. $P_{\text{дом}}/P_{\text{общ}} * 100\%$, где P – количество потребления доминирующего ресурса	Крит. – более 0,90	0,50	Норм.
3. Структурно-режимный блок			
3.1. $P_{\text{круп}}/P_{\text{уст}} * 100\%$, где $P_{\text{круп}}$ – мощность наиболее крупной электростанции; $P_{\text{уст}}$ – установленная электрическая мощность региона	Крит. – более 50; предкрит. – от 40 до 50; норм – менее 40	30,31	Норм.
4. Блок воспроизводства основных производственных фондов в энергетике			
4.1. Степень износа ОПФ энергетике региона, %	Крит. – до 40; предкрит. – от 40 до 60; норм – более 60	52	Предкрит.
5. Экологический блок			
5.1. $V_{\text{вв}}/S_{\text{терр}}$, где $V_{\text{вв}}$ – выбросы вредных веществ в атмосферу от предприятий электроэнергетики, тыс. т; $S_{\text{терр}}$ – площадь территории, тыс. км	Крит. – более 1,4; предкрит. – от 0,8 до 1,4; норм. – менее 0,8	0,54	Норм.
6. Финансово-экономический блок			
6.1. $Z_{\text{пркр}}/V_{\text{год}}$, где $Z_{\text{пркр}}$ – просроченная кредиторская задолженность предприятий электроэнергетики; $V_{\text{год}}$ – годовой объем производства продукции	Крит. – более 35; предкрит. – от 20 до 35; норм. – менее 20	16	Норм.
7. Блок энергосбережения и энергоэффективности			
7.1. $(P_{\text{ээ}} * 1000)/\mathcal{E}_{\text{выр}}$, где $P_{\text{ээ}}$ – потребление топлива для производства электроэнергии, млн т усл. топл.; $\mathcal{E}_{\text{выр}}$ – выработка электроэнергии, млн кВт	Крит. – более 3,2; предкрит. – от 2,4 до 3,2; норм. – менее 2,4	1,63	Норм.



Отклонение от нормального состояния наблюдается только у индикатора четвертого блока, определяемое значительным износом зданий, сооружений электростанций и распределительных сетей. В исследовании проведен анализ официальных стратегических и тактических планов развития ТЭК региона с целью выявления соответствующих решений по повышению ЭБ.

Обновление основных фондов

В республике запланированы строительства второй очереди Якутской ГРЭС-2 в рамках государственной программы модернизации энергетики России и энергетических комплексов в зоне децентрализованного энергоснабжения региона в рамках соглашения о сотрудничестве РусГидро и Республики Саха (Якутия), реконструкция ГТЭС НГКМ Талаканское в зоне децентрализованного электроснабжения, ввод нового генерирующего оборудования на ДЭС взамен старых агрегатов и реконструкцию старых агрегатов в следующих районах республики: Абыйский, Алданский, Аллаиховский, Анабарский, Булунский, Верхнеколымский, Верхоянский, Жиганский, Кобяйский, Момский, Оймяконский, Олекминский, Оленекский, Среднеколымский, Усть-Янский, Эвено-Бытантайский. Большая часть данных улусов относится к децентрализованной зоне Якутии.

Обновление генерирующих мощностей в децентрализованной зоне по большей части планируется быть осуществленным путем ввода новых ДЭС, что означает увеличение расхода дизельного топлива, повышение затрат на его завоз и использование. Тем не менее Якутия обладает значительным потенциалом возобновляемых природных энергоресурсов, в связи с чем применение ВИЭ в Якутии является крайне актуальным.

ВИЭ в Республике Саха (Якутия)

Несмотря на то, что чаще внедрение ВИЭ целесообразным только в южных регионах, в Республике Саха это позволит сократить потребление дизельного топлива в изолированных районах [6, 7]. На 1 января 2020 г. на территории республики эксплуатировались 21 СЭС суммарной мощностью 1621 кВт и 2 ВЭС суммарной мощностью 940 кВт.

В 2015 г. была введена СЭС Батагай в Верхоянском районе, синхронно функционирующая с ДЭС и имеющая установленную мощность 1 МВт. Энергия, вырабатываемая СЭС ежегодно позволяет сэкономить до 300 т дизельного топлива и значительно снизить стоимость электроэнергии. Основное оборудование СЭС, имеющее срок эксплуатации 25 лет, по подсчетам сможет окупить себя 4 раза.



Прибрежные районы региона имеют высокий ветроэнергетический потенциал, тем не менее ввод новых ВЭС в ближайшие годы в регионе не планируется.

ПАО «РусГидро» планируется в период с 2020 по 2024 гг. ввод 23 СЭС суммарной мощностью 7298 кВт в пяти районах Якутии: Абыйский, Верхоянский, Момский, Олекминский и Усть-Янский.

Выводы по работе. Анализ топливно-энергетического баланса и показателей ЭБ Республики Саха (Якутия) показал, что регион нуждается:

- 1) в обновлении основных фондов электроэнергетического комплекса с увеличением доли ВИЭ в децентрализованной части региона;
- 2) создании производства по нефтепереработке, что обеспечило бы республику нефтепродуктами и снизило затраты на их ввоз.

Авторы считают необходимым уточнить стратегию развития ТЭК Республики Саха (Якутия) с учетом состояния энергетической безопасности.

Библиографический список

1. International Energy Security: Common Concept for Energy Producing, Consuming and Transit Countries. March, 2015 [Электронный ресурс] // Brussel: Energy Charter Secretariat. 2015 . 28 p. URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Thematic/International_Energy_Security_2015_en.pdf (дата обращения: 20.10.2020).

2. Energy security. Ensuring the uninterrupted availability of energy sources at an affordable price [Электронный ресурс] // IEA. 2019. URL: <https://www.iea.org/areas-of-work/ensuring-energy-security> (дата обращения 19.10.2020).

3. **Мальцева П.Н.** Система государственного управления энергетической безопасностью северного региона (на примере Магаданской области) [Электронный ресурс]. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета управления и экономики, 2012. 170 с. URL: <https://magadan.spbume.ru/file/pages/78/malceva.pdf> (дата обращения 19.10.2020).

4. Комплексная методика диагностики энергетической безопасности территориальных образований Российской Федерации (вторая ред.) // Отв. ред. А.И. Татаркин, А.А. Куклин. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2002. 79 с. (Научные доклады Рос. акад. наук. Ур. отд-ние. Ин-т экономики).

5. **Сендеров С. М., Смирнова Е. М.** Состояние энергетической безопасности в восточных регионах России [электронный ресурс] // Энергетика России в XXI веке: стратегия развития – восточный вектор: сб. ст. объединенного симпозиума. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. С. 6-5. URL: <https://isem.irk.ru/symp2010/papers/RUS/S6-05r.pdf>.



6. Сидоренко Г.И., Кудряшева И.Г., Пименов В.И. Экономика установок нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Технико-экономический анализ: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 248 с. [eLIBRARY ID: [19867982](#)]

7. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика / 3-е изд., доп. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 424 с.



SOME ASPECTS OF FUEL AND ENERGY COMPLEX RATIONAL DEVELOPMENT IN TERMS OF ENERGY SECURITY

L.V. Koriakina and O.V. Novikova

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg

Abstract. The article has examined specifics and threats to the energy security of the Republic of Sakha (Yakutia). The fuel and energy balance of the region has been analyzed. Evaluation of the region`s energy security using an indicative method has been carried out. The possibility of energy security optimization and increase for the region`s fuel and energy complex has been analyzed.

Keywords: fuel and energy balance, energy security, indicative analysis method, renewable energy sources (RES).



УДК 665.725

ЛОГИСТИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Д-р техн. наук, проф. **Медведева О.Н.**Аспирант **Перевалов С.Д.***Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*

***Аннотация.** Как правило при выборе способа транспортировки природного газа различным категориям потребителей рассматривают несколько вариантов в зависимости от взаиморасстояния источника и потребителя – строительство газопровода или создание инфраструктуры сжиженных газов. В работе предложено решение частной задачи по снабжению потребителей сжиженным природным газом (СПГ), разработана логистическая модель оптимального функционирования системы по комплексу: завод по производству СПГ – потребитель. По результатам расчетов для условий республики Карелия предложены рекомендации по оптимальному размещению источника и оптимизации транспортной составляющей.*

***Ключевые слова:** сжиженный природный газ, эффективность, транспортировка, завод по сжижению.*

На сегодняшний день газовая промышленность России достигла высокого уровня как по добыче, так и по реализации газа внутри страны. Вместе с тем отсутствие магистральных газопроводов на некоторых территориях, например, Восточной Сибири, Камчатки создало проблему газификации различных категорий потребителей на базе сетевого природного газа. В настоящее время на отдаленных и труднодоступных участках, где осуществление сетевого газоснабжения по экономическим и техническим соображениям нецелесообразно, используются системы автономного газоснабжения на базе альтернативных энергоносителей, чаще всего, сжиженных углеводородных газов (СУГ), имеющих существенные недостатки: переменный фракционный состав при испарении, меньшие пределы воспламеняемости по сравнению с метаном, образование локальных взрывоопасных зон при утечках и трудность обнаружения утечек, низкая температура воспламенения и др. [1]. Предварительная оценка экономической эффективности использования в качестве замены СУГ сжиженного природ-



ного газа (СПГ) свидетельствует в пользу последнего как экологически чистого и конкурентоспособного энергоносителя.

Поскольку газоснабжение потребителей имеет стратегическое значение для развития страны в энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года поставлены следующие задачи [2]:

«- совершенствование внутреннего рынка газа и эффективное удовлетворение внутреннего спроса на газ;

– развитие производства малотоннажного сжиженного природного газа и формирование на его основе внутреннего рынка сжиженного природного газа как инструмента обеспечения энергетической безопасности территорий, отдаленных от Единой системы газоснабжения;

– формирование нефтегазовых минерально-сырьевых центров в новых районах (Восточная Сибирь и Дальний Восток) и на континентальном шельфе Российской Федерации;

– развитие магистральной газотранспортной инфраструктуры (включая создание газотранспортной инфраструктуры в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке);

– социально и экономически целесообразное повышение уровня газификации субъектов Российской Федерации с учетом особенностей региональных топливно-энергетических балансов, в том числе создание условий для первоочередного подведения газа к земельным участкам, вовлекаемым в оборот для жилищного строительства, в рамках реализации национальных проектов и национальных программ (к 2024 году 74,7%; к 2035 году – 82,9%)».

Надежность газоснабжения российских потребителей является одной из основных задач при развитии внутреннего рынка газа [3].

Транспортировка природного газа в сжиженном состоянии значительно более экономична по сравнению с трубопроводным транспортом. Это относится как к перевозкам больших объемов газа на дальние расстояния различными видами транспорта, так и при доставке малых объемов СПГ на небольшие расстояния [4, 5]. При этом преимущество крупнотоннажной транспортировки газа в сжиженном виде начинается с расстояний до потребителей свыше 2500–3000 км [6]. Основная доля затрат приходится на погрузочно-разгрузочные работы, кроме этого СПГ требует более значительных капитальных вложений в инфраструктуру на начальном этапе. Создание инфраструктуры СПГ при малотоннажной транспортировке будет выгодно в тех случаях, когда строительство газопровода экономически невыгодно (из-за сложного рельефа местности, значительной удаленности потребителя от источ-



ника, потребителю требуется газ в небольших объемах и др. обоснованных причин). Выбор варианта доставки газа в каждом конкретном случае проводится путем сравнительного технико-экономического анализа.

Инфраструктура СПГ включает в себя технически и технологически сложные объекты производства, хранения, транспортировки и регазификации [5, 7].

Цель работы. В процессе проектирования производства СПГ немаловажным вопросом является решение задачи по размещению источника газоснабжения – в нашем случае завода по производству сжиженного газа. Целью работы является построение логистической модели функционирования комплекса СПГ на примере республики Карелия.

Поиск оптимального места расположения завода по производству СПГ.

На сегодняшний день уровень газификации республики сетевым природным газом не превышает 8,5%. Специфика газификации данного региона заключается в том, что сети газораспределения достаточно удалены от основных магистралей сетевого природного газа, а процесс газификации природным газом начался сравнительно недавно, в 1996 году.

Определение оптимального места расположения завода по производству сжиженного природного газа основано на документе «Об утверждении региональной программы «Газификация Республики Карелия на 2017–2021 годы» [8], а также «Корректировке Генеральных схем газоснабжения и газификации регионов Российской Федерации. Республика Карелия». Из вышеназванных документов было установлено, что на момент выполнения региональной программы газификации Республики Карелия останется не газифицированным 771 населенный пункт. При расчете было принято, что доставка СПГ будет осуществляться в населенные пункты населением свыше 200 человек, при этом процент людей, которые будут использовать газ на различные нужды, составит 80%. В модели предусмотрено, что объем СПГ в резервуарах хранения у потребителя достаточный, чтобы избежать дефицита СПГ на всем протяжении зимнего сезона.

Для определения расстояния между городами, были использованы координаты, взятые с GOOGLE карт, и переведенные в местную систему координат МСК–10.

Для минимизации затрат воспользуемся методом определения центра масс:



$$X_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \cdot Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i}; \quad Y_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \cdot Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i},$$

где Y_i, X_i – координаты i -го потребителя; Q_i – потребление газа i -м потребителем; $X_{ц}, Y_{ц}$ – координаты центра тяжести грузопотоков.

Исходя из приведенных формул были определены оптимальные координаты завода по производству СПГ для газоснабжения 137 населенных пунктов. Принимаем, что затраты на перевозку СПГ будут пропорциональны линейному расстоянию между городами, тогда расстояние между заводом и потребителями определится по формуле:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

По результатам численного анализа принимаем себестоимость производства 1 тонны СПГ равной 25000 рублей с учетом инфляционной составляющей.

Для определения необходимого количества рейсов для обеспечения покрытия потребности в газе в год используем формулу:

$$n_{год} = \frac{V_{год}}{V_{ц}},$$

где $V_{год}$ – годовой объем газа, м³/год; $V_{ц}$ – вместимость цистерны, м³.

Для определения пробега автоцистерн воспользуемся знанием расстояния от предполагаемого места расположения завода СПГ:

$$\ell_{ц} = \frac{L}{n_{год}}.$$

По расстоянию от завода и средней скорости движения цистерны определяется время, затрачиваемое на один рейс (в обе стороны):

$$\tau_{рейс} = \frac{120 \cdot L}{g_{ц}},$$

где $g_{ц}$ – средняя скорость движения цистерны, км/ч.

Количество рейсов в месяц определим по формуле:

$$m_{рейс} = \frac{t_{см} \cdot \varphi_{см}}{22 \cdot \tau_{рейс}},$$

где $t_{см}$ – длительность смены, ч; $\varphi_{см}$ – коэффициент использования смены.



Количество необходимых машин для перевозки газа:

$$n_u = \frac{n_{\text{год}}}{12 \cdot m_{\text{рейс}}},$$

и учетом затраты на заправку машин дизельным топливом:

$$Z_{\text{от}} = C_{\text{от}} \cdot \ell_u,$$

где $C_{\text{от}}$ – стоимость 1 литра дизельного топлива, руб./л.

В итоге стоимость производства сложится из следующих величин:

$$Z_{\text{СПГ}} = V_u \cdot n_{\text{год}} \cdot Z_{\text{от}}.$$

Так же рассчитаем затраты на заработную плату водителям:

$$Z_{\text{зн}} = 12 \cdot Z_{\text{г}} \cdot n_u,$$

где $Z_{\text{г}}$ – зарплата водителя, руб./мес.

И, наконец, рассчитаем будущую возможную прибыль:

$$P_{\text{СПГ}} = V_{\text{год}} \cdot C_{\text{СПГ}} - Z_{\text{зн}} - Z_{\text{от}} - Z_{\text{СПГ}},$$

где $C_{\text{СПГ}}$ – стоимость СПГ, руб./м³.

По результатам расчета возможная прибыль за год составит 67 207 млн. рублей с учетом приобретения 15065 единиц цистерн для перевозки СПГ.

Выводы по работе. Недостаточность теоретической разработанности рассматриваемого вопроса, необходимость в практических рекомендациях по совершенствованию комплексного подхода к созданию инфраструктуры СПГ определили цель и задачи данной работы. Как показывают результаты, использование природного газа в сжиженном виде способствует диверсификации энергоснабжения, позволяя совершенствовать структуру источников энергоснабжения, повышая надежность и энергетическую безопасность страны, а средне- и малотоннажное производство СПГ может сыграть значительную роль в развитии регионов Российской Федерации, решая задачу доступности эффективного энергоресурса.

Библиографический список

1. **Курицын Б.Н.** Системы снабжения сжиженным газом. Саратов: СГУ, 1988. 196 с.
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения 20.10.2020).



3. **Фастов Л.М., Медведева О.Н.** Надежность систем газоснабжения. Саратов: СГТУ, 2012. 148 с.

4. **Дмитриев А.А., Федорова Е.Б.** Технико-экономическое обоснование выбора технологии малотоннажного производства сжиженного природного газа // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 7 (187). С. 31-42. [eLIBRARY ID: [43066633](#)]

5. **Рачевский Б.С.** Нетрадиционный способ газификации // Газовая промышленность. 1999. № 6. С. 55–56.

6. **Федорова Е.Б.** Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. М.: ИЦ РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 159 с. [eLIBRARY ID: [19613561](#)]

7. Российский мало- и среднетоннажный СПГ. Региональная серия: Кузбасс, Якутия, Дальний Восток, Сахалин, Черное море. Аналитический обзор (Т. 3) / М. Ишмуратова, Д. Сницкий, Георгий Трофимов и др. М.: МШУ Сколково, 2019. 56 с.. DOI: [10.13140/RG.2.2.36142.66882](#).

8. Об утверждении региональной программы «Газификация Республики Карелия на 2017–2021 годы» [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/465415677> (дата обращения 20.10.2020).



LOGISTIC AND MATHEMATICAL MODEL OF THE EFFECTIVENESS OF LIQUEFIED NATURAL GAS USE

O.N. Medvedeva and S.D. Perevalov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Abstract. As a rule, when selecting natural gas transportation mode to various consumer categories one considers several variants in relation to the distance between the source and consumer – gas pipeline construction or building infrastructure for liquefied gas. The paper suggests the solution of the specific task to supply consumers with liquefied natural gas (LNG), development of the logistic model of system`s optimal functioning within the complex: LNG production plant – the consumer. Based on the calculation results for the Republic of Karelia conditions, the recommendations have been suggested for optimal source location and transport component optimization.

Keywords: liquefied natural gas, effectiveness, transportation.



УДК 621.316.726, 681.5.01

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Канд. техн. наук, специалист
по оптимизации цепей поставок

Руцков А.Л.¹

Канд. экон. наук, доц. **Фёдоров Я.П.**²

Канд. экон. наук, доц. **Волков Л.В.**²

¹Филиал АО «УК ЭФКО» в г. Воронеж

²Финансовый университет
при Правительстве РФ, г. Москва

***Аннотация.** В данной статье рассматриваются возможности оптимизации объектов топливно-энергетического комплекса посредством повышения точности прогноза состояния как в оперативном, так и в среднесрочном периодах. Модель, используемая для реализации отмеченного повышения энергоэффективности, основана на применении нечётких нейронных сетей. Организация данного подхода позволяет учитывать слабо формализуемые факторы, тем самым, повышая качество прогнозирования и диспетчерское управление. Отмеченные факторы являются прямыми экономическими драйверами снижения издержек производства.*

***Ключевые слова:** топливно-энергетический комплекс; потребление электроэнергии; оптимизация; потери активной мощности; нечёткие нейронные сети; имитационное моделирование; энергоэффективность.*

Актуальность

Функционирование современных объектов топливно-энергетического комплекса (ОТЭК): ресурсодобывающих, снабжающих комплексов и конечных потребителей сопряжено с необходимостью оптимизации технологических процессов использования электрической энергии.

Временные вариации, присущие функционированию ОТЭК, являются существенно нечёткими, что выражается в многофакторности зависимости нахождения оптимума потерь электрической энергии. Для решения данной задачи первоочередным фактором является создание модели динамики энергопотребления, обладающей функционалом прогнозирования и выработки управляющих воздействий.



Основными недостатками большинства разработанных моделей является фактический не учёт (или слабый учёт) слабо формализуемых факторов ввиду недостаточной точности реализации прогноза потребления энергоресурсов. При этом, соответствующие колебания в ОТЭК представляются линейными аппроксимациями, что принципиально не позволяет осуществить оптимизацию режимов с точностью, превосходящей ошибку отмеченного процесса прогнозирования.

Функционирование модели, рассматриваемой в статье, организовано с помощью комбинированных нечётких нейронных сетей (ННС), которые позволяют повысить точность показателей при оценке будущих периодов (для решения задач оптимизации) в сравнении с существующими классическими реализациями (регрессионные модели).

Цель и задачи работы

Цель работы: повышение конкурентоспособности ОТЭК, которое достижимо посредством оптимизации показателя потерь электрической энергии при передаче в локальных энергосетевых элементах (ЛЭП, силовые трансформаторы, элементы распределительных сетей).

Для достижения отмеченной цели решён ряд задач:

- определена базовая модель оптимизации для последующей разработки алгоритмов прогнозирования энергоресурсов в ОТЭК;
- разработаны вариации алгоритмов для модели на основе ННС;
- получена оценка эффективности разработанных алгоритмов применительно к имитационным моделям функционирования ОТЭК для краткосрочного, среднесрочного и долгосрочного прогнозирования.

Материалы и методы

Существуют два базовых подхода оптимизации для рассматриваемого класса задач [1 - 5]:

- уравнения Лагранжа;
- градиентные модели (алгоритм Ньютона-Рафсона).

С целью практического использования оптимизационных алгоритмов, характеристики активной и реактивной составляющей ОТЭК представляются в виде статических характеристик нагрузки (СХН):

$$\left\{ \begin{array}{l} P(U) = P_{ном}(U) \left[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 + \dots + a_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^n + \xi_P(U) \right]; \\ Q(U) = Q_{ном}(U) \left[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) + b_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^2 + \dots + b_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^n + \xi_Q(U) \right]; \end{array} \right. \quad (1)$$

где $P(U)$, $Q(U)$, – активная и реактивная мощности; $P_{\text{ном}}(U)$, $Q_{\text{ном}}(U)$, $U_{\text{ном}}$ – номинальные значения активной и реактивной мощности и напряжений в условиях нормального режима; $\xi_p(U)$, $\xi_Q(U)$ – зависимости распределения активной и реактивной мощности от слабоформализуемых факторов; $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ – параметры характерного технологического процесса функционирования ОТЭК; U – текущее измеренное значение напряжения.

Модель оптимизации по критерию минимума потерь мощности в ОТЭК реализуется в виде целевой функции [2]:

$$F_j = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k \left[\frac{\left(\sqrt{P_i(U)^2 + Q_i(U)^2} \right) \cdot R_{\Sigma i}}{U_i^2} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta U_{\%i}}{100} \right)^2} - 1 \right) + \Delta P_{xxi} \cdot T_{pi} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{\text{ном}i}} \right)^2 + \Delta p_{\text{кор}i} \cdot L_i \cdot k_{U_{\text{кор}i}} \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где W – сумма потерь мощности в элементах ОТЭК; R_{Σ} , L – эквивалентные активные сопротивления и длина элементов ОТЭК; $\Delta U_{\%}$ – напряжение питания в процентном выражении; ΔP_{xxi} – мощность потерь холостого хода в элементах ОТЭК; T_{pi} – число часов работы оборудования ОТЭК; $\Delta p_{\text{кор}i}$ – средние удельные потери на корону; $k_{U_{\text{кор}i}}$ – коэффициент потерь на корону.

При этом обязательным является выполнение балансовых ограничений:

$$\begin{cases} |P_{\text{вн}i} + P_{\text{с}i}| > 0; \\ |Q_{\text{вн}i} + Q_{\text{с}i}| > 0; \\ i = 1, \dots, k; \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{\text{вн}i}$, $Q_{\text{вн}i}$, $P_{\text{с}i}$, $Q_{\text{с}i}$ – величины внутренних и внешних перетоков активной и реактивной мощности в элементах ОТЭК.

Уравнения (1)-(3) образуют универсальную свободно масштабируемую модель перераспределения перетоков мощности в ОТЭК, что

позволит осуществлять оптимизацию по критерию минимума потерь с учётом слабоформализуемых и неопределённых факторов [5].

В работах [4-7], ввиду простоты организации и высоких точностных показателей, осуществлена реализация Мамдани совместно с модифицированным алгоритмом Ньютона-Рафсона:

$$R^u : \text{If } x(t-1) \text{ is } X_1^u \text{ and, ..., and } x(t-r) \text{ is } X_r^u \text{ then } y(t) = a^u, u = 1, u \quad (4)$$

где R^u – набор экспертных правил для формирования ННС; $x(t) = (x_1(t) \dots x_r(t))$ – вектор входных переменных; $y(t)$ – вектор выходной величины; M_1^u, M_r^u, Y^u – области входных и выходных воздействий ННС; a^u – выходная константа, содержащая взвешенную оценку входных величин и процесса функционирования сети.

Результаты

Для разработанной модификации модели прогнозирования и последующей оптимизации производственных показателей ОТЭК на основе ННС (4), совместно с критериями (1)-(3), было произведено исследование точностных показателей процесса управления динамикой перетоков мощности в краткосрочном, среднесрочном и долгосрочном периодах. Оценка результатов осуществлялась в ПО Matlab [4, 5].

При реализации модели ННС на основе алгоритма Мамдани был использован ANFIS – блок программного пакета имитационного моделирования Matlab. Произведено исследование точности оптимизации производственных показателей ОТЭК [4, 5] через процесс прогнозирования как функции от:

- варьирования функции принадлежности входных термов;
- реализации обучающего множества;
- изменения архитектуры ИНС совместно с временем обучения.

Для численной оценки процесса прогнозирования и последующей Наилучшие результаты из выборки показала реализация ННС с архитектурой входных термов ($6 \times 3 \times 3$), а также функцией принадлежности – `psigmf` [4, 5].

Результаты обучения модели на базе ННС представлены на рис. 1. На рис. 2 представлены результаты функционирования модели в сравнении с аналогичными результатами для регрессионной модели.



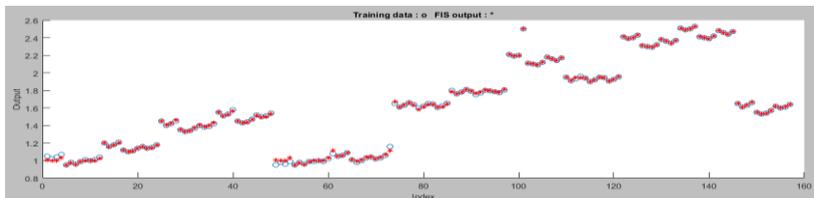


Рис. 1. Результаты обучения модели ННС (psigmf: 6x3x3)

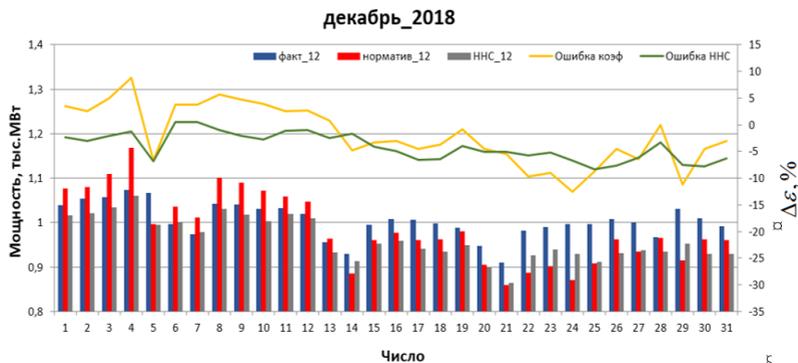


Рис. 2. Прогнозирование динамики энергопотребления ОТЭК: факт, норматив (регрессия), ННС – тыс. МВт; и ошибка функционирования систем прогноза на основе нормативного метода и применения ННС – %

Анализ функционирования модели [4, 5], построенной на основе ННС, позволяет говорить о её высоких точностных характеристиках, значительно превосходящих точность существующих регрессионных (классических) реализаций, что следует из рис. 2.

Обсуждение

Таким образом, были получены следующие результаты [4, 5], подтверждаемые графиками на рисунках 1, 2:

- применение классической / нормативной (основанной на регрессионных зависимостях) реализации процесса прогнозирования и последующей оптимизации режимов ОТЭК оправдано в случае высокой степени постоянства факторов, влияющих на функционирование групп энергопотребителей;

- также регрессионные модели оказываются полезны в качестве идеализированных (целевых) структур, при этом, ошибка прогноза в них принципиально не ниже уровня (3-6) %;

– применение моделей оптимизации производственных показателей ОТЭК (в частности, процесса перераспределения потоков мощности) позволяет достичь ошибок прогноза не превосходящих (1,5 – 2,8) % при полноценном учёте тренда распределения слабоформализуемых (в т. ч. неопределённых) факторов [2, 4, 5].

Выводы по работе

В работе представлена реализация модели оптимизации производственных показателей ОТЭК на базе ННС. При этом:

1. Определена целевая функция оптимизации по минимуму потерь активной мощности

$$F_j = \sum_{i=1}^k W_i \rightarrow \min$$

совместно с ограничениями, характерными для ОТЭК. Осуществлён учёт зависимостей распределения активной и реактивной мощности от неопределённых и слабоформализуемых факторов $\xi_p(U)$, $\xi_q(U)$, влияющих на качество реализуемого процесса оптимизации ОТЭК.

2. Разработан модифицированный алгоритм Ньютона – Рафсона на основе ННС (с возможностями осуществления вариаций). Данный алгоритм позволяет полноценно учесть неопределённые и слабоформализуемые факторы $\xi_p(U)$, $\xi_q(U)$.

4. Оценка точности наиболее оптимального варианта реализации модели обладает следующими характеристиками: количество слоёв / структура слоёв (количество нейронов): 4 / (3/10/25/1); тип алгоритма оптимизации: Мамдани; распределение термов принадлежности 1 слоя: $6 \times 3 \times 3$; функция активации первого слоя: psigmf .

Получены следующие показатели качества: относительная ошибка обучения – 1,624%; время обучения сети – 2,57 с (для случая краткосрочного / среднесрочного прогноза). Имитационное моделирование осуществлено на базе процессора Intel Core i5-7400k (3,0 ГГц). Свободно конфигурируемая структура настроек сети позволяет использовать её одинаково эффективно для задач краткосрочного/среднесрочного и долгосрочного прогноза и оптимизации производственных показателей ОТЭК.

Библиографический список

1. **Железко Ю.С.** Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

2. **Николенко С.И., Кадурин А.А., Архангельская Е.В.** Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2019. 480 с.



3. **Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю., Суслова С.А.** Нечёткие модели динамических процессов. М.: Научная книга, 2007. 184 с.

4. Implementation of a SMART GRID in industrial and residential complexes based on fuzzy neural networks / A.L. Rutskov, V.L. Burkovsky, E.V. Sidorenko, V.N. Krysanov // Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. 2020. Vol. spl8(1). P. 251–263. DOI: [10.26782/jmcms.spl.8/2020.04.00019](https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.8/2020.04.00019).

5. **Rutskov A.L., Burkovsky V.L., Sidorenko E.V.** Optimization of electric power systems using fuzzy neural network algorithms // Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. 2020. Vol. spl8(1). P. 264–276. DOI: [10.26782/jmcms.spl.8/2020.04.0002](https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.8/2020.04.0002).

6. **Çevik H.H., Çunkaş M.** Short-term load forecasting using fuzzy logic and ANFIS // Neural Computing and Applications. 2015. Vol. 26(6). P.1355–1367. DOI: [10.1007/s00521-014-1809-4](https://doi.org/10.1007/s00521-014-1809-4).

7. Theano: a CPU and GPU Math Expression Compiler / J. Bergstra, O. Breuleux, F. Bastien et. al. // Proc. Python for Scientific Computing Conference (SciPy). Texas, 2010. P. 18–24. DOI: [10.25080/Majora-92bf1922-003](https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-003).

8. TinyFlow: Build Your Own DL System in 2K Lines [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/tqchen/tinyflow> (дата обращения 20.10.2020).



ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION OPTIMIZATION FOR FUEL AND ENERGY COMPLEX FACILITIES BASED ON THE FUZZY LOGIC MODEL AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

A.L. Rutskov¹, Ya.P. Fedorov² and L.V. Volkov³

¹Branch of JSC "UK EFKO", Voronezh

²Financial University under the government of the Russian Federation, Moscow

Abstract. The model of electric power consumption dynamic at the fuel and energy complex has been suggested which possesses properties of forecasting and generation of control actions. The model operation is based on the combined fuzzy neuron networks. The model allows to increase the accuracy of indexes in estimating of future periods for optimization problems solution in comparison to the existing realizations based on regression models. The paper has determined the objective function of optimization on minimum losses of active power together with limitations typical for fuel and energy complex facilities; suggested modified Newton-Raphson algorithm based on fuzzy neuron networks; obtained efficiency assessment of the developed algorithms applied to the simulation models of FECF functioning for short-, medium- and long-term forecasting.

Keywords: fuel and energy complex; electric energy consumption; optimization; active power losses; fuzzy neuron networks; simulation modeling; energy efficiency.



ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

HEAT AND POWER ENGINEERING



УДК 536.524

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАТОРА С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЭРОЗОЛЬНО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Преподаватель Абед А.Х.¹Д-р техн. наук, проф. Хусейни Х.А.¹Д-р техн. наук, ст. науч. сотр. Пахалуев В.М.²¹Технологический университет, Ирак²Уральский федеральный университет

имени первого президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация. В данной работе проведено экспериментальное исследование конвекционного теплоотвода от вертикально расположенного радиатора с параллельными прямоугольными ребрами. Эксперименты проводились с целью изучения и оценки интенсификации теплоотдачи при различных мощностях нагрева за счет введения в воздух водовоздушного аэрозоля. Для данного исследования была разработана и сконструирована специальная экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты по охлаждению как воздухом, так и водовоздушным аэрозолем. Влияние концентрации аэрозоля на интенсивность теплоотдачи было исследовано в диапазоне расхода воды $m_w = 90 - 430$ мл/ч, в то время как температура поверхности изменялась от 29 до 110°C. Результаты экспериментов показали, что интенсификация теплоотдачи происходит по мере увеличения расхода воды и достигает максимума при $m_w = 430$ мл/ч. Теплоотдача интенсифицируется в среднем в 1,28, 1,81, 2,37, 2,83 раз по сравнению с традиционным воздушным охлаждением в диапазоне $m_w = 90 - 430$ мл/ч. Кроме того, было исследовано влияние водовоздушного охлаждения при различных: шаге между ребрами, количестве ребер и площади охлаждаемой поверхности.

Ключевые слова: охлаждение, водовоздушный аэрозоль, туман, коэффициент теплоотдачи, радиатор.

В связи с развитием электронной промышленности и появлением современных специализированных устройств, которым необходимо обрабатывать данные с высокой скоростью, возникла высокая потребность в надежных и эффективных методах охлаждения. Центральный процессор электронных устройств, собранный из миллионов микроскопических транзисторов, позволяет быстро обрабатывать все большие объемы данных. В результате прохождения электрического сигнала количество выделяющегося тепла и, соответственно,



температура, центрального процессора растет, что делает его менее надежным и увеличивает вероятность сбоя обработки данных в течение времени. Для обеспечения надежной непрерывной работы электронных устройств теплоотвод имеет огромное значение. Обеспечить теплоотвод возможно несколькими способами: радиатор [1], тепловые трубки [2], распылитель воды под давлением [3], пьезоэлектрическая генерация аэрозоля [4] и т.д. В работе [5] экспериментально исследовали влияние ребер синусоидальной волнистой формы с различной амплитудой на интенсификацию естественной конвективной теплоотдачи. Было выполнено численное и экспериментальное исследование механизма теплоотдачи от вертикального радиатора с W-образными ребрами путем естественной конвекции [6]. Другое экспериментальное исследование горизонтально расположенного радиатора с прямоугольными ребрами [7] было выполнено при естественной и смешанной конвекции. В работе [8] было исследовано влияние расстояния между ребрами и их высоты на коэффициент теплоотдачи. Использование водовоздушного аэрозоля в качестве охлаждающей среды имеет множество уникальных особенностей, из-за чего он эффективно применяется во многих инженерных решениях [9-12]. По сравнению с воздушным охлаждением, можно отметить следующие основные преимущества водяного аэрозоля: поглощение огромного количества энергии в виде теплоты парообразования во время процесса испарения воды при прямом контакте капель с нагретой поверхностью, повышение влажности и теплоемкости смеси [13]. В качестве примера будут приведены предыдущие экспериментальные исследования, которыми, однако, применение водовоздушного аэрозоля не ограничивается. Были проведены численное моделирование и параметрический анализ [14] для исследования влияния концентрации воды в водовоздушной смеси и диаметра капель воды на интенсификацию теплоотдачи ребренного радиатора при вынужденной конвекции. В работе [15] предложена новая схема охлаждения, в которой водяной аэрозоль впрыскивается непосредственно в систему воздушного охлаждения, а затем испарившийся аэрозоль собирается и перенаправляется обратно к входным отверстиям. В данной работе экспериментальные исследования проводились с учетом как естественной конвекции, так и излучения, чтобы проанализировать и оценить влияние водовоздушного аэрозоля на характеристики теплоотвода и площадь охлаждаемой поверхности радиатора с параллельными прямоугольными ребрами. Также было исследовано влияние различных характеристик, таких как

концентрация воды в аэрозоле, подводимая мощность нагрева на характеристики тепловода.

Экспериментальная установка и измерительные приборы

Основными элементами экспериментальной установки являются: радиатор с параллельными пластинчатыми ребрами, электронагреватель, теплоизолирующая крышка, опорная рама, генератор водовоздушного аэрозоля и система сбора данных. Принципиальная схема экспериментальной установки и геометрия оребренного радиатора представлены на рис. 1.

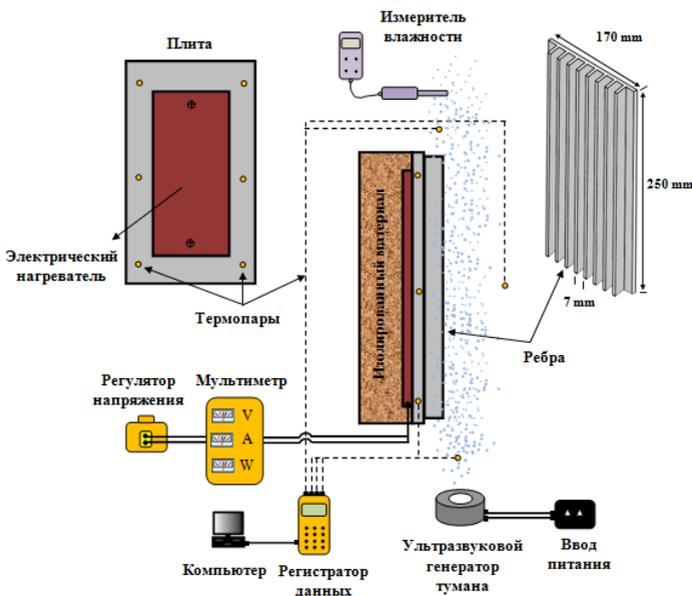


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки и геометрия оребренного радиатора

Радиатор с прямоугольными ребрами изготовлен из алюминиевого сплава с высокими теплопроводностью и излучательной способностью. Радиатор располагался под определенным углом. В качестве источника тепла для нагрева радиатора использовался силиконовый плоский электронагреватель с высотой 150 мм и шириной 100 мм. Максимальная мощность и рабочая температура нагревателя составляют 50 Вт и 160°C соответственно.

Для экспериментов без водовоздушного аэрозоля коэффициент теплоотдачи определялся следующими уравнениями [16]:

$$h = \frac{Q_{conv.}}{A \cdot (T_s - T_\infty)};$$

где $T_s - T_\infty$ - разница температур, $Q_{conv.}$ - теплота, передаваемая конвекцией, равна:

$$Q_{conv.} = Q_p - Q_{rad.};$$

где Q_p - общая подводимая теплота, $Q_{rad.}$ - теплота, передаваемая излучением, равна:

$$Q_{rad.} = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4);$$

Число Рэлея (Ra) равно:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\Delta T \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot L^3}{\mu^2} \cdot \frac{\mu \cdot c_p}{k};$$

где коэффициент теплового расширения равен:

$$\beta = \frac{1}{T_f};$$

где T_f представляет собой температурный напор, который определяет все теплофизические свойства воздуха, и который равен:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2};$$

Для экспериментов с водовоздушным аэрозолем отведенное тепло определяется следующими уравнениями [17]:

$$h_m \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) + k_c \cdot h_{fg} \cdot (x_s - x_{sat.}) = Q;$$

где h_m - коэффициент теплоотдачи водовоздушным аэрозолем; A - общая площадь поверхности; k_c - коэффициент массообмена; h_{fg} - удельная теплота парообразования; X_s - влажность насыщенного воздуха при температуре поверхности; $X_{sat.}$ - влажность насыщенного воздуха при температуре окружающей среды. Для расчета среднего диаметра капель воды в аэрозоле была сформулирована зависимость от ультразвуковой частоты [18]:

$$d_p = C \cdot \left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{0.333};$$

где C - постоянный коэффициент, равный 0,34; f - частота ультразвукового генератора аэрозоля. Число Вебера We равно:



$$We = \frac{m_w^2 \cdot d_p}{2A^2 \rho \sigma};$$

Для вертикального радиатора оптимальный шаг между ребрами равен:

$$S_{opt} = 2,714 \frac{L}{Ra^{0,25}}.$$

Число ребер при оптимальном шаге между ними равно:

$$n = \frac{W}{S+t};$$

Погрешность экспериментальных данных рассчитывалась для оценки надежности экспериментального оборудования. Погрешность коэффициента теплоотдачи и числа Рэлея равна [20]:

$$\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\partial}{\partial Q}(h) \Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial T_s}(h) \Delta T_s\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial T_\infty}(h) \Delta T_\infty\right)^2 \right];$$

$$\left(\frac{\Delta Ra}{Ra}\right)^2 = \frac{1}{Ra} \left[\left(\frac{\partial}{\partial \Delta T}(Ra) \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \rho}(Ra) \Delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \mu}(Ra) \Delta \mu\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial L}(Ra) \Delta L\right)^2 \right];$$

Максимальные погрешности коэффициента теплоотдачи и числа Рэлея оказались равны 4.1% и 5.3% соответственно.

Анализ результатов

Перед началом экспериментов были проведены пробное испытание и анализ его результатов для оценки надежности экспериментальной установки и использованных экспериментальных процедур. Адекватность полученных результатов была подтверждена, после чего данные были сопоставлены с предыдущими экспериментальными и численными данными работ [21-22], как показано на рис. 2, полученные коэффициенты теплоотдачи хорошо согласуются с предыдущими исследованиями, показывающими, что экспериментальная установка и экспериментальные процедуры в данной работе являются адекватными и надежными. На рис. 3, 4 приведены зависимости средней поверхностной температуры (температуры основания радиатора) и коэффициента теплоотдачи от входной мощности с применением водовоздушного аэрозоля и без него. Согласно уравнению (7) теплота при теплоотдаче водовоздушному аэрозолю равна сумме тепла, поглощаемого за счет испарения аэрозоля, и обычной теплоотдачи за счет конвекции. Таким образом, коэффициент теплоотдачи увеличивается примерно на 27,5%, 79,1%, 135,4% и 281% по сравнению с традиционным воздушным охлаждением ($m_w = 90 - 430$ мл/ч), как показано на рис. 4.



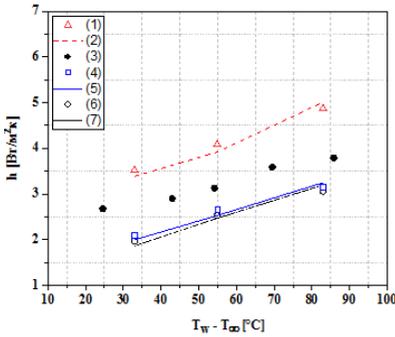


Рис. 2. Проверка адекватности данных о коэффициенте теплоотдачи: сравнение полученных данных с результатами расчетной и экспериментальными данными [21-22]

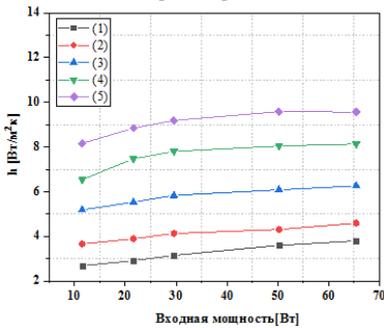


Рис. 4. Изменение среднего коэффициента теплоотдачи: (1) воздушное охлаждение; (2) $m_w = 90$; (3) $m_w = 180$; (4) $m_w = 340$; (5) $m_w = 430$ мл/ч при различных подводимых мощностях

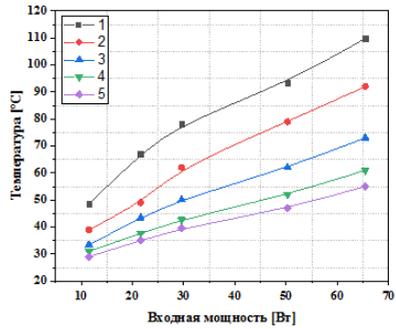


Рис. 3. Изменение средней температуры поверхности: (1) воздушное охлаждение; (2) $m_w = 90$; (3) $m_w = 180$; (4) $m_w = 340$; (5) $m_w = 430$ мл/ч при различных подводимых мощностях

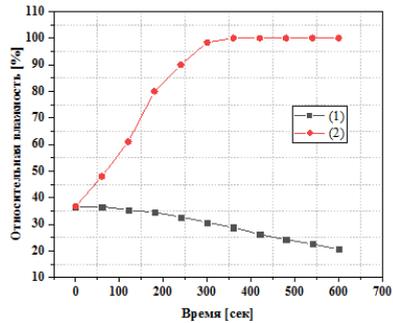


Рис. 5. Изменение средней температуры поверхности: (1) воздушное охлаждение; (2) $m_w = 90$; (3) $m_w = 180$; (4) $m_w = 340$; (5) $m_w = 430$ мл/ч при различных подводимых мощностях

Одновременно с характеристиками теплоотдачи измерялась относительная влажность над радиатором с интервалом в 60 секунд для обоих режимов, как показано на рис. 5. На рис. 6 показано изменение интенсификации теплоотдачи в зависимости от подводимой мощности ($m_w = 90 - 430$ мл/ч). Очевидно, что данное отношение для всех кон-



центраций воды в водовоздушном аэрозоле больше единицы, что показывает важную роль водовоздушного аэрозоля в процессе теплоотдачи. По мере увеличения концентрации воды в водовоздушном аэрозоле интенсификация теплоотдачи увеличивается и достигает максимального значения при $m_w = 430$ мл/ч. Теплоотдача интенсифицируется в среднем примерно в 1,28, 1,81, 2,37 и 2,83 раза по сравнению с воздушным охлаждением.

Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила получить эмпирическую корреляцию между интенсификацией теплоотдачи и числами Рэлея и Вебера:

$$h_m / h_0 = 1 + (Gr \cdot Pr)^{0,19} We^{0,35};$$

Одной из важнейших характеристик водовоздушного аэрозоля наряду с улучшением теплоотдачи является уменьшение общей площади охлаждаемой поверхности. Как упоминалось выше, использование водовоздушного аэрозоля в качестве охлаждающего радиатора рабочего тела привело к снижению температуры поверхности примерно на 43.5%, что позволяет уменьшить безразмерное число Рэлея и, следовательно, увеличить шаг между ребрами и уменьшить число ребер в соответствии с уравнением (10). Экспериментально подтверждено, что шаг между ребрами возможно увеличивать, а количество ребер уменьшать по мере увеличения концентрации воды в водовоздушном аэрозоле, что в конечном итоге приводит к уменьшению площади охлаждаемой поверхности, как показано на рис. 7.

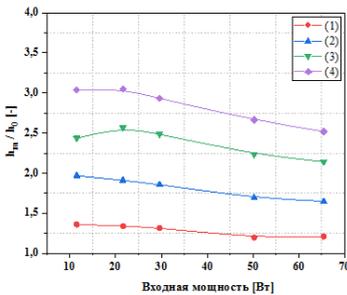


Рис. 6. Изменение интенсификации теплоотдачи:

- (1) $m_w = 90$; (2) $m_w = 180$;
(3) $m_w = 340$; (4) $m_w = 430$ мл/ч при различных подводимых мощностях

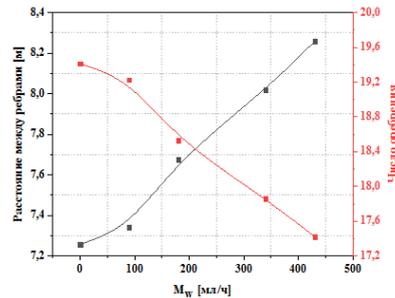


Рис. 7. Шаг между ребрами и число ребер в зависимости от концентрации воды в водовоздушной смеси при $P = 65,44$ Вт

На основании экспериментальных результатов, можно сделать следующие выводы:

- водовоздушный аэрозоль привел к значительному снижению температуры поверхности по сравнению с воздушным охлаждением. Средняя температура поверхности снижается на 19,1%, 34%, 43,5% и 48,2% в диапазоне $m_w = 90 - 430$ мл/ч по сравнению с воздушным охлаждением;

- коэффициент теплоотдачи увеличивается примерно на 27,5%, 79,1%, 135,4% и 281% в сравнении с традиционным воздушным охлаждением;

- интенсификация теплоотдачи увеличивается и достигает максимального значения при $m_w = 430$ мл/ч. Теплоотдача интенсифицируется в среднем примерно в 1,28, 1,81, 2,37 и 2,83 раза по сравнению с традиционным воздушным охлаждением;

- шаг между ребрами возможно увеличить, а количество ребер уменьшить с увеличением концентрации воды в водовоздушном аэрозоле;

- эмпирическая корреляция интенсификации теплоотдачи, основанная на экспериментальных данных, полученных из проведенных испытаний, была разработана и внедрена для практического использования.

Библиографический список

1. **Rong H. Y., Ming C.** Optimum Longitudinal Convective Fins Arrays // Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 1995. Vol. 22(3). P. 445-460. DOI: [10.1016/0735-1933\(95\)00029-X](https://doi.org/10.1016/0735-1933(95)00029-X).

2. A new design of liquid-cooled heat sink by altering the heat sink heat pipe application: Experimental approach and prediction via artificial neural network / A. Taheri, M.G. Moghadam, M. Mohammadi et al. // Energy Conversion and Management. 2020. Vol. 206. P. 112485. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.112485](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112485).

3. Development and validation of a semi-empirical model for two-phase heat transfer from arrays of impinging jets / C. Mira-Hernández, M.D. Clark, J.A. Weibel, S.V. Garime // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 124. P. 782-793. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.047](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.047).

4. Enhancing heat transfer in air-cooled heat sinks using piezoelectrically-driven agitators and synthetic jets / Y. Yu, T.W. Simon, M. Zhang et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 184. P. 184-193. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.09.001).

5. **Altun A.H., Ziyilan O.** Experimental investigation of the effects of horizontally oriented vertical sinusoidal wavy fins on heat transfer performance in case of



natural convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 139. P. 425-431. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.009](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.009).

6. Experimental and numerical investigation of natural convection heat transfer of W-type fin arrays / K. Zhang, M.-J. Li, F.-L. Wang, Y.-L. He // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 152. P. 119315. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119315](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119315).

7. **Taji, S.G., Parishwad G.V., Sane N.K.** Enhanced performance of horizontal rectangular fin array heat sink using assisting mode of mixed convection // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 72. P. 250-259. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.012](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.012).

8. **Güvenç A., Yüncü H.** An experimental investigation on performance of fins on a horizontal base in free convection heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. Vol. 37(4-5). P. 409-416. DOI: [10.1007/s002310000139](https://doi.org/10.1007/s002310000139).

9. **Abed A.H., Shcheklein S.E., and Pakhaluev V.M.** Investigation of heat transfer coefficient of spherical element using infrared thermography (IR) and gas-water droplets (mist) as working medium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 481(1). P. 012033. DOI: [10.1088/1757-899x/481/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899x/481/1/012033). [eLIBRARY ID: [38723553](https://elibrary.ru/38723553)]

10. Experimental and numerical study of air-water mist jet impingement cooling on a cylinder / C. Khangembam, D. Singh, J. Handique, K. Singh // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P. 119368. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119368](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119368).

11. **Yu F.W., Chan K.T.** Improved energy performance of air-cooled chiller system with mist pre-cooling // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31(4). P. 537-544. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2010.10.012](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.012).

12. **Lee S.L., Yang Z.H., Hsyua Y.** Cooling of a Heated Surface by Mist Flow // Journal of Heat Transfer. 1994. Vol. 116(1). P. 167-172. DOI: [10.1115/1.2910851](https://doi.org/10.1115/1.2910851).

13. **Abed A. H., Shcheklein S. E., Pakhaluev V. M.** Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer of sphere cooling using air/water mist two phase flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 552(1). P. 012001. DOI: [10.1088/1757-899x/552/1/012001](https://doi.org/10.1088/1757-899x/552/1/012001). [eLIBRARY ID: [41612376](https://elibrary.ru/41612376)]

14. Analysis of evaporating mist flow for enhanced convective heat transfer / N. Kumari, V. Bahadur, M. Hodes et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53(15-16). P. 3346-3356. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.027](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.027).

15. Enhanced cooling in a sealed cabinet using an evaporating-condensing dielectric mist / V. Bahadur, M. Hodes, A. Lyons et al. // 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. 2008. P. 1191-1198. DOI: [10.1109/ITHERM.2008.4544396](https://doi.org/10.1109/ITHERM.2008.4544396).

16. **Yalcin H. G., Baskaya S., Sivrioglu M.** Numerical analysis of natural convection heat transfer from rectangular shrouded fin arrays on a horizontal surface



// International Communications in Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 35(3). P. 299-311. DOI: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.07.009](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.07.009).

17. **Barrow H., Pope C.W.** Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling // Applied energy. 2007. Vol. 84(4). P. 404-412. DOI: [10.1016/j.apenergy.2006.09.007](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.007).

18. Effect of ultrasonic frequency on size distributions of nanosized mist generated by ultrasonic atomization / T. Kudo, K. Sekiguchi, K. Sankoda et al. // Ultrasonics sonochemistry. 2017. Vol. 37. P. 16-22. DOI: [10.1016/j.ultsonch.2016.12.019](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.019).

19. **Cengel Y.** Heat and Mass Transfer. A practical approach. Columbus (GA, USA): Mc-Graw Hill Education, 2003. 874 c.

20. **Moffat R.J.** Describing the Uncertainties in Experimental Results // Experimental Thermal and Fluid Science. 1988. Vol. 1. P. 3-17. DOI: [10.1016/0894-1777\(88\)90043-x](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-x).

21. **Harahap F., McManus H.N.** Natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin arrays // Journal of Heat Transfer. 1967. P. 32-38. DOI: [10.1115/1.3614318](https://doi.org/10.1115/1.3614318).

22. **Baskaya S., Sivrioglu M., Ozek M.** Parametric study of natural convection heat transfer from horizontal rectangular fin arrays // International Journal of Thermal Sciences. 2000. Vol. 39(8). P. 797-805. DOI: [10.1016/s1290-0729\(00\)00271-4](https://doi.org/10.1016/s1290-0729(00)00271-4). [eLIBRARY ID: [15144648](https://doi.org/15144648)]



STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF THE RADIATOR WITH VERTICAL FINNING USING AEROSOL EVAPORATIVE COOLING

A.H. Abed¹, H.A. Hussein¹ and V.M. Pakhaluev²

¹University of Technology, Baghdad,

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg

Abstract. The paper is dedicated to the new cooling scheme examination where aerosol is injected directly into the air-cooling system and then the evaporated aerosol is collected and redirected back to the inlet ports. It has examined the air-and-water aerosol influence on the heat extractor characteristics and area of the cooling surface of radiator with parallel square fins considering natural convection as well as radiation. Also, the influence of different characteristics has been examined, such as the concentration of water in aerosol, input power of heating, on the characteristics of the heat extractor.

Keywords: cooling, air-and-water aerosol, fog, heat transfer coefficient, radiator.



УДК 621.039

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА АЭС С РЕАКТОРАМИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

Студент **Костарев В.С.**Студент **Ширманов И.А.**Студент **Аникин А.А.**Д-р техн. наук, проф. **Щеклеин С.Е.***Уральский федеральный университет**имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

***Аннотация.** В настоящее время мировая теплоэнергетика уже начала переход на суперсверхкритические параметры пара, что позволяет увеличить КПД и снизить расход топлива, а, соответственно и сбросы вредных веществ в окружающую среду. Одним из способов повышения энергоэффективности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах является совершенствование термодинамического цикла. В работе представлены результаты компьютерного моделирования вариантов тепловых схем АЭС с реактором БН-1200 с использованием неядерного перегрева пара, а также паровой компрессии для получения суперсверхкритических параметров пара и проведена оценка эффективности использования данных тепловых схем.*

***Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, тепловая схема АЭС, термодинамическая эффективность, суперсверхкритические параметры пара.*

Введение

В настоящее время известно несколько способов повышения энергоэффективности АЭС путем применения перегрева пара как ядерного, так и неядерного.

В теплоэнергетике благодаря развитию технологий энергетического машиностроения и созданию высокотемпературных паровых турбин и компрессоров, стало возможным широкое применение циклов на суперсверхкритических параметрах пара ($P=30$ МПа, $t=650^{\circ}\text{C}$), что позволяет рассматривать возможность достижения суперсверхкритических параметров пара как на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах (РТН) так и на АЭС с РБН [1, 2].



В работе представлены результаты моделирования различных вариантов тепловых схем реактора БН-1200 (стандартный цикл, стандартный цикл с начальным огневым перегревом пара, цикл с компрессией и одноступенчатым промежуточным огневым перегревом пара, цикл с компрессией и двухступенчатым промежуточным огневым перегревом пара) при помощи САПР United Cycle. Целью работы является определение наиболее эффективного варианта модификации тепловой схемы АЭС с БН-1200 (применение компрессии и неядерного огневого перегрева пара для поручения суперсверхкритических параметров пара) с термодинамической точки зрения.

Для решения задач моделирования тепловых схем АЭС авторами использовался программный пакет САПР United Cycle, предназначенный для расчета стационарных эксплуатационных режимов работы [3].

Постановка задачи

Перед началом моделирования были заданы следующие начальные параметры: температура острого пара принималась равной 505°C, давление – 16,30 МПа, расход пара – 4796,10 т/ч.

В САПР United Cycle затем были построены несколько потенциально возможных вариантов тепловых схем для их дальнейшего расчета. Рассматривались следующие варианты:

- тепловая схема БН-1200 со стандартными параметрами;
- тепловая схема БН-1200 со стандартными параметрами и начальным огневым перегревом пара (до 650°C);
- тепловая схема БН-1200 с компрессией (до 30 МПа) и одним промежуточным огневым перегревом пара (до 650°C);
- тепловая схема БН-1200 с компрессией (до 30 МПа) и двумя промежуточными огневыми перегревами пара (до 650°C).

Изначально моделирование тепловых схем производилось без учета регенеративного подогрева. Для всех вариантов схем определены КПД нетто и коэффициент использования ядерной мощности. Далее был дополнительно просчитан регенеративный подогрев для определения КПД нетто с учетом регенерации.

Результаты

По результатам расчетов был проведен анализ эффективности использования различных вариантов тепловых схем. На рис. 1 и рис. 2 представлены значения электрической мощности и КПД нетто, полученные в результате расчетов. Синим обозначены параметры без учета регенеративного подогрева, зеленым – с учетом подогрева.



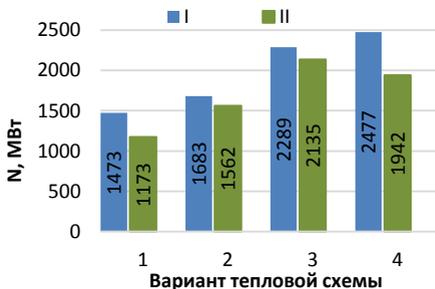


Рис. 1. Электрическая мощность нетто. I – тепловые схемы без включения системы РППВ; II – тепловые схемы с включением системы РППВ:
 1 – тепловая схема БН-1200 со стандартными параметрами; 2 – тепловая схема БН-1200 со стандартными параметрами и начальным огневым перегревом пара; 3 – тепловая схема БН-1200 с компрессией и одним промежуточным огневым перегревом пара; 4 – тепловая схема БН-1200 с компрессией и двумя промежуточными огневыми перегревами пара

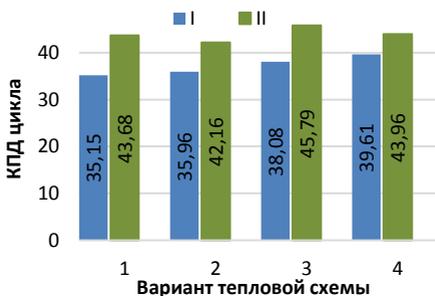


Рис. 2. КПД нетто цикла (без учета системы регенеративного подогрева).
 Обозначения номеров схем аналогичны рис. 1

Для оценки величины вклада ядерной мощности в общую мощность станции был также рассчитан коэффициент использования ядерной энергии ξ по следующей формуле:

$$\xi = \frac{Q_{\text{пг}}}{Q_{\text{пг}} + \sum Q_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{пг}}$ – тепловая мощность парогенератора, $\sum Q_{\text{к}}$ – суммарная тепловая мощность паровых котлов, используемых в тепловой схеме. На рис. 3 представлены результаты расчета.



Рис. 3. Коэффициент использования ядерной энергии в цикле.

Обозначения номеров схем аналогичны рис. 1

Из анализа схем видно, что наибольшим КПД и наибольшим значением электрической мощности обладает схема 4 (тепловая схема с компрессией и двумя промежуточными огневыми перегревами пара). В то же время вклад ядерной составляющей в общую мощность установки у данной схемы является наименьшим из всех рассчитанных вариантов, однако, несмотря на это, остается достаточно высоким.

Для дальнейшего анализа, в программе United Cycle авторами были построены и рассчитаны варианты схем 1-4 с учетом включения в систему турбоустановки системы регенеративного подогрева питательной воды (РППВ) (показаны на рис. 1 и рис. 2).

Сравнение значений параметров пара, полученных в результате расчета стандартной тепловой схемы БН-1200 в United Cycle, с проектными, показало, что расчетные значения совпадают с проектными (различия между значениями не превышают 5%), что позволяет судить о достоверности расчетов, проводимых в программе.

Параметры отборов и конечные параметры для каждого варианта схем, за исключением стандартной, подбирались исходя из необходимости получить в результате расчетов максимальный КПД. По результатам расчетов наибольшим КПД (45,79%) и наибольшей мощностью (2145,36 МВт) обладает тепловая схема с компрессией и одним промежуточным огневым перегревом пара. При этом для повышения термодинамической эффективности было принято решение понизить давление пара в конце процессе расширения в ЦНД до с 0,052 до 0,031 кг/см², снизить конечную влажность пара с 9,73 до 6,2%, а также отказаться от включения в систему РППВ ПВД-6 (питательная вода по-

сле прохождения ПВД-5 отправляется напрямую в парогенератор). Данный вариант тепловой схемы представлен на рис. 4.

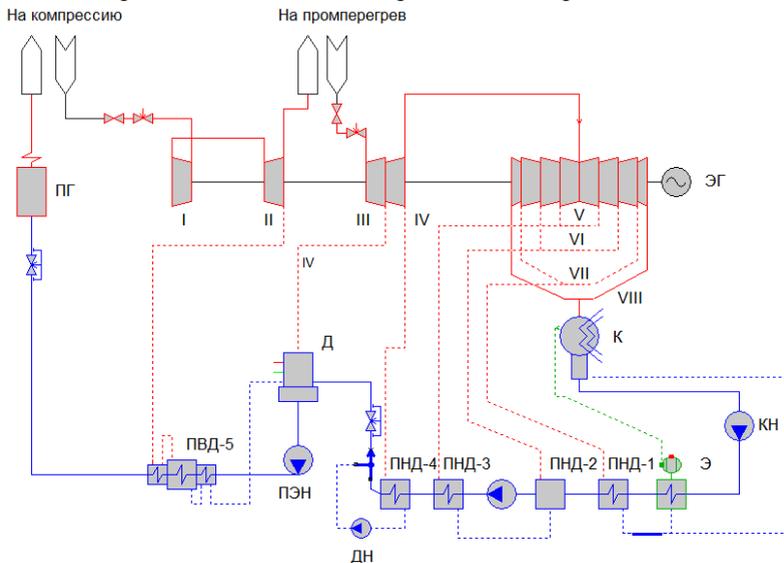


Рис. 4. Тепловая схема с компрессией и одноступенчатым огневым перегревом, созданная в United Cycle:

I, II, III, IV – отсеки ЦВД; V, VI, VII, VIII – отсеки ЦСД-ЦНД; Д – деаэрактор;
ДН – дренажный насос; К – конденсатор; КН – конденсатный насос;

ПВД-5 – подогреватель высокого давления; ПГ – парогенератор;
ПНД-1, 2, 3, 4 – подогреватели низкого давления, ПЭН – питательный электронасос, Э – эжектор; ЭГ – электрогенератор

Заключение

Результаты показали, что при применении в тепловой схеме реактора БН-1200 компрессии пара (до 30 МПа) и его последующего промежуточного неядерного (огневого) перегрева после ЦВД электрическая мощность установки увеличится на 50%, а КПД нетто увеличится на 5% по сравнению со стандартным циклом установки, что приводит к значительному повышению термодинамической эффективности цикла.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение компрессии и неядерного (огневого) перегрева пара для получения суперсверхкритических параметров на АЭС с реактором БН-1200 является оправданным мероприятием, поскольку позволяет значительно

повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, а также коэффициент полезного действия.

Совершенствование термодинамического цикла АЭС с реакторами на быстрых нейтронах требует дальнейшей проработки. В дальнейшем авторами планируется рассмотреть эффективность применения компрессии и огневого перегрева пара на примере реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ-ОД-300).

Библиографический список

1. **Касилов В. Ф., Низовой А. В.** Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций // Научные исследования: от теории к практике. 2015. № 4 (5). С. 34-38. [eLIBRARY ID: [24922765](#)]

2. **Darwish M. A., Al Awadhi F. M., Bin Amer A.O.** Combining the nuclear power plant steam cycle with gas turbines // Energy. 2010. № 35. P. 4562–4571. DOI: [10.1016/j.energy.2010.04.031](#).

3. United Cycle [Сайт]. URL: <https://msystema.ru/o-produkte> (дата обращения: 20.10.2020).

4. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А.И. Бельтюков, А.И. Карпенко, С.А. Полуяктов и др.; Отв. ред. Ответственный редактор: О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин. Екатеринбург: УрФУ, 2013. 548 с. [eLIBRARY ID: [24810140](#)]

5. **Петров А. А., Роменков А. А., Ярмоленко О. А.** Использование опыта Белоярской АЭС в области ядерного перегрева при создании ядерных реакторов нового поколения с повышенными и сверхкритическими параметрами теплоносителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 2. С. 21-29. [eLIBRARY ID: [12790000](#)]



IMPLEMENTATION OF NON-NUCLEAR SUPERHEATING OF STEAM TO OBTAIN ULTRA-SUPERCRITICAL PARAMETERS AT NPP WITH FAST NEUTRON REACTORS

V.S. Kostarev, I.A. Shirmanov, A.A. Anikin and S.E. Shcheklein

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

Abstract. The objective of this paper is the determination of the most efficient variant of thermal scheme modification of NPP with BN-1200 reactor from the standpoint of thermodynamic. To solve the problems of NPP thermal scheme modeling the authors have used CAD software package United Cycle, which is



designed to solve problems, determine the optimal structure and equipment components of the thermo-energetic facility, and calculate steady-state operation modes. The results have shown that implementation in BN-1200 reactor thermal scheme of steam compression up to 30 MPa and its further intermediate non-nuclear (firing) superheating after high-pressure cylinder the unit's electrical capacity has increased by 50% and net efficiency increased by 5% which leads to the substantial increase of cycle's thermodynamic effectiveness.

Keywords: fast neutron reactor, NPP, thermodynamic efficiency, ultra-supercritical parameters of steam.



УДК 662.994

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Аспирант **Мильто О.А.**Канд. техн. наук, доц. **Амосов Н.Г.***Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. Статья посвящена исследованию повышения эффективности работы котельного агрегата ТГМП-344А путём внедрения в технологическую схему утилизационной установки. Рассматривается возможность применения конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа и использования потенциала уходящих газов для подогрева сырой воды перед системой химводоочистки ТЭЦ.

Ключевые слова: энергоэффективность, ТЭЦ, энергетический котёл, уходящие газы, конденсационный экономайзер, глубокое охлаждение.

В настоящее время энергетическая политика России направлена на развитие энергосберегающих технологий. Одним из способов её реализации на ТЭЦ является полезное использование вторичных тепловых энергетических ресурсов, образующихся в процессе производства теплоты и электроэнергии. Это способствует экономии топлива, снижению себестоимости вырабатываемых продуктов, а также сокращению нагрузки на окружающую среду [1].

Возможный для утилизации источник низкопотенциальной теплоты – уходящие газы котельных агрегатов. Глубокая утилизация теплоты влажных продуктов сгорания в конденсационных ТУ позволит охладить уходящие газы ниже точки росы и использовать их теплоту для подогрева воды, идущей на технологические нужды станции.

Цель работы: разработка предложения по утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих газов от парового котла ТГМП-344А с дальнейшим полезным её использованием.

Задачи:

- 1) оценить возможность утилизации теплоты уходящих газов от парового котла ТГМП-344А;
- 2) произвести расчёт конденсационного ТУ (определить тепловую нагрузку, поверхность теплообмена, коэффициент теплопередачи);



3) оценить влияние утилизационной установки на эффективность работы котельного агрегата.

В качестве объекта исследования принят энергоблок (ЭБ) №1 мощностью 250 МВт Южной ТЭЦ (ТЭЦ-22) г. Санкт-Петербурга. Основное оборудование ЭБ составляют паровой котёл ТГМП-344А и турбоагрегат Т-250/300-240.

Основным топливом для котлоагрегатов служит природный газ, резервным - мазут марки М-100. Восполнение потерь воды в технологическом цикле осуществляется из реки Нева от насосной станции, расположенной в 6,5 км от ТЭЦ. Предусмотрена система ХВО.

Моделирование работы энергоблока

На основе данных об оборудовании ЭБ №1 разработана математическая модель ЭБ мощностью 250 МВт на базе турбины Т-250/300-240 в САПР United Cycle (рис. 1).

С использованием разработанной модели выполнены исследования и анализ основных режимов работы ЭБ: максимально-зимнего (I), зимнего с малыми отопительными нагрузками(II) и летнего (III). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета режимов работы ЭБ

Параметр	Режим		
	I	II	III
Паропроизводительность котла, т/ч	1000	932	855
Мощность на клеммах генератора, МВт	250,07	250,01	250,00
Мощность котла, МВт	723,58	680,36	624,93
Суммарная тепловая мощность, МВт	406,92	395,3	91,23

Тепловой расчёт конденсационного теплоутилизатора

В конденсационных ТУ возможно охладить уходящие дымовые газы до температуры ниже точки росы и использовать скрытую теплоту конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Существует два основных типа конденсационных теплоутилизаторов: контактный и поверхностный. В поверхностных аппаратах отсутствует непосредственный контакт дымовых газов с нагреваемой водой, следовательно, она не приобретает коррозионно-агрессивные свойства.[2,3] С учетом этого решено для утилизации теплоты уходящих газов котла ТГМП-344А рассматривать ТУ поверхностного типа с биметаллическими оребренными трубками. Установка ТУ производится в газоходе котла между воздухоподогревателем и дымососом.



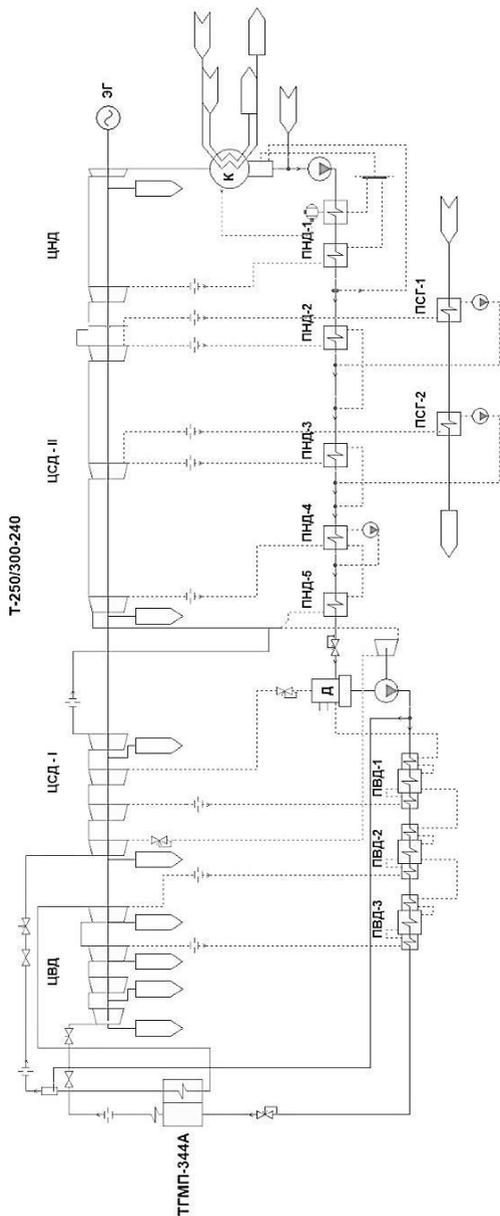


Рис. 1. Модель энергоблока с турбиной Т-250/300-240;

ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД-I, ЦСД-II – цилиндры среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЭГ – электрогенератор;

К – конденсатор; ПВД-1 – ПВД-5 – подогреватели низкого давления;

Д – деаэрактор; ПВД-1 – ПВД-3 – подогреватели высокого давления;

ПСГ-1, ПСГ-2 – подогреватели сетевой воды

Принято решение, что рассчитываемый ТУ будет служить для подогрева сырой воды перед системой ХВО станции. По технологическим условиям водоподготовки перед ХВО необходим подогрев сырой воды до 30°C. Это позволяет осуществить глубокую утилизацию, так как для конденсации водяных паров из дымовых газов необходимо, чтобы температура стенки была ниже точки росы (53-55°C). [4]

На Южной ТЭЦ восполнение потерь в технологическом цикле осуществляется из реки Нева (принимается, что летом температура забираемой из реки воды равна 15°C, зимой 5°C). Годовое водопотребление составляет 3 млн. м³, то есть в среднем 343 т/ч.

Чтобы спроектировать теплоутилизатор и наладить режимы его работы, нужно оценить необходимый расход дымовых газов на входе в ТУ, количество газов, идущих на байпас, в зависимости от режима работы котла, а также площадь поверхности ТУ.

Тепловой расчёт конденсационного ТУ проведён в соответствии с методикой А.А. Кудинова [5]. Результаты приведены в табл. 2.

Эффективность установки теплоутилизатора

Коэффициент полезного действия конденсационного ТУ:

$$\eta_{\text{ТУ}} = \frac{Q_{\text{ТУ}}}{G_{\text{Г}} \cdot I'_{\text{УХ}}} \cdot 100,$$

где $I'_{\text{УХ}}$ - энтальпия уходящих газов на входе в ТУ, кДж/кг.

Повышение коэффициента использования теплоты топлива котла при глубоком охлаждении уходящих продуктов сгорания в ТУ:

$$\Delta\eta_{\text{КУ}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{ТУ}}}{B_{\text{Г}} \cdot Q_{\text{В}}^{\text{С}}} \cdot 100,$$

где $Q_{\text{В}}^{\text{С}}$ – высшая теплота сгорания при стандартных условиях, кДж/м³.

КПД котла брутто $\eta_{\text{К}}^{\text{БР}}$ из метода прямого баланса [6]:

$$\eta_{\text{КА}}^{\text{БР}} = \frac{Q_{\text{КА}}}{Q_{\text{Р}}^{\text{П}} B_{\text{Г}}},$$

где $Q_{\text{КА}}$ – теплота, полезно отданная котлу; $Q_{\text{Р}}^{\text{П}}$ – располагаемая теплота, приходящаяся на 1 кг топлива.

КПД котла брутто также определяется по обратному балансу [7]:

$$\eta_{\text{К}}^{\text{БР}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

Значения потерь теплоты с уходящими газами q_2 , потерь теплоты от химической неполноты сгорания q_3 , потерь теплоты от наружного охлаждения q_5 принимаются по режимным картам. При сжигании газообразных топлив q_4 и $q_6 = 0\%$.



Таблица 2

Результаты расчета ТУ для трех режимов работы котла

Расчетный параметр	Обознач.	Размерность	Паропроизводительность котла, т/ч		
			855	932	1000
Температура газов на входе в ТУ	t'_{yx}	°С	112,5	113,5	114,0
Коэф. избытка воздуха в ух. газах	α_{yx}	-	1,34	1,32	1,30
Температура воды на входе в ТУ	$t_{в1}$	°С	15	5	5
Температура воды на выходе ТУ	$t_{в2}$	°С	30	30	30
Расход топлива на котёл	B_r	нм ³ /ч	68400	74560	80000
Объём ух. газов за РВП	V_{yx}	м ³ /ч	958900	1030792	1090480
Объём ух. газов на входе в ТУ	V'_{yx}	м ³ /ч	89977	147073	144382
Объём ух. газов на выходе из ТУ	V''_{yx}	м ³ /ч	73055	119104	116774
Влагосодержание продуктов сгорания на входе в ТУ	d'_{yx}	кг/кг с.г.	0,1119	0,1135	0,151
Влагосодержание продуктов сгорания на выходе из ТУ	d''_{yx}	кг/кг с.г.	0,0465	0,0465	0,0465
Тепловая нагрузка ТУ	$Q_{ТУ}$	МВт	5,99	9,98	9,98
Расход нагреваемой воды	G_b	кг/ч	343000	343000	343000
Количество конденсата	G_k	кг/ч	4341	7241	7264
Плотность орошения	W	кг/м ³ ч	1,620	2,702	2,710
Скорость газов	v_r	м/с	3,153	6,11	6,01
Число Рейнольдса по нар. стороне	Re_n	-	2755	5339	5251
Критерий орошения наружной поверхности трубки	K_n	-	0,406	0,677	0,680
Коэффициент теплоотдачи по наружной стороне	α_n	Вт/(м ² ·°С)	51,453	77,292	76,987
Число Рейнольдса по внутренней стороне	Re_b	-	28783	25421	25421
Коэффициент теплоотдачи по внутренней стороне	α_b	Вт/(м ² ·°С)	8906	9338	9338
Коэффициент теплопередачи	$k_{ТУ}$	Вт/(м ² ·°С)	46,4	66,77	66,54
Площадь оребренной поверхности	$F_{ТУ}$	м ²	2680	2680	2680
Доля байпасирования	δ	%	93,355	89,922	90,660



Температура уходящих газов после ТУ:

$$t_{yx} = \frac{\delta}{100} \cdot t'_{yx} + \left(1 - \frac{\delta}{100}\right) \cdot t''_{yx},$$

Потери теплоты котла с уходящими газами с учётом работы ТУ:

$$q_2^B = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{p.v.p.}) \cdot 100}{Q_B^c},$$

где I_{yx} - энтальпия ух. газов, кДж/м³; $I_{p.v.p.}$ - энтальпия воздуха после калорифера, кДж/м³;

Удельный расход топлива на котёл без ТУ:

$$b = \frac{B}{Q_{ка}} \cdot \frac{1000}{3,6},$$

где B – расход газа на котёл т усл. топл./ч.

Удельный расход топлива в случае установки ТУ:

$$b_{k+ту} = \frac{B}{Q_{ка} + Q_{ту}} \cdot \frac{1000}{3,6},$$

Стоимость 1 м³ сырой воды для Южной ТЭЦ составляет около 5,8 руб./м³. Рассчитанный ТУ позволяет сконденсировать из продуктов сгорания от 4,3 до 7,2 т/ч конденсата в зависимости от режима работы.

Образующийся конденсат по качеству сопоставим с водой, подготовленной в водоподготовительных установках. При его использовании обеспечивается также экономия реагентов, электроэнергии и воды.

Результаты расчёта представлены в табл. 3.

Выводы

1. Расчётами подтверждается целесообразность использования теплоты продуктов сгорания парового котла ТГМП-344А для нагрева сырой воды перед системой ХВО путём внедрения в технологическую схему конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа.

2. Расчетная площадь оребрённой поверхности ТУ составляет 2680 м².

3. После смешивания дымовых газов их температура за ТУ снижается на 5-7°С в зависимости от режима работы, что обеспечивает повышение КПД котельной установки.

4. Внедрение ТУ позволяет снизить удельный расход условного топлива на выработку энергии котлом до 2,13 кг у.т./ Гкал (1,45%), что позволяет экономить до 8350 т у.т./год.

5. В зависимости от режимов работы из продуктов сгорания выделяется от 4,3 до 7,3 т/ч конденсата.



Таблица 3

Эффективность установки ТУ для трех режимов работы котла

Расчетный параметр	Обозначение	Размерность	Паропроизводительность котла, т/ч		
			855	932	1000
Коэффициент полезного действия ТУ	$\eta_{ТУ}$	%	62,01	62,53	63,01
КИТТ котельной установки с ТУ	$\Delta\eta_{КУ}^B$	%	0,64	0,97	0,91
Температура дымовых газов за РВП	t'_{yx}	°С	112,5	113,5	114
Температура ух. газов после ТУ	t_{yx}	°С	107,8	106,0	107,0
КПД котла брутто	$\eta_k^{бр}$	%	95,24	95,26	95,29
Потери теплоты с ух. газами без ТУ	q_2	%	4,52	4,52	4,51
Потери теплоты с ух. газами с ТУ	q_2^B	%	3,87	3,78	3,79
Увеличение КПД котла	$\Delta\eta$	%	0,65	0,74	0,72
Удельный расход топлива на котёл без ТУ	b	кг у.т./Гкал	146,99	147,19	148,49
Удельный расход топлива на котёл с ТУ	$b_{к+ту}$	кг у.т./Гкал	145,59	145,06	146,46
Изменение удельного расхода условного топлива	Δb	%	0,95	1,45	1,37
Экономия при внедрении КТУ	Эк	руб./Гкал	6,4	9,78	9,32

6. Полученный конденсат можно использовать для подпитки теплосети или для восполнения потерь в технологическом цикле, предусмотрев дополнительные мероприятия по дегазации, что позволяет экономить до 44 руб./ч при расчете по тарифу сырой воды для ТЭЦ.

7. ТУ способен обеспечить подогрев сырой воды до 30 °С.

8. Для обеспечения стабильной работы системы ХВО достаточно утилизировать 9,3% от всего объема продуктов сгорания в максимально-зимнем режиме. Для зимнего режима с малыми отопительными нагрузками это значение равно 10,1%, для летнего – 6,6%.

Библиографический список

1. Мильто О.А., Калмыков К.С. Утилизация низкопотенциальной теплоты уходящих газов котельных агрегатов // Энергетические системы: III Межд. научно-техн. конф.: сб. тр. Белгород. Белгород: БГТУ, 2018. – С. 298-302. [eLIBRARY ID: [37575626](#)]

2. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Л.: Недра, 1990. 280 с.



3. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Охлаждение продуктов сгорания природного газа в конденсационных теплоутилизаторах // Промышленная энергетика. 2010. № 4. С. 39-43. [eLIBRARY ID: [19549046](#)]

4. **Штым К.А., Бранд А.Э., Довбыш В.О.** Повышение эффективности работы энергетических котельных агрегатов при сжигании природного газа методом использования скрытой теплоты конденсации водяных паров уходящих газов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сб. мат. I всерос. научно-практ. конф. Кемерово: КузГТУ, 2014. С. 28. [eLIBRARY ID: [24632303](#)]

5. **Кудинов А.А., Зиганшина С.К.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. 376 с. [eLIBRARY ID: [20240847](#)]

6. **Ковалев А.П.** Парогенераторы: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 376 с.

7. **Кузнецов Н.В.** Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 296 с.

8. **Yanvarev I.A., Grokhotov V.Yu.** Multisection heat exchangers for heat utilization of the waste gases from heat power plants // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol 1260. P. 052034. DOI: [10.1088/1742-6596/1260/5/052034](#). [eLIBRARY ID: [41694655](#)]

9. **Yang F., Yuan X., Lin G.** Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol 23(3). P. 367-372. DOI: [10.1016/S1359-4311\(02\)00190-4](#).



CONDENSING HEAT RECOVERY UNIT USE FOR OPERATION EFFICIENCY INCREASE OF BOILER UNITS

O.A. Milto and N.T. Amosov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg

Abstract. The article is dedicated to the research of operation efficiency increase of the boiler unit TGMP-344A by introducing the utilization unit into the technological scheme. The article considers the possibility of closed type condensing heat recovery unit use and utilization of an exhaust gas potential for raw water heating before a water treatment system at CHP.

Keywords: energy efficiency, CHP, power boiler, exhaust gases, condensing economizer, deep cooling.



УДК 621.165-155

ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ РАДИАЛЬНОЙ МИКРОТУРБИНЫ С ВОДЯНЫМ ИЛИ ПЕНТАНФТОРПРОПАНОВЫМ ПАРОМ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ «PYTHON»

Пашенко В.С.

*Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск*

Аннотация. Представлен алгоритм оптимизационного расчета радиальной микротурбины с водяным или пентанфторпропановым паром в программной среде «Python», позволяющий решить задачу поиска термодинамических характеристик, при которых внутренний относительный КПД турбины будет максимальным. Описан метод поиска максимального внутреннего относительного КПД ступени с помощью программной среды «Python». Приведены результаты расчетов для микротурбины мощностью 100 кВт.

Ключевые слова: радиальная паровая турбина, проточная часть, оптимизация, микроэнергетический комплекс

В связи с тем, что на сегодняшний день остро стоит проблема эффективной переработки мусора и отходов локально на местах их образования [1], приоритетным направлением развития малой распределенной энергетики становится проектирование опытно-промышленных энергетических комплексов мощностью 50 – 500 кВт, которые будут включать в себя оборудование, как термической деструкции отходов, так и энергетический модуль в котором полученное тепло будет использоваться для выработки электрической энергии на собственные нужды, получая при этом экономическую выгоду за счет снижения затрат на транспортировку и хранение отходов; снижение экологической нагрузки на окружающую среду.

Одним из таких комплексов, является экспериментальный энергетический комплекс по переработке отходов, спроектированный и смонтированный ООО ИТЦ «ДонЭнергоМаш» в г. Новочеркасске с целью утилизации лузги подсолнечника и получения электрической энергии на собственные нужды [2, 3].



Для данного комплекса была разработана и изготовлена радиальная паровая микротурбина мощностью 100 кВт, расчетный внутренний относительный КПД $\eta_{oi}=0,48$.

Цель работы – повышение эффективности преобразования энергии в паровой турбине для обеспечения возможности экономичной опытно-промышленной эксплуатации в энергетических комплексах по переработке отходов. При этом актуальной задачей становится разработка оптимизационной математической модели паровой радиально-осевой ступени малой мощности в одномерной постановке задачи.

Постановка оптимизационной задачи

Необходимо найти такой набор термогазодинамических характеристик A (оптимизируемых параметров), при которых внутренний относительный КПД турбины η_{oi} будет максимальным:

$$\eta_{oi} = \eta_{oi}(A) \rightarrow \max.$$

Оптимизируемые термогазодинамические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимизируемые термогазодинамические характеристики

Параметр	Значение
Отношение окружной скорости к фиктивной скорости, $u = u_1/c_\Phi$	0,2 – 0,6 (шаг 0,02);
Степень радиальности ступени $d = d_2/d_1$ (отношения диаметра на выходе из рабочего колеса к диаметру на входе в рабочее колесо)	0,3 – 0,8 (шаг 0,1);
Угол выхода потока пара из сопел, $\alpha_1, ^\circ$	12 – 20 (шаг 1);
Степень реактивности, ρ	0-0,5 (шаг 0,1);

Рабочие лопатки отфрезерованы на диске малой толщины по сравнению с его диаметром (рис. 1, где l_1, l_2 – длина рабочей лопатки на входе и выходе из рабочего колеса; d_1, d_2 – диаметр рабочего колеса на входе и выходе из рабочего колеса; B_p – ширина диска; 1 – диск рабочего колеса; 2 – рабочая лопатка прототипа радиальной турбины; 3 – рабочая лопатка после выполнения условия безотрывного течения; 4 – диск рабочего колеса после выполнения условия безотрывного течения), следовательно, изгибающие напряжения, действующие на лопатки могут превысить допустимые значения.



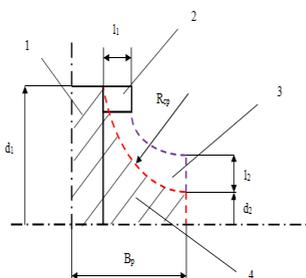


Рис. 1. Диск рабочего колеса радиальной турбины

Следовательно, необходимо увеличить ширину диска до величины B_p таким образом, чтобы обеспечить условие безотрывного течения рабочего тела в межлопаточных каналах[4], данное условие приведено в табл. 2. Вся система ограничений задана в виде неравенств и логических условий и приведена в табл. 2.

Таблица 2

Система ограничений

Параметр	Значение
Условие безотрывного течения рабочего тела в межлопаточных каналах	$\frac{l_2 - l_1}{B_p} < 0,52$
Напряжения, действующие на диск не должны превышать допустимого значения	$\sigma < \sigma_d$
Угол выхода абсолютной скорости потока из рабочей решетки, $\alpha_2, ^\circ$	90
Действительная относительная скорость парового потока на выходе из рабочей решетки, w_2 , м/с должна быть больше окружной скорости на выходе из рабочего колеса, u_2 , м/с	$w_2 > u_2$ $2000 \cdot H_p + w_1^2 + u_2^2 - u_1^2 > 0$
Длина сопловой лопатки не должна превышать допустимых значений	$l_{\min} < l_c < l_{\max}$
Длины рабочей лопатки на входе и выходе из рабочего колеса не должны превышать допустимых значений	$l_{\min} < l_1 < l_{\max}$ $l_{\min} < l_2 < l_{\max}$



Допущения: параметры постоянны в поперечном сечении канала (используются уравнения для одномерного движения потоков в проточной части микротурбины); теплообмен с внешней стороны не учитывается; параметры потока постоянны во времени, т.е. поток установившийся; кинетическая энергия $c^2_0/2$ не учитывается т.к. скорость подвода пара к сопловой решетке c_0 мала; дросселирование (понижение давления из-за изменения площади сечения канала) органического пара перед турбиной не учитывается т.к. пренебрежительно мало.

Для решения поставленной оптимизационной задачи разработан алгоритм расчета центростремительной одноступенчатой паровой микротурбины.

Алгоритм расчета радиальной одноступенчатой паровой микротурбины

Математическая модель основана на уравнениях преобразования энергии, которые описывают течение рабочего тела, а именно на: уравнении состояния, неразрывности (расхода), количества движения и сохранения энергии, записанных для радиальной паровой турбины.

Основы одномерного конструкторского (проектировочного) термодинамического расчета паровых турбин большой мощности изложены в трудах А.Г. Костюка, А.В. Щегляева, В.В. Фролова, А.Н. Шерстюка, А.Д. Трухня, Л.И. Слободянюка и др. [5-8]. При этом, расчет радиально-осевых ступеней практически не рассматривается.

Большой вклад в совершенствование и изучение методики термодинамического расчета радиально-осевых ступеней малой мощности газовых турбин внесли В.Т. Митрохин, А.Н. Шерстюк, А.Е. Зарякин, Г.Ш. Розенберг [9-11].

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета радиальной одноступенчатой паровой микротурбины. Исходными данными являются: мощность турбины N_s , кВт, частота вращения ротора турбины n , 1/с, давление на выходе из турбины p_2 , давление пара перед турбиной, p_0 , МПа, температура пара перед турбиной, t_0 , °С, механический КПД турбины, η_m , КПД электрогенератора, $\eta_{эг}$, степень реактивности, ρ , начальное приближение внутреннего относительного КПД турбины, η_{oi} , выбор рабочего тела (программа позволяет выбрать любое потенциально подходящее для использования вещество из библиотеки теплофизических свойств «CoolProp» [12]. Программа CoolProp - является библиотекой C ++, в которой содержится 110 чистых и псевдо-чистых жидкостей, а также 40 несжимаемых жидкостей.



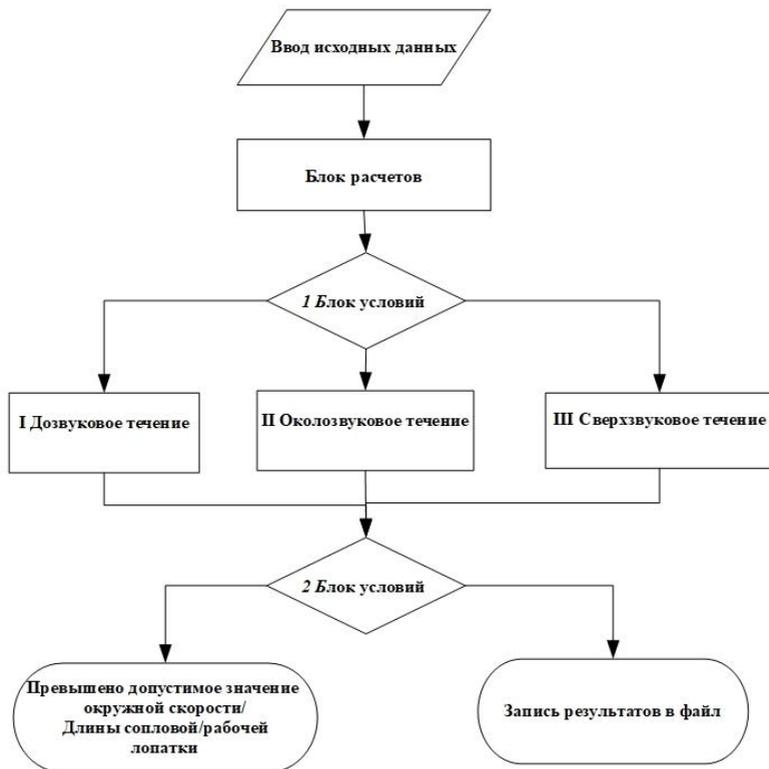


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета радиальной одноступенчатой паровой микротурбины

Кроме того в качестве исходных данных можно задать желаемую конфигурацию рабочего колеса турбины: с одним или двумя потоками рабочего тела и оценить их влияние на относительный внутренний КПД турбины.

После ввода исходных данных последовательно вычисляются: ориентировочный расход рабочего тела при начальном приближении внутреннего относительного КПД ступени $\eta_{oi} = 0,75$; процесс расширения рабочего тела в сопловой решетке, при коэффициенте скорости сопловой решетки $\varphi = 0,98$; векторы входного треугольника скорости (в том числе, на данном этапе задаются диапазоны значений u , d , α_1);

геометрические характеристики сопловой решетки и длины рабочей лопатки на входе в рабочее колесо, в зависимости от значения отношения давлений в сопловой решетке (1 Блок условий)

$$\varepsilon = \frac{P_1}{P_0}$$

при $\varepsilon > \varepsilon_{кр}$ течение в сопловой решетке носит дозвуковой характер, расчет пойдет по ветке I (рис. 2); при $0,35(\varepsilon_{кр}) \leq \varepsilon < \varepsilon_{кр}$ – дозвуковой поток с отклонением потока пара в косом срезе на угол $\alpha_1 + \delta$ (II); при $\varepsilon \leq 0,35(\varepsilon_{кр})$ – сверхзвуковой поток, суживающиеся каналы (III); процесс расширения пара в рабочей решетке, если степень реактивности $p = 0$, то тепलोперепад в рабочей решетке тоже равен нулю, турбина активного типа; векторы выходного треугольника скорости при коэффициенте скорости центростремительного рабочего колеса $\psi = 0,85$; геометрические размеры рабочей решетки при $\alpha_2 = 90^\circ$; относительный лопаточный КПД ступени; внутренний относительный КПД ступени и дополнительные потери.

Блок условий 2 включает логические неравенства из табл. 2.

Разработанный алгоритм реализован в программной среде «Python».

Метод поиска максимального внутреннего относительного КПД ступени с помощью программной среды «Python»

Метод поиска максимального внутреннего относительного КПД ступени с помощью программной среды «Python», включает в себя:

1. Ввод исходных данных. Исходные данные можно задавать диапазонами данными, например, в программе «Python» электрическая мощность ($N_{эл}$, кВт) обозначена «power_el» и задается диапазоном от 50 до 500 кВт с шагом в 50,

$$\text{power_el} = [i \text{ for } i \text{ in range}(50, 500, 50)] ,$$

что соответствует,

$$N_{эл} = \{50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500\}, \text{ число значений в диапазоне } j = 10;$$

2. Запуск программы расчета радиальной паровой турбины. В связи с тем, что исходные данные и оптимизируемые параметры (табл. 1) заданы диапазонами, на выходе, получается, не менее 5760 наборов значений, при этом количество этих наборов увеличивается в j раз в зависимости от введенных исходных данных. Для хранения и обработки такого массива данных используются функции «dict» – словари.



3. Запись результатов в файл CSV- формата. В файл записываются только те наборы значений, которые прошли проверку на допустимую окружную скорость, и длины сопловых и рабочих лопаток. На данном этапе уже можно определить наборы, в которых η_{oi} (eff_in) принимает максимальное значение (max_eff_in) , с помощью:

```

max_eff_in = 0
for x in result:
    key_exists = 'eff_in' in x
    if key_exists and (x['eff_in'] >= max_eff_in):
        max_eff_in = x['eff_in'],

```

но для анализа влияния одних переменных на другие в CSV-файл запишем все результаты, где $\eta_{oi} > 60\%$.

4. Анализ полученных данных.

Результаты расчета радиальной одноступенчатой паровой микротурбины

Получено, что для радиальной одноступенчатой паровой микротурбины электрической мощностью 100 кВт, использующей в качестве рабочего тела воду, для диапазона давлений пара перед турбиной, $p_0 = 1 - 15$ МПа, максимальное значение $\eta_{oi} = 0,8434$ внутреннего относительного КПД двухпоточной ступени активного типа достигается при $u = 0,48$; $d = 0,3$; $\alpha_1 = 12^\circ$; $p_0 = 1$ МПа; $t_0 = 200^\circ\text{C}$, при этом максимальный относительный лопаточный КПД ступени равен $\eta_{o.l.} = 0,892$ вне зависимости от начальных параметров рабочего тела перед турбиной.

Если использовать в качестве рабочего тела R245fa, то диапазон возможных рабочих давлений сократится до $p_0 = 0 - 3$ МПа, в связи с тем, что существует опасность самовоспламенения рабочего тела, которое происходит при температуре $t = 417^\circ\text{C}$, при этом было выявлено, что в данном диапазоне максимальное значение $\eta_{oi} = 0,8672$ внутреннего относительного КПД двухпоточной ступени активного типа достигается при $u = 0,48$; $d = 0,3$; $\alpha_1 = 12^\circ$; $p_0 = 1$ МПа; $t_0 = 109,75^\circ\text{C}$.

Для обеспечения одинаковой мощности $N = 100$ кВт и при одиночном значении давления рабочего тела перед турбиной $p_0 = 1$ МПа располагаемый теплоперепад $H_0 = 400,568$ кДж/кг для воды в девять раз больше располагаемого теплоперепада R245fa $H_0 = 46,31$ кДж/кг, сле-



довательно низкий располагаемый теплоперепад R245fa компенсируется увеличением массового расхода рабочего до $G = 1,578$ кг/с, что примерно в 9 раз больше, чем требуемый расход воды $G = 0,882$ для обеспечения заданной мощности.

Выводы

Выявлена потребность рынка в микротурбинах для энергетических комплексов по переработке отходов. При этом при малых мощностях возрастает целесообразность применения турбин с радиальным подводом пара, которые при низкой мощности имеют более простую конструкцию и более высокий КПД по сравнению с осевыми турбинами.

Разработана программа расчета радиальной одноступенчатой микротурбины в программной среде «Python», которая отличается тем, что в качестве рабочего тела можно задать любое термодинамически эффективное рабочее тело.

Микротурбины на органическом паре обеспечивают высокую эффективность в диапазоне малых мощностей, но требуют повышенных требований безопасности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00620.

Библиографический список

1. Государственная программа РФ «Охрана окружающей среды на 2012-2020 годы» [Электронный ресурс]. URL: https://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/3ac/Gosprogramma_OOS.pdf (дата обращения 20.10.2020).
2. **Паршуков В.И., Рыжков А.В.** Энерготехнологические комплексы для автономного энергоснабжения на основе технологий переработки отходов // Энергосбережение. 2019. № 5. С. 50-53. [eLIBRARY ID: [39241787](#)]
3. Успешный пуск энерготехнологического комплекса по переработке сельскохозяйственных отходов [Сайт] URL: <http://don-tech.ru/novosti/pusk-etk-selhoz.html> (дата обращения 20.10.2020).
4. Паротурбинные установки с органическими рабочими телами / М.М. Гриштуин, А.П. Севастьянов, Л.И. Селезнев, Е.Д. Федорович. М.: Машиностроение, 1988. 219 с.
5. Турбины тепловых и атомных электрических станции / А.Д. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 488 с.
6. **Щегляев А.В.** Паровые турбины: В 2 кн. // 6-е изд. перераб. доп. и подгот. к печати Б.М. Трояновским. Кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1993. 384 с.
7. **Трухний А.Д.** Стационарные паровые турбины // 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990. 640 с.



8. **Слободянюк Л.И., Поляков В.И.** Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация. Л.: Судостроение, 1983. 360 с.

9. **Митрохин В.Т.** Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переменных режимах. М.: Машиностроение, 1974. 228 с.

10. **Розенберг Г.Ш.** Судовые центростремительные газовые турбины. Л.: Судостроение, 1964. 256 с.

11. **Шерстюк А.Н., Зарякин А.Е.** Радиально-осевые турбины малой мощности. М.: Машиностроение, 1976. 208 с.

12. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp / I.H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, V. Lemort // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014. Vol. 53(6). P. 2498-2508. DOI: [10.1021/ie4033999](https://doi.org/10.1021/ie4033999).



OPTIMIZATION CALCULATION OF RADIAL MICROTURBINE WITH WATER OR PENTANFTORPROPANE STEAM IN THE PYTHON ENVIRONMENT

V.S. Pashchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk

Abstract. The paper presents the algorithm of optimization calculation of radial microturbine with water or pentanftorpropane steam in the Python environment which allows to solve the problem of thermodynamic characteristics determination when the internal relative efficiency of the turbine is at its maximum. It has described the search method of the maximum internal relative efficiency of the stage using Python environment. The calculation results for the 100 kW microturbine have been presented.

Keywords: radial steam turbine, flow path, optimization, micro-energy complex



УДК 621.315

НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Д-р техн. наук, проф. **Серебряков А.С.**

Канд. техн. наук, доц. **Осокин В.Л.**

Канд. техн. наук, доц. **Семенов Д.А.**

Канд. техн. наук, доц. **Дулепов Д.Е.**

*Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет, г. Княгинино*

***Аннотация.** Описываемое в статье устройство предназначено для профилактических испытаний и диагностики неоднородной высоковольтной изоляции электрических машин, силовых масляных трансформаторов и кабелей с бумажно-масляной изоляцией, в частности для интегральной оценки старения высоковольтной изоляции, ее увлажнения и оставшегося ресурса работы на основании измерения напряжения саморазряда и возвратного напряжения.*

***Ключевые слова:** заряд абсорбции, коэффициент абсорбции, напряжение саморазряда, возвратное напряжение, оставшийся ресурс изоляции, высоковольтная изоляция.*

Для безаварийной работы электрооборудования его изоляция должна быть надежной. В процессе эксплуатации происходит старение электрической изоляции, свойства ее ухудшаются, и электрическая прочность снижается. Чтобы избежать внезапных пробоев изоляции и поддерживать необходимую степень надежности работы электрооборудования, состояние изоляции необходимо периодически контролировать.

Особенно остро встает вопрос контроля состояния изоляции в связи с быстрым ростом доли электрооборудования, выработавшего свой нормативный срок. В этом случае требуется определение оставшегося ресурса изоляции для обоснованного продления срока службы электрооборудования. Как показала практика, оставшийся ресурс электрооборудования можно и целесообразно определять не по отработанному сроку, а по реальному техническому состоянию его изоляции на основании проведенных измерений. Ниже показано как это можно делать.

Цель работы – разработка новых технических средств для объективного контроля состояния неоднородной высоковольтной изоляции



и определения ее оставшегося ресурса с использованием явления абсорбции.

Материалы и методы

Разработанное и описываемое в статье устройство предназначено для профилактических испытаний и диагностики высоковольтной изоляции электрических машин, силовых масляных трансформаторов и кабелей с бумажно-масляной изоляцией, в частности для интегральной оценки старения высоковольтной изоляции, ее увлажнения и оставшегося ресурса работы на основании измерения напряжения саморазряда и возвратного напряжения.

Наиболее объективно оценить качество изоляции, степень ее старения и оставшийся ресурс ее работы можно путем измерения параметров, обусловленных внутренним поглощенным зарядом в неоднородной изоляции, какой является изоляция высоковольтных электрических машин, масляных трансформаторов и высоковольтных бумажно-масляных кабелей [1–4].

Известно, что для создания эффективных неразрушающих методов тестового контроля состояния главной изоляции высоковольтного силового электрооборудования используется явления абсорбции, т.е. явление накопления заряда внутреннего поглощения. О состоянии изоляции и степени ее старения можно судить по току утечки и по току абсорбции, а также и по коэффициенту абсорбции, который определяют, как отношение одностороннего значения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению ее.

Коэффициент абсорбции (или индекс поляризации в США) дают объективную оценку состояния изоляции, так как учитывают заряд абсорбции, поглощенный в системе изоляции. Однако контроль заряда абсорбции по току абсорбции неудобен тем, что ток абсорбции мал и промышленные помехи сильно искажают его. Поэтому удобнее пользоваться другими методами обнаружения явления абсорбции. Так, например, на практике можно применить метод измерения напряжения саморазряда и возвратного напряжения [1, 4].

Напряжение саморазряда измеряют на объекте испытания после его зарядки от источника постоянного напряжения и отключения его от этого источника. При этом электрическая емкость изоляции с течением времени разряжается на его внутреннее сопротивление. На рис. 1 показаны зависимости напряжения саморазряда u_C от времени для распределительного трансформатора мощностью 1000 кВ·А с разными сроками эксплуатации. Напряжение источника питания 2500 В. Каж-



дая кривая представляет собой сумму затухающих экспонент с одинаковыми знаками и разными постоянными времени. В [3] показано, что наиболее информативным является напряжение саморазряда, измеренное на 15-й секунде после начала измерения. Его обозначают u_{C15} и используют в качестве оценки старения и состояния изоляции. Зависимость u_{C15} от времени эксплуатации изменяется практически по линейному закону, уменьшаясь в среднем на 30 В за один год. К концу срока эксплуатации скорость уменьшения напряжения саморазряда несколько снижается. Зависимость напряжения саморазряда u_{C15} , измеренного на 15-й секунде от времени эксплуатации трансформатора τ можно выразить уравнением прямой линии: $u_{C15} = 1000 - 30 \tau$. Здесь τ – время эксплуатации, годы.

Израсходованный ресурс времени

$$\tau = \frac{1000 - u_{C15}}{30}.$$

Оставшийся ресурс:

$$\tau_0 = \tau_{\text{НОРМ}} - \tau = \frac{1000}{30} - \frac{1000 - u_{C15}}{30} = \frac{u_{C15}}{30},$$

где $\tau_{\text{НОРМ}} = \frac{1000}{30}$ – нормативный ресурс изоляции.

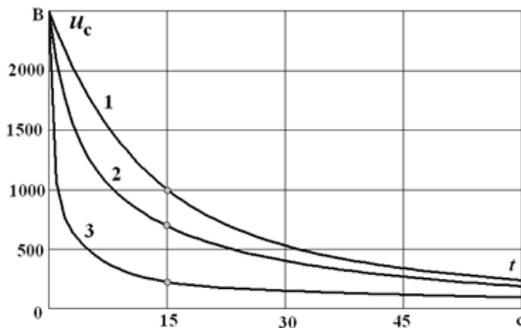


Рис. 1. Зависимости напряжения саморазряда от времени для распределительного трансформатора с разными сроками эксплуатации:

1 – новый трансформатор при вводе в эксплуатацию; 2 – после 10 лет эксплуатации; 3 – после 28 лет эксплуатации

В качестве оценки состояния изоляции наряду с напряжением саморазряда используют также и возвратное напряжение (рис. 2). Его измеряют после отключения заряженной изоляции от источника питания и кратковременного разряда на землю. При этом после кратковременного разряда заряд геометрической емкости изоляции становится равным нулю, а заряд внутреннего поглощения, или заряд абсорбции, разрядиться за короткое время не успевает и за счет его на выводах изоляции образуется возвратное напряжение u_B . Возвратное напряжение представляет собой сумму экспонент с разными постоянными времени и с разными знаками. Поэтому кривая возвратного напряжения имеет максимум. В [3] рекомендуется в качестве оценки старения и состояния изоляции использовать значение возвратного напряжения u_{B30} , измеренное на 30-й секунде после начала измерения.

В качестве оценки старения и состояния изоляции можно использовать показатель P , определяемый в соответствии с рис. 2 по следующей формуле [3]: $P = U_{\text{МАКС}} \cdot t_{\text{МАКС}}$.

Как показала практика, по мере старения изоляции изменяется как само максимальное значение возвратного напряжения $U_{\text{МАКС}}$, так и момент времени его наступления $t_{\text{МАКС}}$. У распределительных трансформаторов показатель P пропорционален оставшемуся ресурсу. У новой изоляции для распределительных трансформаторов он равен 6000 В·с. У трансформаторов, выработавших свой ресурс, он стремится к нулю, уменьшаясь в среднем на 200 В·с за один год.

Оставшийся ресурс τ_0 определяют по формуле [6]:

$$\tau_0 = \frac{P}{200} = \frac{U_{\text{МАКС}} \cdot t_{\text{МАКС}}}{200}.$$

Трансформаторы, у которых $P = U_{\text{МАКС}} \cdot t_{\text{МАКС}}$ меньше 300 В·с следует считать изношенными по изоляции более чем на 90% и при возможности заменять их новыми трансформаторами.

В зарубежной практике для оценки состояния бумажно-масляной изоляции кабелей по возвратному напряжению пользуются следующим соотношением существенных параметров формы возвратного напряжения, которое называют p -параметром (рис. 3):

$$p = \frac{U_{B,\text{МАКС}}}{s \cdot t_{\text{МАКС}}} = \frac{t'}{t_{\text{МАКС}}},$$

где $U_{B,\text{МАКС}}$ – максимальное значение возвратного напряжения; $t_{\text{МАКС}}$ – время, при котором наблюдается максимум возвратного напряжения;



s – начальный фронт кривой возвратного напряжения; t' – время, при котором прямая, проведенная под углом начального фронта s кривой возвратного напряжения, достигнет значения максимального возвратного напряжения $U_{\text{ВМАКС}}$. Коэффициент p увеличивается при увлажнении и старении изоляции. Эта тенденция наблюдается у кабелей с бумажно-масляной изоляцией и силовых масляных трансформаторов [8].

Итак, о старении изоляции без ее разрушения, как показали исследования, можно судить по характеру процессов поляризации. На основании измерения описанных выше параметров делается заключение о состоянии изоляции и ее оставшемся ресурсе.

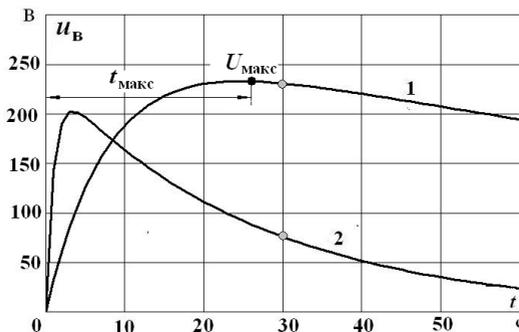


Рис. 2. Зависимости возвратного напряжения от времени для распределительного трансформатора с разными сроками эксплуатации:

1 – новый трансформатор при вводе в эксплуатацию; 2 – после 28 лет эксплуатации

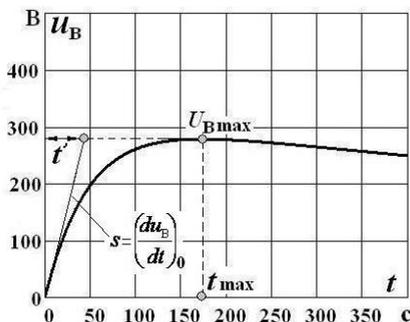


Рис. 3. Зависимость возвратного напряжения от времени для кабеля с бумажно-масляной изоляцией

Структурная схема предлагаемого устройства для контроля качества электрической изоляции представлена на рис. 4 [5, 7]. Устройство содержит источник испытательного напряжения 1, эталонный резистор 2, зарядный ключ 3, разрядный ключ 4, разрядный резистор 5, первый масштабный преобразователь напряжения 6, испытуемый объект 7, размыкающий блок-контакт 8 зарядного ключа, замыкающий блок-контакт 9 зарядного ключа, замыкающий блок-контакт 10 разрядного ключа, двухканальный цифровой измеритель с запоминающим устройством 11, устройство отображения информации 12, дифференцирующий элемент 13, нуль-компаратор 14, световой индикатор 15, первый пиковый детектор 16, второй пиковый детектор 17, счетчик времени 18, первый блок умножения напряжений 19, второй масштабный преобразователь 20, первый цифровой индикатор 21, блок управления 22 с выходами «Заряд», «Разряд», «Пуск» и «Установка нуля», генератор тактовых импульсов 23, органы управления 24 двухканальным цифровым измерителем с запоминающим устройством, второй блок умножения напряжений 25, блок деления напряжений 26, второй цифровой индикатор 27, первый 28 и второй 29 выходные выводы устройства. Первый информационный вход двухканального цифрового измерителя 11 через размыкающий блок-контакт 8 зарядного ключа и замыкающий блок-контакт 10 разрядного ключа соединен с выходом первого масштабного преобразователя напряжения 6. Второй информационный вход двухканального цифрового измерителя 11 через замыкающий блок-контакт 9 зарядного ключа соединен с вторым выходом источника испытательного напряжения. Первый выходной вывод 28 устройства соединен через зарядный ключ 3 с первым выводом источника испытательного напряжения 1. Второй выходной вывод устройства заземлен.

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии на выходе блока управления 22 формируются сигналы, в соответствии с которыми ключ 4 замкнут, а ключ 3 разомкнут и электрические емкости объекта испытания 7 разряжаются через разрядный резистор 5, имеющий малое сопротивление. После разряда конденсаторов объекта измерения 7 в течение одной минуты в соответствии с правилами устройства электроустановок блок управления 22 подает сигнал сначала на размыкание ключа 4 и затем на замыкание ключа 3.

При указанном положении ключей 3 и 4 начинается процесс заряда изоляции объекта испытания 7. Блок-контакт 9 при этом замкнут и на второй информационный вход двухканального цифрового изме-



рителя с запоминающим устройством 11 подается напряжение, пропорциональное току утечки объекта испытания 7. Сигнал с выхода «Пуск» блока управления 22 запускает генератор тактовых импульсов 23. Сигналы с выхода генератора тактовых импульсов с частотой 1 с поступают на первый управляющий вход двухканального цифрового измерителя 11 с запоминающим устройством и значения напряжения, пропорциональные току утечки, через каждую секунду (или через 5 с.) сохраняются в запоминающем устройстве измерителя 11.

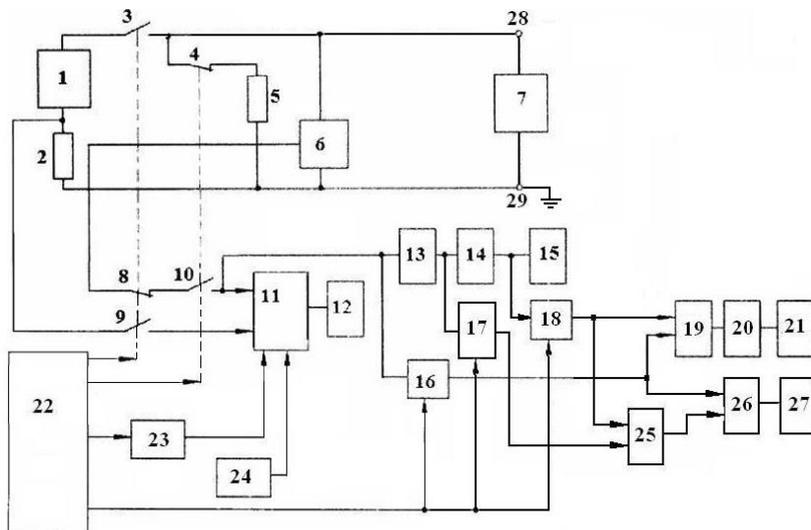


Рис. 4. Структурная схема устройства для контроля качества электрической изоляции

Через одну минуту после начала процесса заряда изоляции зарядный ключ 3 отключается. При этом блок-контакт 9 размыкается, а блок-контакт 8 замыкается и напряжение, пропорциональное напряжению саморазряда объекта измерения, подается на второй информационный вход двухканального цифрового измерителя 11 с запоминающего устройства. Это напряжение через каждую секунду в течение одной минуты запоминается запоминающим устройством измерителя 11. По окончании процесса саморазряда ключ 3 снова замыкается на одну минуту, в течение которой изоляция вновь заряжается, пополняя внутренний поглощенный заряд, израсходованный в период саморазряда испытуемой изоляции.

После одной минуты дозаряда изоляции и отключения зарядного ключа 3 разрядный ключ 4 замыкается на короткое время Δt , взятое нами равное 5 с, в течение которого геометрическая емкость объекта испытания 7 полностью разряжается через резистор 5 до нуля, а емкость, обусловленная внутренним поглощенным зарядом, остается практически неразряженной, так как заряд внутреннего поглощения не может изменяться «мгновенно», в данном случае за короткий отрезок времени $\Delta t = 5$ с. Спустя время Δt разрядный ключ 4 размыкается. Зарядный ключ 3 остается разомкнутым. Начинается процесс измерения возвратного напряжения, которое образуется за счет заряда геометрической емкости зарядом внутреннего поглощения. Напряжение с выхода первого масштабного преобразователя 6, пропорциональное возвратному напряжению, при этом подается через замкнутые блок-контакты 8 и 10 на второй информационный вход двухканального цифрового измерителя с запоминающим устройством 11, которое запоминает измеряемое возвратное напряжение через каждую секунду в течение одной минуты. В начале этого измерения сигналом «Установка нуля» на выходе блока управления 22 обнуляются пиковые детекторы 16 и 17 и запускается с нуля счетчик времени 18.

Значение максимального возвратного напряжения фиксируется первым пиковым детектором 16. Начальная крутизна s возвратного напряжения (максимальное значение производной возвратного напряжения в начальный момент времени на выходе блока дифференцирования 13) запоминается вторым пиковым детектором 17. Когда возвратное напряжение достигнет максимума, первая производная его становится равной нулю и на выходе дифференцирующего элемента 13 сигнал также становится равным нулю, нуль-компаратор 14 срабатывает и останавливает счетчик времени 18, о чем сигнализирует световой индикатор 15. На выходе счетчика времени 18 сохраняется сигнал, пропорциональный измеренному времени t_{MAX} , при котором наступает максимум возвратного напряжения U_{MAX} .

Первый блок умножения 19 перемножает значения U_{MAX} и t_{MAX} и выдает с учетом второго масштабного преобразователя 20 на экране цифрового индикатора 21 значение оставшегося ресурса работы P изоляции. На практике удобно пользоваться относительным оставшимся сроком службы изоляции, оценивая его по отношению к сроку службы новой изоляции, измеренному при вводе высоковольтного электрооборудования в эксплуатацию. Второй блок умножения 25 перемножает значения s и t_{MAX} . Сигналы с выходов блоков 16 и 25 подаются на вхо-

ды блока 26 деления напряжений. Сигнал с выхода блока деления напряжений 26 подается на вход второго блока индикации 27 и на экране второго цифрового индикатора 27 выводится значение параметра

$$p = \frac{U_{\text{МАКС}}}{s \cdot t_{\text{МАКС}}}.$$

После этого устройство выключается.

Технико-экономический эффект от предложенного устройства определяется повышением эксплуатационной надежности высоковольтного испытуемого электрооборудования за счет более объективной оценки состояния электрической изоляции и оценки оставшегося ресурса работы.

Выводы по работе

1. Рассмотрены различные физические величины, связанные с явлением абсорбции, и их использование в качестве оценок состояния неоднородной высоковольтной изоляции.

2. Разработано устройство для объективного контроля состояния неоднородной высоковольтной изоляции и определения ее оставшегося ресурса с использованием оценок состояния изоляции, основанных на явлении абсорбции.

Библиографический список

1. **Серебряков А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: уч. пос. М.: Маршрут, 2005. 280 с. [eLIBRARY ID: [21326003](#)]

2. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов: уч. пос. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.

3. **Серебряков А.С.** Трансформаторы: уч. пос. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. 360 с.

4. **Серебряков А.С.** Диагностика главной изоляции электродвигателей тягового подвижного состава российских железных дорог: монография. М.: МИИТ, 2014. 275 с.

5. Пат. РФ [RU 2523075 C2](#) Рос. Федерация G01R 27/18. Устройство контроля качества электрической изоляции / А.С. Серебряков, Д.А. Семенов; заявитель и патентообладатель Нижегород. инженерно-эконом. ин-т. № 2012122288/28; заявл. 29.05.2012; опубл. 20.07.2014, бюл. № 20. [eLIBRARY ID: [37801770](#)]

6. Св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ № [2013617538](#). Программа расчета остаточного ресурса изоляции трансформаторов (PROSTAREISIS-1) / А.С. Се-



ребряков, Д.А. Семенов: правообл. Правообладатель: Нижегородский гос. инж.-эк. инст. Дата публикации: 20.09.2013.

7. Пат. РФ [RU 2730535 C1](#) Рос. Федерация G01R 27/18; G01R 31/14, Устройство для контроля качества электрической изоляции / А.С. Серебряков, В.Л. Осокин, Д.А. Семенов; заявитель и патентообладатель Нижегород. инженерно-эконом. ин-т. № 2020104251, заявл. 30.01.2020; опубл. 24.08.2020, бюл. № 24. [eLIBRARY ID: [43916513](#)]

8. Development of the p-factor in an accelerated ageing experiment of the MV PILC cables / C. Weindl, I. Mladenovic, T. Scharrer, R. Patsch // 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Potsdam: IEEE, 2010. P. 11525117. DOI: [10.1109/ICSD.2010.5568071](#).

9. **Menzel J., Patsch R., Kamenka D.** Measurement of the dielectric properties of paper-oil cables and the cellulose-oil insulation system of power transformers // 2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Harbin: IEEE, 2009. P. 1020-1025. DOI: [10.1109/ICPADM.2009.5252441](#).

10. Algorithm for Determining the State of Impregnated Paper Insulation of High-Voltage Cables / A. Sidorova, D. Semenov, A. Cheremukhin, T. Astakhova // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20(4). P. 20190002. DOI: [10.1515/ijeeps-2019-0002](#). [eLIBRARY ID: [41612409](#)]

11. Examination of State of the Cable Insulation by the Return Voltage / D. Semenov, A. Sidorova, P. Romanov, and A. Kuvshinov // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2018. Vol. 19(6). P. 20180167. DOI: [10.1515/ijeeps-2018-0167](#). [eLIBRARY ID: [38619677](#)]



DEVICE FOR QUALITY CONTROL OF HIGH VOLTAGE ELECTRICAL ISOLATION

A.S. Serebryakov, V.L. Osokin, D.A. Semyonov and D.E. Dulepov

Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino

Abstract. The article examines different physical values that are connected with the absorption phenomenon and their use for condition assessment of non-uniform high voltage isolation. The device has been developed for condition monitoring of non-uniform high voltage isolation and determination of its remaining lifespan using isolation condition evaluation based on absorption phenomenon.

Keywords: charge of absorption, absorption coefficient, self-discharge voltage, return voltage, remaining isolation lifespan, high voltage isolation.



УДК 62-791.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФРАКРАСНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ПОДШИПНИКОВ ВНУТРИ ГЕРМООБЪЕМА АЭС

Студент **Харайн М.П.**Студент **Костарев В.С.**Ст. преп. **Акифьева Н.Н.**Аспирант **Южакова А.А.**Д-р техн. наук, проф. **Жукова Л.В.**Д-р техн. наук, проф. **Корсаков А.С.**

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация. В данной работе рассматривается возможность использования гибких инфракрасных (ИК) световодов, изготовленных на основе радиационно стойких кристаллов систем $\text{AgBr} - \text{TI}$ и $\text{AgBr} - \text{PbI}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ для бесконтактного измерения температуры подшипников механизмов собственных нужд и передачи сигнала температуры из гермообъема АЭС. Радиационная устойчивость позволяет использовать данные кристаллы и световоды в условиях сильного ионизирующего излучения до 500 кГр, что открывает широкие возможности внедрения таких оптических материалов в атомную энергетику. Класс представленных материалов выделяется широким диапазоном пропускания в диапазоне от 0,4 до 60,0 мкм для кристаллов и от 2,0 до 25,0 мкм для световодов без окон поглощения, малыми оптическими потерями (до 0,1 дБ/м), высокой гибкостью. Световоды, предлагаемые в работе, изготовлены методом экструзии из монокристаллов галогенидов серебра и таллия и прозрачны в среднем инфракрасном диапазоне от 2,0 до 25,0 мкм, что по законам Планка и Вина соответствует температурам от +1100°C до -200°C, соответственно.

Ключевые слова: инфракрасные световоды, галогениды серебра, галогениды таллия, бесконтактное измерение температуры, передача сигнала температуры из гермообъема АЭС.

Введение

На сегодняшний день в тепловой и атомной энергетике для контроля температуры подшипников механизмов собственных нужд (МСН) используются термометры сопротивления, действие которых



основано на зависимости электрического сопротивления металлов от температуры. Для изготовления чувствительных элементов стандартных термометров сопротивления применяется платина и медь. Из них только платина обладает приемлемой стойкостью к окислению, что определяет достаточный ресурс использования, в связи с чем платиновые термометры сопротивления нашли широкое применение в тепловой энергетике, в том числе и для измерения температуры подшипников МСН.

Однако, в атомной энергетике применение платины в качестве материала чувствительных элементов термометров сопротивления, устанавливаемых в гермообъеме АЭС, имеет ряд сложностей, связанных с ее активацией в гамма- и нейтронных полях, которая приводит к изменению температурных характеристик этого материала.

Для измерений температуры оборудования, установленного в гермообъеме, в перспективе может быть полезным применение метода дистанционной передачи сигнала температуры в виде инфракрасного излучения от контролируемого элемента при помощи инфракрасных световодов.

В настоящей работе была проведена оценка возможности использования гибких инфракрасных световодов, изготовленных из радиационно стойких кристаллических систем $\text{AgBr} - \text{TiI}$ и $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$, для передачи сигнала температуры от подшипников механизмов собственных нужд из гермообъема АЭС.

Описание световодов

Применение ИК-световодов в волоконных датчиках температуры позволяет получить ряд преимуществ перед существующими методами и устройствами контроля, а именно:

- в сравнении с термоэлектрическим методом позволяет бесконтактно измерять температуру в условиях электромагнитных помех;
- в сравнении с терморезистивным методом является безынерционным, а также снимает проблему влияния температурной зависимости сопротивления линий связи на точность измерения температуры;
- в сравнении с кварцевыми волоконными датчиками осуществляет прямое измерение в диапазоне температур от -20 до $+300^\circ\text{C}$ за счет непосредственной передачи инфракрасного излучения от его источников к приемнику;
- позволяет избежать работы активируемых чувствительных элементов в условиях гамма- и нейтронных полей гермообъема АЭС.



В данной работе с целью применения в гермообъеме АЭС рассматриваются гибкие инфракрасные световоды, изготовленные научной лабораторией «Волоконные технологии и фотоника» при Химико-технологическом институте УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

Для среднего и дальнего инфракрасного диапазона существует ограниченное количество прозрачных, обладающих малыми оптическими потерями материалов. В частности, это стекла на основе халькогенидов, теллуридов, фторидов, а также кристаллы галогенидов серебра и одновалентного таллия.

Среди галогенидных материалов выделяются кристаллические системы $\text{AgBr} - \text{TI}$ и $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$, поскольку кристаллы и волокна, изготовленные на их основе, являются фото- и радиационно стойкими, обладают прочностью и гибкостью на разрыв до 250 МПа, критический радиус изгиба волокон зависит от диаметра световода и достигает 1 мм [1].

Фотостойкость обеспечивает использование данных материалов без специальной оболочки. Радиационная устойчивость позволяет использовать кристаллы и световоды в условиях сильного ионизирующего излучения до 500 кГр, что открывает широкие возможности внедрения таких оптических материалов в атомную энергетику, радиационную физику, космические технологии [2].

Исследования радиационной стойкости проводились при β -облучении волокон дозами до 500 кГр. В результате исследования существенное падение пропускания не наблюдалось, при высоком содержании таллия и йода в кристаллах было обнаружено увеличение их пропускания до 5%.

Световоды, предлагаемые в работе, прозрачны в среднем инфракрасном диапазоне от 2 до 25 мкм, что по законам Планка и Вина соответствует температурам от -200 до +1100°C, соответственно (рис. 1). Данный температурный диапазон и перечисленные выше свойства позволяют использовать инфракрасные световоды в качестве волоконных каналов доставки оптического сигнала из труднодоступных мест за счет широкого спектрального диапазона передачи, гибкости и механической прочности, в частности, и для передачи сигнала температуры подшипников МСН из гермообъема АЭС.

Применение ИК-световодов в атомной энергетике

Свойства ИК волоконных световодов открывают перспективы применения ИК-световодов систем $\text{AgBr} - \text{TI}$ и $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ в устройствах АЭС.



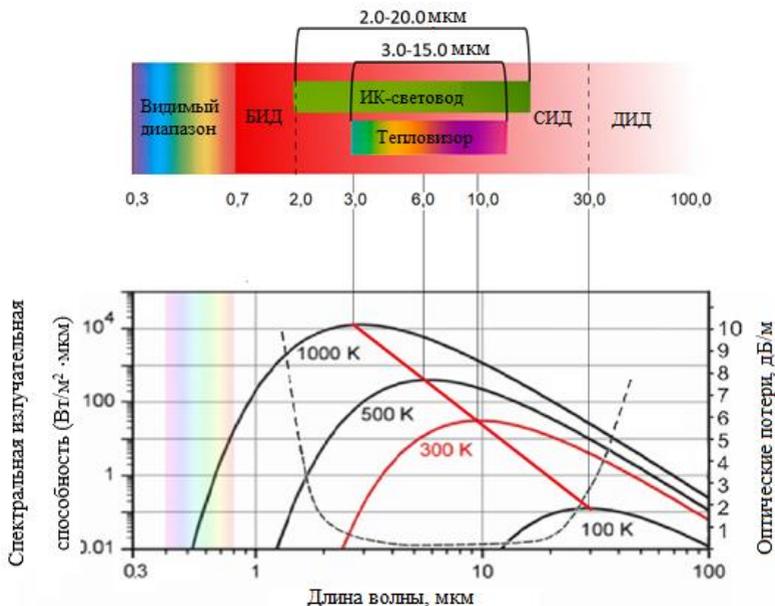


Рис. 1. Законы Планка и Вина для оптического диапазона.

Указаны рабочие области ИК-световодов и тепловизоров: БИД – ближний инфракрасный диапазон; СИД – средний инфракрасный диапазон; ДИД – дальний инфракрасный диапазон

В связи с этим была рассмотрена возможность внедрения световодов в системы наружных измерений температуры оборудования, установленного в гермообъеме АЭС с реактором ВВЭР, а именно, для контроля температур подшипников механизмов собственных нужд (рис. 2). Оптическая схема измерения температуры показана на рис. 3.

Прокладка световода во внутреннюю часть гермооболочки осуществляется через гермоввод (точка 1). Далее, учитывая пропорции гермооболочки и высотность отметок, определяется оптимальный путь прокладки световода до измеряемой поверхности подшипников МСН (точка 4). Так как трассировка кабелей импульсных линий и прочих устройств контрольно-измерительных приборов и автоматики из гермообъема в обслуживаемую зону зависит от компоновки оборудования, то она является неизменяемым фактором и предполагает многократные изгибы. Компоновка оборудования определяется компактностью расположения оборудования.

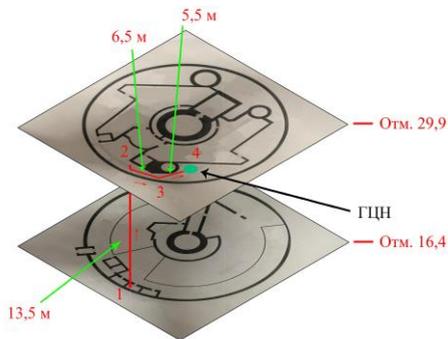


Рис. 2. Путь прокладки ИК-световода к подшипникам МСН

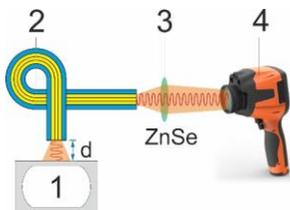


Рис. 3. Общая схема измерения температуры объекта термографическим методом:

1 – источник ИК-излучения (подшипник); 2 – ИК-световод; 3 – ZnSe-линза;
4 – тепловизор

Путем приблизительных расчетов, опираясь на доступные данные, определяется длина световода. Так путь прокладки световода, изображенный на рис. 3, предполагает требуемую длину участка световода, проходящего в гермообъеме – около 24 м.

При допускаемой длине световода до 50 м остается запас на доводку световода до вторичного прибора – приёмника сигнала температуры, в качестве которого может быть использована, например, тепловизионная камера. Количество изгибов световода при прокладке, подобной изображенной на рис. 3 может достигать 3 – 4, при этом лишь один изгиб на угол 90 градусов, остальные – на углы меньше 90 градусов. Радиусы изгиба принимались во много раз больше критического. При таком количестве изгибов оптические потери составляют около 27%, что является допустимым значением, обеспечивающим высокую точность измерений.

Заключение

Радиационная стойкость гибких инфракрасных световодов, изготовленных из кристаллических систем $\text{AgBr} - \text{Tl}$ и $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$, их допустимая длина, незначительность оптических потерь при малом количестве и большом радиусе изгибов, позволяет положительно оценить возможность их использования для передачи сигнала температуры поверхностей оборудования АЭС, в частности движущихся частей оборудования, установленного в гермообъеме АЭС.

К преимуществам применения инфракрасных световодов для измерения температур поверхностей оборудования, установленного в гермообъеме, относятся: безинерционность, наглядность, радиационная стойкость. Особо следует отметить, что использование этого метода позволяет избежать работы активируемых чувствительных элементов в условиях гамма- и нейтронных полей гермообъема АЭС.

В настоящее время многие вопросы применения метода измерения температуры и передачи сигнала температуры с помощью инфракрасных световодов, изготовленных из кристаллических систем $\text{AgBr} - \text{Tl}$ и $\text{AgBr} - \text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$, требуют углубленных исследований, в частности вопрос более простого, чем тепловизионная камера, вторичного устройства для приема сигнала температуры и передачи его в ПТК (программно-технический комплекс). В настоящее время эти вопросы исследуются в научной лаборатории «Волоконные технологии и фотоника» при Химико-технологическом институте УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

Библиографический список

1. Application of Infrared Polycrystalline Fibers in Thermal Imaging Temperature Control Systems / A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova, N.N. Akif'eva et al. // Sensors and Actuators A: Physical. 2020. Vol 314. P. 112237. DOI: [10.1016/j.sna.2020.112237](https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112237). [eLIBRARY ID: 45393463]
2. Crystals of $\text{AgBr-TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ system: Synthesis, Structure, Properties, and Application / D.D. Salimgareev, A.E. Lvov, E.A. Korsakova. et al. // Materials Today Communications. 2019. Vol 20(12). P. 100551. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2019.100551](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100551). [eLIBRARY ID: 41637955]
3. Stability of MIR Transmittance of Silver and Thallium Halide Optical Fibers in Ionizing β - and γ -Radiation from Nuclear Reactors / E.A. Korsakova, A.E. Lvov, D.D. Salimgareev et al. // Infrared Physics and Technology. 2018. Vol. 93. P. 171-177. DOI: [10.1016/j.infrared.2018.07.031](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.07.031). [eLIBRARY ID: 35788473]



4. **Гордов А. Н., Жагулло О. М., Иванова А. Г.** Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 303 с.

5. Feasibility Study of Transformer Winding Temperature and Strain Detection Based on Distributed Optical Fibre Sensors / Y. Liu, Y. Tian, X. Fan et al. // *Sensors*. 2018. Vol 18(11). P. 3932. DOI: [10.3390/s18113932](https://doi.org/10.3390/s18113932).

6. **Lavi Y., Millo A., Katzir A.** Flexible Ordered Bundles of Infrared Transmitting Silver-Halide Fibers: Design, Fabrication, and Optical Measurements // *Applied Optics*. 2006. Vol 45(23). P. 5808-5814. DOI: [10.1364/AO.45.005808](https://doi.org/10.1364/AO.45.005808).

7. Thick-Film Resistive Temperature Sensors / A. Dziedzic, L. Golonka, J. Kozlowski et al. // *Measurement Science and Technology*. 1999. Vol 8(1). P. 78-85. DOI: [10.1088/0957-0233/8/1/011](https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/1/011).

8. **Barker, M. Jones R.**, Inversion of Spectral Emission Measurements to Reconstruct the Temperature Profile Along a Blackbody Optical Fiber Thermometer // *Inverse Problems in Engineering*. 2003. Vol. 11(6). P. 495-513. DOI: [10.1080/1068276031000098009](https://doi.org/10.1080/1068276031000098009).

9. Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality / D. Perić, B. Livada, S. Perić, S. Vujić // *Sensors*. 2019. Vol. 19(15). P. 3313. DOI: [10.3390/s19153313](https://doi.org/10.3390/s19153313).

10. **Planck M.** The Theory of Heat Radiation. Philadelphia: Blakiston's Son & Co., 1914. 252 p.



USE OF INFRARED CRYSTAL FIBER IN BEARINGS TEMPERATURE SENSING SYSTEM INSIDE AN NPP CONTAINMENT

M.P. Kharaim, V.S. Kostarev, N.N. Akif'eva, A.A. Yuzhakova, L.V. Zhukova and A.S. Korsakov

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

Abstract. The flexible fiber made of crystal systems AgBr – TII and AgBr – TlBr_{0,46}I_{0,54} has radioresistance properties, can be produced with permissible length, characterized by low optical losses with a small number and large radius of curves. This allows to use it for transmission of temperature signal from the surface of NPP equipment, including moving parts installed in the containment of NPP. Implementation of this method allows to avoid the operation of activated sensing elements in conditions of gamma and neutron fields of NPP containment. The optical fiber, suggested in the paper, is produced by the method of extrusion from single-crystal of silver and thallium halides and transparent in the mid-infrared band from 2,0 to 25,0 μm which is equivalent to the temperature range of -200...+1100°C.

Keywords: infrared optical fiber, silver halide, thallium halide, non-contact temperature measurement, containment of NPP.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING



УДК 621.316.727

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТОХАСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УЗЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Канд. техн. наук, доц. **Влацкая Л.А.**Д-р пед. наук, канд. техн. наук, проф. **Семенова Н.Г.**
Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

Аннотация. В статье рассмотрена задача выбора оптимальной мощности компенсирующих устройств в узлах электрической сети по критерию минимальных потерь активной мощности. Решение задачи осуществлено такими стохастическими методами как: метод Монте-Карло и генетический алгоритм. Представлены: математическая модель оптимизационной задачи, разработанные алгоритмы и блок-схемы стохастических методов. Приведены результаты сравнительного анализа работы программ, реализованных на базе стохастических методов и метода полного перебора.

Ключевые слова: Выбор мощности компенсирующих устройств, метод полного перебора, метод Монте-Карло, генетический алгоритм

Выбор мощности компенсирующих устройств (КУ) в узлах электрической сети является задачей дискретного программирования, поскольку регулирование генерируемой КУ реактивной мощности осуществляется ступенчато [1]. Точное решение такой задачи можно найти за конечное число итераций, используя только метод полного перебора. Однако, когда множество допустимых решений состоит из очень большого числа вариантов (например, разветвленная электрическая сеть с большим числом узлов и широким диапазоном варьирования мощностей КУ) поиск решения методом полного перебора неэффективен, т.к. может затянуться на длительное время. Альтернативными методами решения являются стохастические методы, к которым, в том числе, относятся метод Монте-Карло и генетический алгоритм [2].

В соответствии с вышеизложенным, актуальной задачей для электрических сетей является разработка эффективных алгоритмов выбора мощности компенсирующих устройств.

Цель работы: программная реализация алгоритмов выбора мощности КУ в дискретных переменных для проведения вычислительных экспериментов (моделирования) с целью оценки их эффективности.



В статье представлен сравнительный анализ перечисленных методов на примере решения следующей оптимизационной задачи. Необходимо осуществить выбор мощности компенсирующих устройств по критерию минимальных потерь активной мощности:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i + P_{KV_i})^2 + (Q_i - Q_{KV_i})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

с учетом ограничения по реактивной мощности, подлежащей компенсации:

$$\sum_{i=1}^n Q_{KV_i} \leq Q_{K\Sigma}, \quad (2)$$

и дискретности изменения мощности КУ:

$$Q_{KV_i} \geq 0, \quad Q_{KV_i} - \text{дискретные значения}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где n – число узлов сети; P_i , Q_i – активная и реактивная нагрузки в i -ом узле; P_{KV_i} , Q_{KV_i} – активная и реактивная мощности КУ, размещенного в i -ом узле; U – напряжение сети; R_i – активное сопротивление i -ой линии; $Q_{K\Sigma}$ – суммарная реактивная мощность, подлежащая компенсации.

Кратко рассмотрим сущность каждого из методов для решения поставленной оптимизационной задачи.

Метод полного перебора (МПП) – единственный метод с доказуемой результативностью [3]. Заключается в формировании множества

$$Q_{KV} \{Q_{KV_1}^N, \dots, Q_{KV_n}^N\}$$

из всех N допустимых решений с учетом дискретности изменения мощности КУ и выполнения ограничения (2); последующей оценкой решения на каждой k -ой итерации

$$(\Delta P(Q_{KV}^k) < P)$$

и выбором наилучшего варианта (Q_{KV}) с минимальными потерями активной мощности, определенными по выражению (1).

Блок-схема алгоритма метода полного перебора представлена на рис. 1.



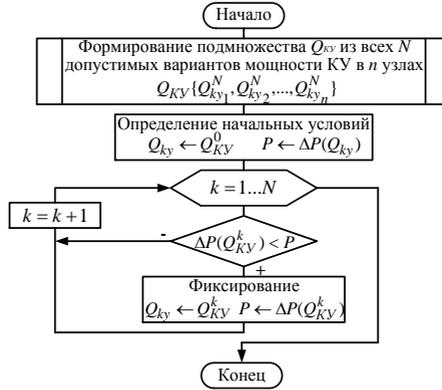


Рис. 1. Блок-схема алгоритма метода полного перебора

Метод Монте-Карло (ММК) – это ненаправленный случайный поиск оптимального решения [4]. Базируется на: генерации случайных чисел, посредством которой формируется конечное множество из N дискретных значений мощности КУ^А

$$Q_{KV} \{Q_{ky_1}^N, \dots, Q_{ky_n}^N\};$$

выборе допустимого подмножества с учетом ограничения (2) по суммарной устанавливаемой мощности КУ:

$$Q_K \{Q_{ky_1}^M, \dots, Q_{ky_n}^M\}, Q_K \subset Q_{KV};$$

фиксировании наилучшего варианта на k -ой итерации в зависимости от значения потерь активной мощности, определенных в соответствии с выражением (1)

$$\text{(если } \Delta P(Q_{KV}^k) < P, \text{ то } Q_{ky} \leftarrow Q_K^k, P \leftarrow \Delta P(Q_K^k)).$$

Более подробно процедуры алгоритма метода Монте-Карло описаны в работе [5].

Блок-схема алгоритма метода Монте-Карло приведена на рис. 2.

Генетический алгоритм (ГА) – целенаправленный стохастический метод поиска решения [6]. Алгоритм аналогичен естественной эволюции в природе и основывается на селекции, скрещивании, наследовании и мутации. Он реализуют «выживание сильнейших», что выражается в создании «потомков» поколений решений более приспособленных (оптимальных), чем «предки» (предыдущее поколение решений). Итерационный процесс поиска решения продолжается до тех пор, пока поколения не перестанут существенно отличаться друг от

друга, или не пройдет заданное количество поколений (эпох) или заданное время поиска. Подробно процедуры генетического алгоритма описаны в работе [7].

Блок схема генетического алгоритма представлена на рис. 3.

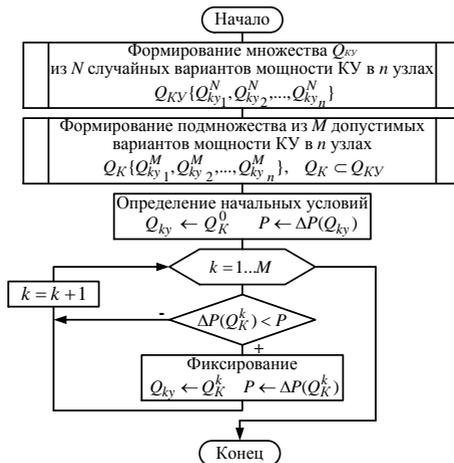


Рис. 2. Блок схема алгоритма метода Монте-Карло

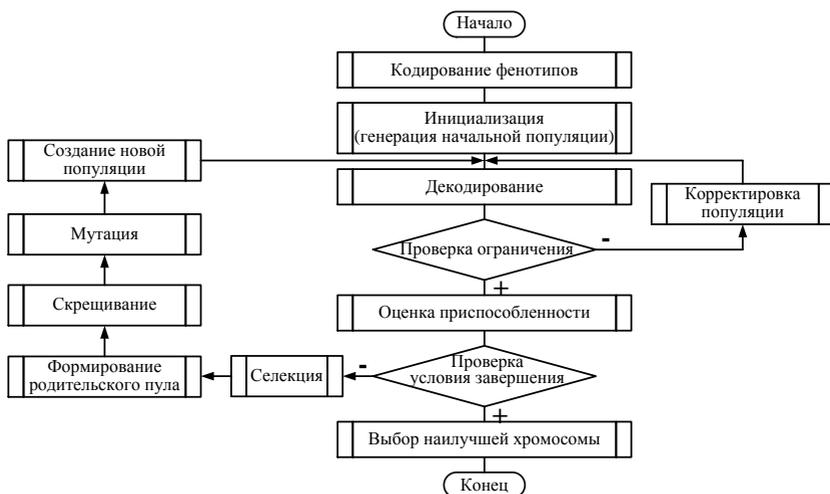


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма

В соответствии с приведенными блок-схемами алгоритмов выбора мощности КУ разработаны и зарегистрированы в УФЭР ОГУ три прикладные программы.

Проведено моделирование и осуществлена оценка эффективности работы программ на различных наборах входных данных. Исследовались 3-х, 5-и и 7-и узловые схемы различной конфигурации (радиальные, магистральные, смешанные). Шаг изменения мощности КУ (h) варьировался от 50 квар до 300 квар. Реактивная мощность, подлежащая компенсации оставалась неизменной и составляла $Q_{к\kappa} = 1250$ квар. Моделирование проводилось с различными параметрами алгоритмов: количество сгенерированных случайных вариантов мощностей КУ (N) в методе Монте-Карло и количество эпох (k_{ep}) в генетическом алгоритме (количество особей в популяции принято равным 5 и не менялось в процессе моделирования).

Характеристики компьютера, на котором выполнялось моделирование: процессор IntelCore 2 Duo 1.80 GHz, оперативная память 4 Гб, тип системы – 64-разрядная операционная система Windows 7.

Адекватность разработанных программ, реализующих метод Монте-Карло и генетический алгоритм, оценивалась посредством сравнения результатов их работы с результатами программы, реализующей метод полного перебора по двум показателям:

1) относительная погрешность (ε) полученных потерь активной мощности;

2) быстродействие (t) – время, необходимое программе для вывода результатов.

Отдельные результаты сравнения работы программ приведены в табл. 1.

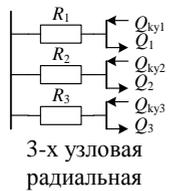
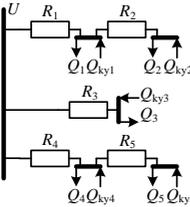
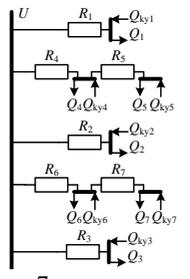
Для ММК и ГА проводилось по 50 прогонов программы, в табл. 1 приведены только максимальные и минимальные значения ΔP . Погрешность вычислений (ε) и быстродействие (t) по ММК и ГА определялись как среднее арифметическое.

Дальнейшие исследования планируется направить на определение оптимальных параметров алгоритмов для решения задачи выбора мощности КУ с приемлемыми точностью и быстродействием, таких как: соотношение шага изменения мощности КУ (h) и суммарной реактивной мощности, подлежащей компенсации ($Q_{к\kappa}$); количество генерируемых вариантов (N) в ММК; количество эпох (k_{ep}) и количество особей в популяции (k_{pop}) в ГА.



Таблица 1

Результаты сравнения алгоритмов

Схема	Метод	h , квар	Парам-ры алгоритма	ΔP , кВт	ε , %	t , с	
 <p>3-х узловая радиальная</p>	МПП	50		422,269		$\approx 28,6$ с	
	ММК	50	$N = 1 \cdot 10^3$	422,269 ...	0,3	$\approx 0,16$ с	
			$N = 3 \cdot 10^3$	422,873			
	ГА	50	$k_{ep} = 20$		422,269 ...	0,1	$\approx 0,12$ с
					422,873		
			$k_{ep} = 50$		422,269 ...	0,05	$\approx 0,24$ с
					422,737		
	 <p>5-и узловая смешанная</p>	МПП	100		2921,12		≈ 1 ч 38мин 12с
		ММК	100	$N = 3 \cdot 10^3$	2989,93	1,4	$\approx 2,14$ с
					2921,12 ...		
ГА		300	$N = 3 \cdot 10^3$	2989,93	0	$\approx 1,83$ с	
				2986,62			
ММК		300	$N = 3 \cdot 10^3$	$k_{ep} = 50$	2921,12 ...	3,5	$\approx 0,44$ с
					3101,78		
				$k_{ep} = 50$	2989,93 ...	0,7	$\approx 0,35$ с
					2952,57		
 <p>7-и узловая смешанная</p>		МПП	300		1042,84		≈ 1 ч 49мин 57с
	ММК	300	$N = 1 \cdot 10^3$	1042,84 ...	2,9	$\approx 0,33$ с	
				1154,35			
			$N = 3 \cdot 10^3$	1042,84 ...	1,6	$\approx 2,6$ с	
				1069,32			
	ГА	300	$k_{ep} = 20$	1042,84 ...	1,4	$\approx 0,25$ с	
				1058,19			
			$k_{ep} = 50$	1042,84 ...	0,8	$\approx 0,56$ с	
				1051,67			



Выводы по работе:

1. Метод полного перебора – единственный точный метод, однако для сложных схем его применение при выборе мощности КУ неэффективно в виду очень низкого быстродействия.

2. Быстродействие и точность метода Монте-Карло зависит от отношения суммарной реактивной мощности, подлежащей компенсации ($Q_{КС}$) к шагу изменения мощности КУ (h) и числа случайно сгенерированных вариантов (N). Чем меньше значение $Q_{КС}/h$, тем меньше можно задать N , что соответственно приведет к повышению быстродействия программы с приемлемой точностью ($\varepsilon = 0...5\%$).

3. Генетический алгоритм является наиболее эффективным из рассмотренных методов, т.к. превосходит по быстродействию метод полного перебора и метод Монте-Карло и позволяет найти решение с приемлемой погрешностью за время, не превышающее время поиска ММК.

Библиографический список

1. **Ковалев И. Н.** Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 200 с. (ЭТЭ. Экономия топлива и электроэнергии).

2. **Газизов Т.Т.** Методы глобальной оптимизации: уч. пос. Томск: В-Спектр, 2017. 23 с.

3. Метод полного перебора. [Электронный ресурс]. URL: <https://chem21.info/info/1463896/> (дата обращения 29.09.2020).

4. **Карпенко А.П.** Метод Монте-Карло. [Электронный ресурс] // Методы оптимизации (базовый курс). URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/ch1003.mod/?cou=MO/base.cou> (дата обращения 29.09.2020)

5. **Влацкая Л. А., Семенова Н.Г.** Программная реализация метода Монте-Карло для оптимального размещения компенсирующих устройств // Энергетические системы: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Белгород: БГТУ, 2019. С. 88-94. [eLIBRARY ID: [43933504](#)]

6. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 452 с. [eLIBRARY ID: [21556269](#)]

7. **Влацкая Л. А., Семенова Н.Г.** Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 21-28. [eLIBRARY ID: [41568402](#)]



STOCHASTIC ALGORITHMS COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER SELECTION FOR COMPENSATING DEVICE IN ELECTRIC NETWORK NODES

L.A. Vlatskaya and N.G. Semenova

Orenburg State University, Orenburg

Abstract. The article has analyzed the problem of compensating the device's optimal power selection for electric network nodes with respect to the criterion of minimal losses of active power. The solution to this problem is carried out by using stochastic methods such as the Monte Carlo method and genetic algorithm. The paper presents: a mathematical model of an optimization problem, developed algorithms, and flow diagrams of stochastic methods. It has presented the results of comparative analysis of programs operation the realization of which is based on the stochastic methods and method of full enumeration.

Keywords: power selection of compensating devices, method of full enumeration, Monte Carlo method, genetic algorithm.



УДК 621.313

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ ПРИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ МОЩНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ст. преп. Дадабаев Ш.Т.

*Худжандский политехнический институт ТТУ
имени акад. М.С. Осими, г. Худжанд, Республика Таджикистан*

***Аннотация.** В работе разработана компьютерная модель для исследования провалов напряжения сети вызванными пусковыми режимами высоковольтных электродвигателей, а также приведены результаты исследования влияния отклонения напряжения сети на пусковые характеристики асинхронных двигателей.*

***Ключевые слова:** компьютерное моделирование, асинхронный двигатель, MATLAB/Simulink, электропривод, переходной процесс.*

Асинхронные высоковольтные электродвигатели широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, например в насосных или компрессорных станциях [3, 15]. Отличительной особенностью асинхронных электродвигателей большой мощности являются сложные пусковые режимы, где пусковые токи превышают номинальные до семи раз, а максимальный пусковой момент – до трех раз. Пусковые токи негативно влияют на изоляцию обмоток двигателя, что в свою очередь приводит к уменьшению срока службы электродвигателей и всей токопроводящей частей электропривода. Кроме того при пуске высоковольтных асинхронных двигателей возникают провалы напряжения, которые могут повлиять на работу других потребителей энергосистемы. Исследования в этом направлении пока является мало изученным и потому считается актуальным. Устранение этих проблем можно добиться с применением систем безударного пуска – устройств плавного пуска (УПП) или частотных преобразователей [5, 7, 16].

Прямой пуск асинхронного двигателя допустим, если его пуск не приводит провалу напряжения более чем на 10%, а зависимость электромагнитного момента асинхронной машины от напряжения питающей сети пропорционально в квадратном соотношении [4, 8, 14]. Для более детального исследования пусковых режимов асинхронного электродвигателя при различных значениях напряжения сети необходимо выполнить компьютерное моделирование [6, 13, 17].



Для компьютерного моделирования асинхронной машины было использована программа MATLAB. Процесс моделирования асинхронного высоковольтного двигателя в программе MATLAB подробно описан в литературе [1, 2, 9-12]. Разработанная модель для исследования провалов напряжения при пусковых режимах работы асинхронной машины приведена на рис. 1.

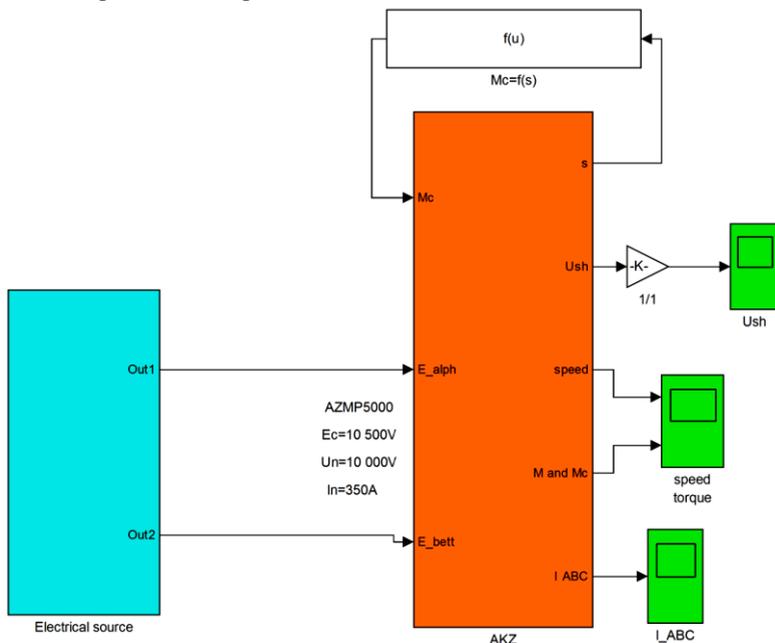


Рис. 1. Компьютерная модель для исследования пусковых режимов асинхронного электродвигателя

В разработанной модели использовалась высоковольтный асинхронный двигатель мощностью 5 МВт с напряжением 10 кВ. Такие типы машин в основном используются в качестве электропривода насосных агрегатов или компрессорных установок. Эти механизмы имеют ряд отличительных свойств, где важную роль играет качество электроэнергии питающей сети. Например ограничение на количество пусков в год, вентиляторный характер нагрузки и т.д. [5, 8, 13]. Также время пуска у таких электродвигателей значительно продолжительнее, чем у низковольтных асинхронных машин.

Результаты моделирования пусковых режимов асинхронного высоковольтного двигателя приведены на рис. 2 и 3.

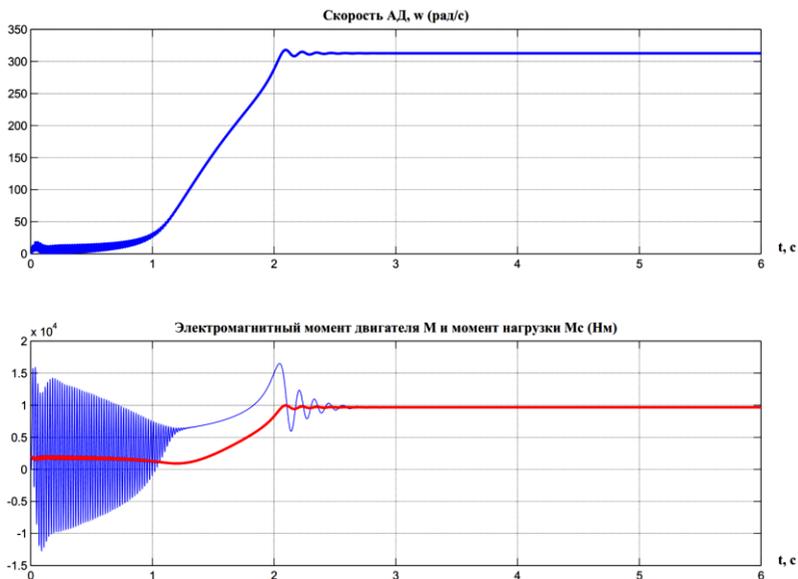


Рис. 2. Графики переходных процессов скорости двигателя, электромагнитного момента и момента нагрузки

Результаты моделирования пусковых режимов асинхронной машины при провалах напряжения питающей сети приведена на рис. 4.

Выводы

По полученным результатам видно, что с увеличением провалов напряжения питающей сети, запас по динамическому моменту при пуске уменьшается, что приводит к нагреву и затягиванию продолжительности пуска асинхронных двигателей. Критичным состоянием по результатам исследования оказалось при провалах напряжения 25% и 30%. В этих пределах пуск двигателя недопустимо затягивается или вовсе не запускается. Кроме этого в таких значениях провалов напряжения запуск электродвигателей могут вызывать срабатыванию защиты и автоматики электропривода от затянувшегося пуска. Рис. 3 показывает, что причинами провалов напряжения могут стать пусковые режимы мощных электродвигателей, которые в итоге могут повлиять на работу других соседних машин.

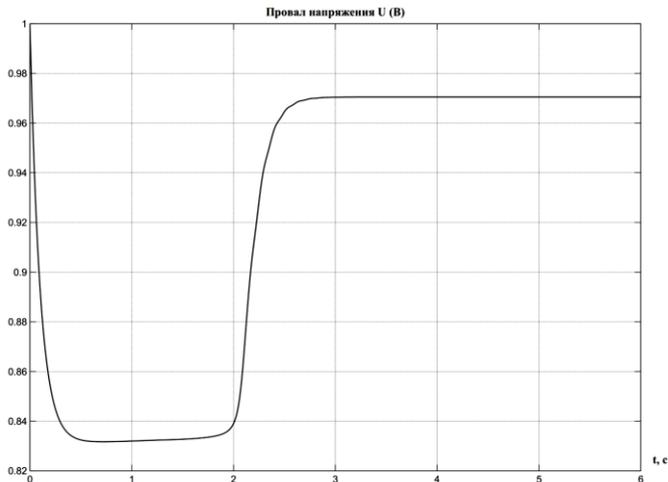


Рис. 3. Провал напряжения при пуске

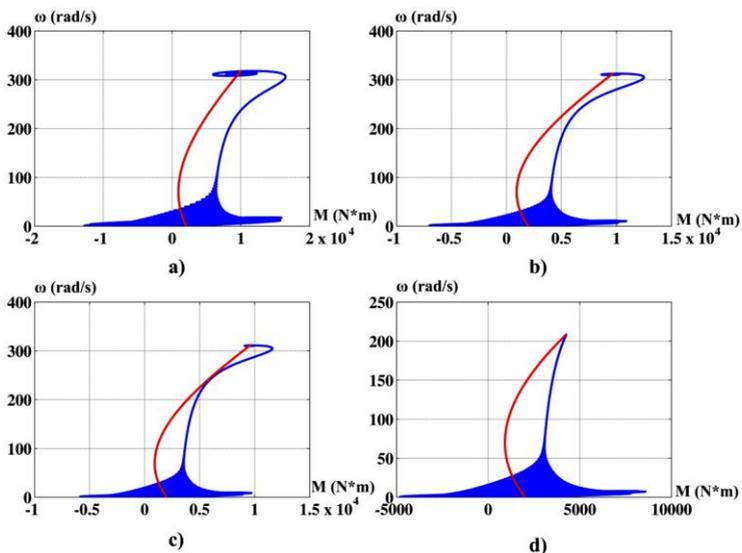


Рис. 4. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных провалах напряжения в питающей сети: провал напряжения: а) 0%; б) 20%; в) 25%; г) 30%



Библиографический список

1. **Герман-Галкин С.Г.** Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона.Век, 2008. 368 с.

2. **Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А.** Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. СПб.: КОРОНА принт, 2003. 256 с. (Компьютерная лаборатория)

3. **Вохидов А.Д., Дадабаев Ш.Т., Разоков Ф.М.** К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема // Надежность. 2016. Т. 16, № 4 (59). С. 36-39. [eLIBRARY ID: [29443817](#)]

4. **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375. [eLIBRARY ID: [37140815](#)]

5. **Дадабаев Ш.Т., Дадабаева З.А.** Компьютерное моделирование способов пуска электроприводов с вентиляторной нагрузкой // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. научно-практ. конф. Хабаровск: ДВГУПС, 2018. С. 323-327. [eLIBRARY ID: [36786219](#)]

6. **Дадабаев Ш.Т.** Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 618-621. [eLIBRARY ID: [36618194](#)]

7. **Дадабаев Ш.Т.** Исследование пусковых переходных процессов высоковольтного синхронного электропривода с учетом нагрева и жаркого климата // Энергетические системы: Сб. тр. II Межд. научно-техн. конф. Белгород: БГТУ, 2017. С. 179-184. [eLIBRARY ID: [36377761](#)]

8. **Дадабаев Ш.Т.** Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): тр. межд. научно-техн. конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2017. С. 76-80. [eLIBRARY ID: [29194657](#)]

9. **Ковач К.П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока; пер. с нем. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.

10. **Поздеев А.Д.** Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 172 с.

11. **Терёхин В.Б.** Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): уч. пос. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 320 с.

12. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystem и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.



13. Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors / F.M. Bruce, R.J. Graefe, A. Lutz, M.D. Panlener // IEEE Transactions on Industry Applications. 1984. Vol. IA- 20(1). P. 46-55. DOI: [10.1109/TIA.1984.4504374](https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504374).

14. **Nevelsteen, J., Aragon, H.**, Starting of Large Motors-Methods and Economics // IEEE Transactions on Industry Applications. 1989. Vol. 25(6). P. 1012-1018. DOI: [10.1109/28.44236](https://doi.org/10.1109/28.44236).

15. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems / P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, S.D. Pekarek // 3rd edition. NJ: Wiley-IEEE Press, 2013. 663 p. (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) DOI: [10.1002/9781118524336](https://doi.org/10.1002/9781118524336).

16. **Dadabaev, S.T., Islomovna, T.M., Saidulloevna, M.D.** (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network // European Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 22(1). P. 23-28. DOI: [10.18280/ejee.220103](https://doi.org/10.18280/ejee.220103). [eLIBRARY ID: [43283892](https://doi.org/43283892)]

17. **Wu X.Q., Steimel A.** Direct self control of induction machines fed by a double three-level inverter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. Vol. 44(4). P. 519-527. DOI: [10.1109/41.605629](https://doi.org/10.1109/41.605629).



STUDY OF VOLTAGE DIPS IN ELECTRICAL LINE AT STARTUP MODE OF POWERFUL ASYNCHRONOUS MOTORS

S.T. Dadabaev

Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University Named after Academician M.S. Osimi, Khujand

Abstract. The paper presents the development of the computer model to study voltage dips in an electrical line caused by startup mode of high voltage electrical motors, and also presents the study results of line`s voltage deviation influence on startup mode characteristics of asynchronous motors.

Keywords: computer modeling, asynchronous motor, MATLAB/Simulink, electric drive, transient process.



УДК 621.315-759.8

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПУТЕМ УМЕНЬШЕНИЯ ХИЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Студент **Романюк Н.В.**Доц. **Новикова О.В.***Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

***Аннотация.** В данной работе рассмотрена проблема хищений электрической энергии и способы снижения коммерческих потерь. Случаи несанкционированного потребления электроэнергии частными владельцами и должностными лицами происходят во всем мире. Компании применяют меры по противодействию воровству, но масштаб проблемы остается существенным. В работе проанализированы причины, представлены результаты внедрения организационно-технических методов предотвращения краж и оценка эффекта на примере объектов ЖКХ и на распределительных сетях.*

***Ключевые слова:** потери электроэнергии, энергоэффективность, хищение электроэнергии.*

До возникновения и развития коммерческих взаимоотношений между энергоснабжающими организациями и потребителями электрической энергии были предусмотрены конкретные наказания, регламентированные ведомственными нормативными документами, вплоть до отключения. Но действенные правовых, юридических и технических мер по уменьшению размеров хищений отсутствуют.

В настоящее время электроснабжающие организации стали всё больше обращать внимание на проблемы неплатежей и хищения. Одна из крупнейших электросетевых компаний ПАО «Ленэнерго» по итогам работы за 2018 года выявили 8353 случая незаконного потребления электроэнергии. Общая сумма энерговоровства составила 871,2 млн руб. Вследствие хищения электроэнергии часть мощности оказывается неучтённой. Это приводит к перегрузкам и частым отключениям. Также вследствие снижения напряжения ухудшаются показатели качества электроэнергии, что в свою очередь снижает производительность и эффективность электрооборудования.

Цель работы: Выявить общие и частные способы борьбы с хищениями электроэнергии.



Задачи:

- исследовать масштаб и выявить основные формы хищения электроэнергии в мире и в России;
- определить общие и частные способы борьбы с энергоровством в России;
- исследовать методы уменьшения доступности и простоты хищения на примере ЖКХ.

Характеристика ситуации с энергоровством в России

Вынужденные массовые хищения электроэнергии имеют социальный характер, особенно в местах с низким уровнем жизни населения, например, сельские районы. По данным газеты «Богатей», в Перелюбском районе Саратовской области много пунктов не газифицированы, вследствие чего отопление производится с помощью электричества. В данной местности фиксируется лишь 15% потреблённой электроэнергии, остальное потребляется с помощью устройств для подключения к воздушной линии без изоляции, которые возможно оперативно снимать и устанавливать при необходимости. Подключение происходит к безучётным питающим линиям. Это сказывается на показателях коммерческих потерь в электросетевом комплексе.

К коммерческим потерям относятся потери электроэнергии, обусловленные[1]:

- погрешностью системы учёта электроэнергии;
- неточностью данных о потребителях, ошибками при выставлении счетов;
- задержкой или полной неоплатой электроэнергии потребителями;
- хищением электроэнергии.

В структуре энергоровства существенную долю занимают промышленные предприятия. Но чаще они относятся к предприятиям среднего и малого бизнеса. Крупнейший в 2018 году факт безучётного потребления электроэнергии в категории «промышленный потребитель» зафиксирован в сельском поселении Нестеровское Сунженского района. Как сообщили в газете «Ингушетия» [2] согласно оформленному акту, объём похищенного составил 1 млн 436 тыс. кВт·ч, сумма ущерба – 9,4 млн руб.

По результатам анализа выявленных фактов хищения электроэнергии авторами были сформулированы основные способы хищения электроэнергии [3] и механизмы борьбы с ними. Результат представлен на рис. 1.



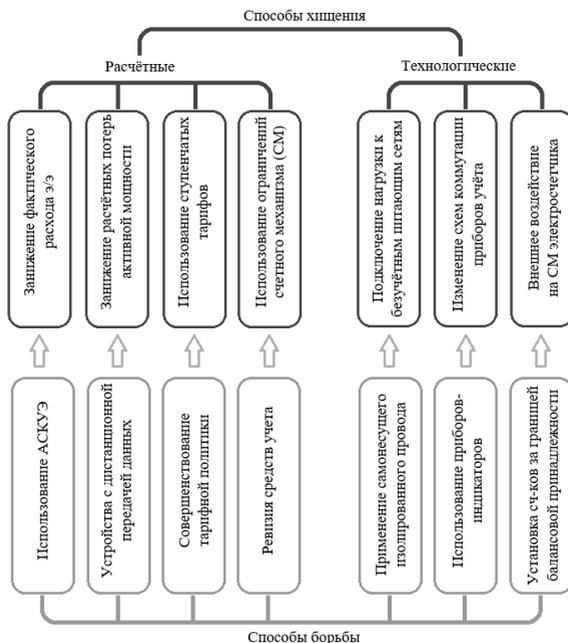


Рис. 1. Причины и способы борьбы с хищением электроэнергии

Как правило, выявленные акты хищения электроэнергии сводятся к административному штрафу (7.19 КоАП РФ самовольное подключение, 19.2 КоАП РФ повреждение пломбы счетчика), но также бывают случаи привлечения к уголовной ответственности: ущерб путём обмана (ст. 165, п. 1 УК РФ), кража (ст. 158, п. 1 УК РФ), незаконное проникновение (п. 2 ст. 158 УК РФ), злоупотребление доверием (ст. 165, п. 3 УК РФ), различные виды мошенничества (ст. 159, п. 1. УК РФ). Некоторые энергосбытовые компании вносят в договоры штрафы или возможность отключения абонентов от сети, данные санкции входят в противоречие с действующим законодательством и являются следствием юридической неграмотности потребителя. Компании могут быть привлечены к ответственности по ст. 330 УК РФ «Самоуправство».

Таким образом, в электроэнергетике не работают классические рыночные механизмы и необходим государственный контроль. Рассмотрим основные способы хищения электроэнергии [3] и способы борьбы (рис. 1).

Внедрение новых методов борьбы провоцирует нарушителей придумывать новые способы хищения. Например, В Израиле похитители электроэнергии нашли нестандартный способ хищения электроэнергии. При наружной установке счётчика они капали в щёлку корпуса немного сиропа, на который сползались муравьи, тормозившие диск [5].

Согласно данным, предоставленным сетевой организацией [4] в 2015 году МОЭСК смог переломить тенденцию хищения электроэнергии на рис. 2.

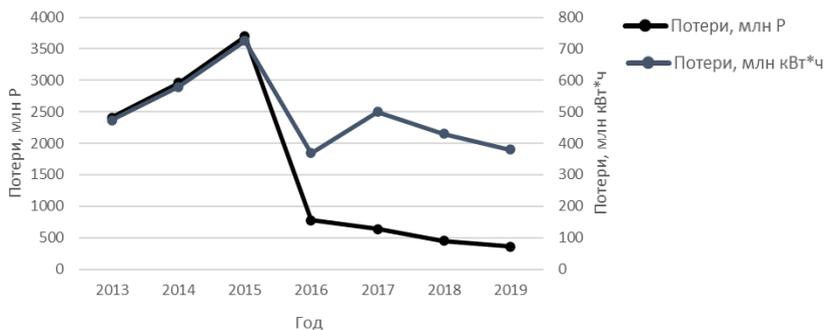


Рис. 2. Динамика хищений электроэнергии по данным ПАО «Московская объединенная электросетевая компания»

Авторами проведен анализ выявленных хищений электроэнергии в разных городах страны. Данная статистика представлена в табл. 1 и на рис. 3. Можно заметить, что в городах, где развита промышленность, количество случаев хищений меньше, но абсолютная величина ущерба больше (Тула), чем в городах, где большая доля потребления – население (Самара) согласно рис. 3.

Масштабы и частота хищений электроэнергии на промышленных предприятиях является серьезным основанием для прекращения электроснабжения и к этим фактам может и должен применяться уже существующий организационно-правовой механизм реагирования. С учетом выявленной динамики, причин и способов хищения электроэнергии авторами предложено рассмотреть метод снижения ущерба энергоснабжающих организаций и повышения энергоэффективности потребления в ЖКХ и в распределительных сетях. Масштабы хищений представлены в табл. 1.



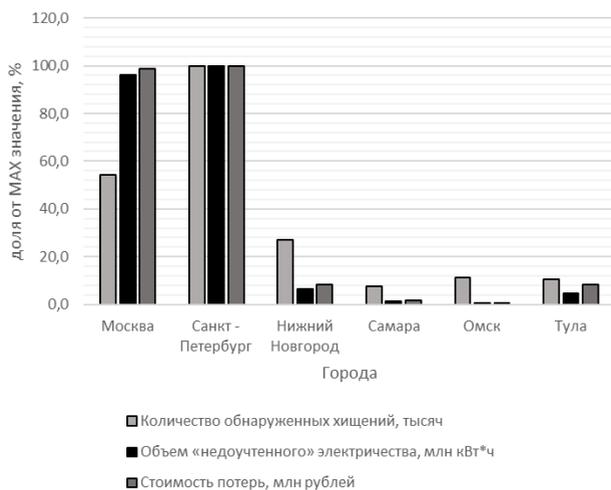


Рис. 3. Статистика хищений электроэнергии по городам страны

Таблица 1

Статистика по городам за 2019 год

Город	Количество обнаруженных хищений, тыс.	Объем «недоучтенного» электричества, млн кВт*ч	Стоимость потерь, млн руб.
Москва	2,2	144	340
Санкт - Петербург	4,05	150	345
Нижний Новгород	1,1	9,5	28,5
Самара	0,3	1,8	6,1
Омск	0,46	0,65	2,6
Тула	0,43	7,24	28,96

Методы борьбы с хищениями электроэнергии на конкретном объекте

Пример № 1. Было выявлено существенное превышение электропотребления в жилом доме (фактическое потребление отличалось от среднестатистического в 2 раза). Решение: внедрение методов предотвращения энерговоровству в жилом доме.



ТСЖ был предложен проект по модернизации электрохозяйства дома, состоящего из 50 квартир. Компанией ООО «Вектор» были проведены следующие мероприятия на сумму 1 млн. 398 тыс. руб.:

- сбор 50 счетчиков электроэнергии в одном подвальном помещении с ограниченным доступом. Питающие провода напрямую соединяли каждую квартиру с конкретным счётчиком. Вместо использовавшихся счетчиков СО2М2 (5,15А; 220В), были приняты в эксплуатацию НЕВА1031SO (5,60А; 220В);

- установка защит минимального напряжения;

- установка реле контроля мощности на коридорное освещение с запасом в 10% от установленной мощности. Данное реле срабатывало при попытке подключения и отключало потребителя. Через заданный промежуток времени осуществлялось повторное включение.

Благодаря проведённой работе удалось уменьшить размер оплаты за места общего пользования (коридорное освещение, работа домофона и т.д.). В табл. 2 приведены данные по потреблённой энергии согласно квитанциям в июне (до начала работ) и в августе (после завершения работ).

Таблица 2

Счета за электроэнергию

Наименование	Потребление, кВт·ч	
	Июнь	Август
50 квартир	14 000	12 000
общедомовые нужды (ОДН)	12 150	200
Всего	26 150	12 200

В сумме дом стал потреблять на 53% меньше, что объясняется уменьшением масштабов хищений, экономией и добровольным переходом многих квартир с электрических плиток на газовые.

В результате каждый счетчик установлен в отдельном подвальном помещении с ограниченным доступом. На рис. 1 и 2 показано изменение положения счетчиков. Далее многие жильцы перешли на газовые плиты с установкой баллонов, что сильно сказалось на конечном результате и привело к повышению класса энергоэффективности здания.

Таким образом решена проблема несанкционированного подключения к общей проводке и недоучёта электроэнергии из-за воздействий на счетный механизм, а добросовестные абоненты стали платить меньше, так как снизились счета за места общего пользования. Расположение счетчиков показано на рис. 4.



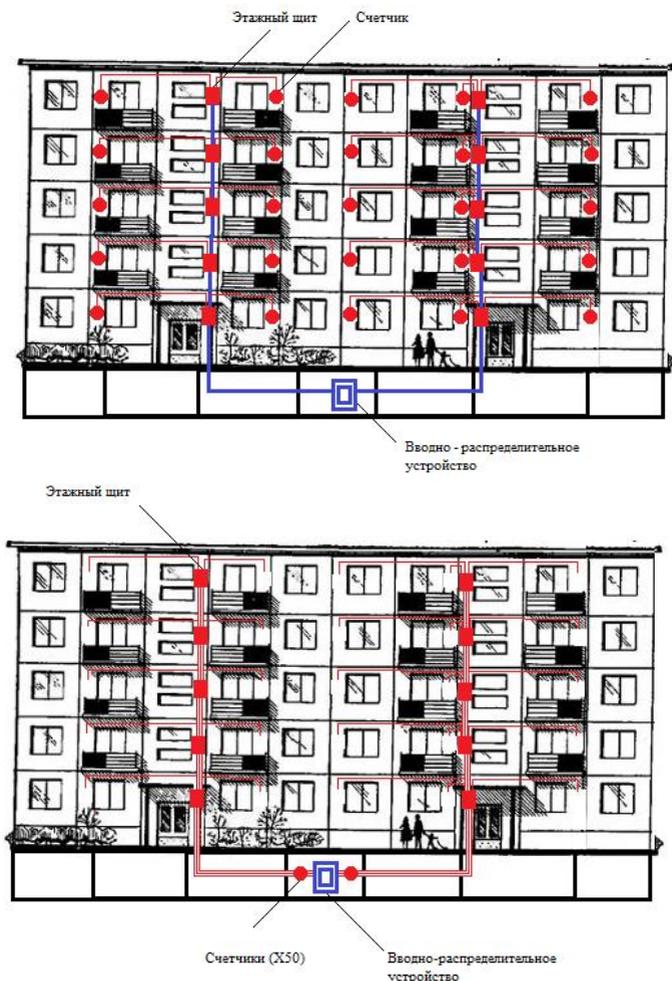


Рис. 4. Расположение счетчиков до и после производства работ

Пример № 2. Внедрение методов предотвращения энерговоровству в сельской местности.

В Черняховском районе в сельской местности сильное внимание привлекает воровство электроэнергии с воздушных линий электропередачи, выполненных без изоляции. Как правило, хищение осуществ-

лялось посредством подключения оборудования с помощью «крокодилчиков», которые можно было быстро снять в случае проверок. Воровство составляло 40-60% по данным «Янтарьэнерго». Для устранения данной проблемы были внедрены следующие решения:

- смена голого провода на самонесущий изолированный провод;
- вынесение счетчиков за территорию потребителя и установка на опору, на высоту 7м.;
- замена счетчиков с механических на электронные с функциями дистанционной передачи данных и сигнализации вскрытия.

Благодаря проведённым мероприятиям, хищение электроэнергии удалось уменьшить до 10-15%.

Выводы по работе

Снижение коммерческих потерь является одним из существенных потенциалов энергосбережения. Наблюдается зависимость роста тарифов и масштабов хищений, при этом зависимость обоюдная. Всё усугубляется большим числом неплательщиков. Таким образом, наблюдается замкнутый круг, а решить данную проблему можно только разрабатывая стандартные методы борьбы, информацию о которых целесообразно распространять через государственную информационную систему ГИС энергоэффективности. Примером таких методов могут стать предложенные механизмы снижения доступности хищений электроэнергии в жилом доме и в пригородных распределительных сетях.

Библиографический список

1. **Красник В.В.** 102 Способа хищения электроэнергии. М.: Энас, 2013. 160 с.
2. **Евлоев М.** Масштаб хищения поразил энергетиков [Электронный ресурс]. URL: <https://gazetaingush.ru/obshchestvo/pochti-poltora-milliona-kilovatt-chasov-bezuchetnogo-potrebleniya-vyyavili-energetiki>. (дата обращения 20.10.2020).
3. Способы хищения электроэнергии и методы борьбы с ними [Электронный ресурс]. URL: https://cablecompany.com.ua/articles/sposoby_hisheniya_elektroenergii_i_metody_borby_s_nimi/ (дата обращения 20.10.2020).
4. МОЭСК выявила более трех тысяч случаев хищения электроэнергии в 2016 году [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/20170127/1486619439.html> (дата обращения 20.10.2020).
5. Воровство электричества [Электронный ресурс]. URL: <https://v-remonta.ru/elektrika/vorovstvo-elektrichestva> (дата обращения 20.10.2020).



INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY BY ELECTRICITY THEFT ELIMINATION**Y.V. Romaniuk and O.V. Novikova***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg*

Abstract. This paper examines the problem of electricity theft and the method of commercial losses decrease. Incidents of unauthorized electricity consumption by private owners are happening all over the world. Companies are taking measures to stop theft but the scale of the problem is still significant. The paper has analyzed causes, presented results of the implementation of technical and organizational methods of theft elimination, and evaluation of the outcome on the example of public utilities and distribution networks.

Keywords: electrical power losses, energy efficiency, electricity theft.



УДК 621.316

МЕТОД УСКОРЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА С КОНТРОЛЕМ УГЛА ВКЛЮЧЕНИЯ

Магистрант **Фёдорова В.А.**Магистрант **Кириченко В.Ф.**Канд. техн. наук, доц. **Глазырин Г.В.***Новосибирский государственный технический
университет (НГТУ), г. Новосибирск*

***Аннотация.** Выполнение процесса синхронизации осуществляется двумя традиционными способами, каждый из которых имеет свои значительные недостатки. Тяжесть возможных последствий при включении синхронного генератора на параллельную работу для электростанции и электроэнергетической системы зависит как от выбранного способа синхронизации, так и от наличия человеческого фактора. Для минимизации последствий разработан промежуточный модернизированный метод синхронизации. Данный метод исключает недостатки существующих традиционных и реализуется на базе автоматических устройств. Целесообразность применения модернизированного метода доказана аналитически и с применением математической модели, разработанной в среде MATLAB. Математическая модель позволила графически визуализировать каждый из возможных способов выполнения процесса синхронизации и определить наиболее оптимальные условия для включения агрегата.*

***Ключевые слова:** синхронизация, синхронизатор, автоматическая синхронизация, модернизированный метод синхронизации, математическая модель*

Производство электроэнергии представляет собой процесс параллельной работы синхронных генераторов электростанции на шины повышенного или генераторного напряжения. В соответствии с этим, синхронизация – комплекс действий по включению синхронных генераторов на параллельную работу с другими синхронно вращающимися генераторами электростанции или электроэнергетической системой (ЭЭС) [1].

На сегодняшний день операция синхронизации осуществляется двумя традиционными способами: точной синхронизации и самосинхронизации. В нормальных режимах работы электростанции и энергосистемы включение на параллельную работу синхронных генераторов



предписывается производить методом точной синхронизации. В момент включения генератора в сеть необходимо обеспечить выполнение следующих требований, обеспечивающих оптимальные условия для включения [2]:

- 1) равенство амплитуд ЭДС генератора и системы;
- 2) равенство частот вращения генератора и системы;

3) совпадение фаз векторов ЭДС генератора и системы в момент включения выключателя.

Значительным минусом данного метода является достаточно большой промежуток времени выполнения указанных требований даже в нормальном режиме работы системы. В аварийных режимах, когда значения напряжения и частоты энергосистемы подвержены значительным изменениям – включение генератора методом точной синхронизации может еще больше затянуться или произойти в неоптимальных условиях.

Способ самосинхронизации, напротив, позволяет выполнять операцию синхронизации как в нормальном режиме работы ЭЭС, так и в условиях аварийных режимов быстро. Включение генераторов на параллельную работу данным методом не требует соблюдения описанных требований. Недостаток данного способа заключается в возникновении уравнильных токов большой величины в момент включения, снижении напряжения на шинах электростанции, возможности втягивания явнополюсного генератора в противофазе ЭДС агрегата и системы за счет наличия момента явнополюсности (реактивного момента) [3].

В настоящее время синхронизация производится как вручную персоналом, так и при использовании автоматического управления. Человеческий фактор вносит в осуществление процесса большую вероятность обеспечения неоптимальных условий для включения синхронного агрегата. Поскольку операция синхронизации является неотъемлемой частью комплексного процесса производства электроэнергии, её осуществление должно сопровождать как можно меньшими последствиями для электрической станции и не нарушать устойчивости ЭЭС [4].

Проблема включения синхронных генераторов на параллельную работу является актуальной вследствие различной тяжести возможных последствий в зависимости от применения того или иного традиционного способа синхронизации.

Цель работы – модернизация существующих методов синхронизации и создание на их основе промежуточного метода, исключающе-



го основные недостатки каждого из традиционных. Также данный метод может быть реализован посредством автоматических устройств (синхронизаторов) [5], тогда операция синхронизации станет полуавтоматической, либо полностью автоматической. За счет этого будет исключена необходимость принятия решения о моменте включения генератора персоналом, опираясь на показания амперметров, вольтметров и синхроскопа, что позволит минимизировать влияние человеческого фактора [6].

Последовательность действий предлагаемого модернизированного метода: ротор генератора раскручивается до подсинхронной скорости, далее на обмотку возбуждения подается величина тока, меньше его номинального значения. Таким образом, в момент включения имеется ЭДС генератора, сдвинутая относительно ЭДС системы на некоторый угол δ , не превышающий заданного предельного значения, что обеспечит втягивание генератора в синхронизм за счет синхронного момента. Далее, после включения генераторного выключателя, величина тока возбуждения постепенно увеличивается.

Использование модернизированного метода предполагает исключение недостатков двух традиционных, в частности – большой величины уравнильного тока и длительности осуществления операции. В связи с этим необходимо численно оценить целесообразность применения предлагаемого метода. Для этого следует найти возможную максимальную величину уравнильного тока в момент включения, которая зависит от величин угла δ и тока возбуждения.

Уравнильный ток при несинхронном (между векторами ЭДС генератора и системы имеет место угол δ) включении генератора в первый момент времени можно определить как:

$$I_y'' = \frac{\Delta E}{X_d'' + X_c''}, \quad (1)$$

где ΔE – векторная разность между напряжением системы U_c и сверхпереходной продольной ЭДС генератора E_{dr}'' , X_d''/X_c'' – индуктивные сверхпереходные сопротивления генератора и энергосистемы по продольной оси. В свою очередь, ΔE может быть найдена как:

$$\Delta E = \sqrt{(U_c - E_{dr}'' \cdot \cos\delta)^2 + (E_{dr}'' \cdot \sin\delta)^2}. \quad (2)$$

Напряжение энергосистемы U_c составляет 220 В, сверхпереходная ЭДС генератора E_{dr}'' в момент включения рассчитывается по характе-

ристике холостого хода агрегата. Характеристика построена на основе имеющегося объекта исследования – учебного генератора электростанции Новосибирского Государственного Технического Университета (НГТУ) [7]. Значению E_{dr}'' прямо пропорционально значение подаваемого в обмотку ротора генератора тока возбуждения. Величина сверхпереходного сопротивления учебного генератора X_d'' найдена стационарным методом, а величина X_c'' принимается равной нулю, предполагая включение синхронного генератора на шины бесконечной мощности.

Расчет уравнивающего тока в момент включения по формулам 1 и 2 при изменении угла δ от 0° до 180° и значениях тока возбуждения 17,5 А, 10 А, 6 А и 3 А представлен в качестве графиков (рис. 1).

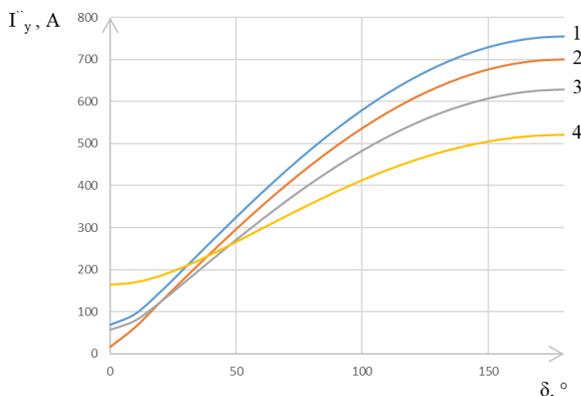


Рис. 1. Зависимость уравнивающего тока от угла δ и i_f :

1 – $i_f = 17,5$ А; 2 – $i_f = 10$ А; 3 – $i_f = 6$ А; 4 – $i_f = 3$ А

Согласно рис. 1, уравнивающий ток имеет наименьшее значение в случае, когда ЭДС генератора равна 230 В (соответствует току возбуждения, равному 10 А), а угол $\delta = 0^\circ$. Однако, улавливание момента, когда угол δ близок к 0° , может затянуть процесс синхронизации. Поэтому модернизированный метод характеризуется увеличением допустимого диапазона угла δ между векторами ЭДС генератора и системы, а для предотвращения возникновения больших уравнивающих токов – снижением тока возбуждения в момент включения генераторного выключателя ниже номинального значения.

При расчёте по формуле 1 максимальное значение уравнивающего тока при включении учебного агрегата методом точной синхронизации составляет 63 А с учётом того, что угол δ равен предельному значению для используемого метода 10° . Данная величина в 5 раз меньше, чем при использовании метода самосинхронизации (342 А).

Согласно проведенным расчётам, рекомендуется включение агрегата на параллельную работу при угле, лежащем в диапазоне $30 - 40^\circ$, и токе возбуждения от 10 А до 6 А: в этом случае значение уравнивающего тока соответствует около 80% от максимального уравнивающего тока при традиционном методе самосинхронизации.

Для проверки возможных алгоритмов синхронизации разработана математическая модель процесса включения учебного генератора электростанции НГТУ на параллельную работу с системой в среде MATLAB. Основной целью модели было исследование различных вариантов синхронизации и их графическая визуализация посредством расчета и изображения уравнивающего тока и угла δ во времени. Данная математическая модель дала возможность на основании графического представления выбрать начальные условия, являющиеся наиболее оптимальными для синхронизации агрегата.

При создании модели использованы уравнения, описывающие электромагнитные и электромеханические процессы, имеющие место в синхронной машине в условиях её синхронизации с сетью. Они образуют систему двух дифференциальных уравнений, описывающих состояние синхронизируемого агрегата:

$$\begin{cases} J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_c - M_{\text{синх}} - M_p; \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_c. \end{cases} \quad (3)$$

где J – момент инерции ротора учебного генератора; M_T – момент турбины; M_c – момент сопротивления; $M_{\text{синх}}$ – синхронный момент; M_p – реактивный момент; ω_r – частота вращения исследуемого генератора; ω_c – частота вращения эквивалентного генератора системы.

Значение момента турбины принялось таким, чтобы в установившемся режиме скольжение принимало величину 2...3%. Момент сопротивления оценен исходя из КПД генератора (97...98%) и потерь мощности на трение в номинальном режиме работы (2...3% номинальной мощности машины). Обе составляющие избыточного момента выражаются в качестве зависимости от частоты вращения синхрони-



зируемого генератора. Момент инерции J взят равным $0,1 \text{ т} \cdot \text{м}^2$, исходя из имеющихся опытных данных о времени разгона ротора до установившегося значения. Электромагнитный момент, состоящий из синхронного и реактивного моментов, действует в направлении противоположном вращению ротора и представляется как зависимость от ЭДС рассматриваемого генератора.

Угловая частота вращения эквивалентного генератора сети может быть найдена по известному выражению:

$$\omega_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_c}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{2} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

где f_c – номинальная частота сети, p – число пар полюсов, равное двум у генератора учебной электростанции.

Таким образом, система уравнений 3 с учётом численных коэффициентов и принятых допущений приобретает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\omega}{dt} = 22,5 - 0,145 \cdot \omega - \frac{E_{\text{двср}} \cdot U_c}{X_d''} \cdot \sin\delta - U_c^2 \cdot \frac{X_d'' - X_q''}{2 \cdot X_d'' \cdot X_q''} \cdot \sin 2\delta; \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 157,08. \end{array} \right.$$

Построенная зависимость моделирует следующий процесс: выполняется запуск синхронизируемого агрегата из состояния его полной остановки, а генераторный выключатель включается в момент достижения объектом установившегося режима, когда частота вращения имеет постоянную скорость изменения (60 секунд для генератора учебной электростанции), однако для наглядности графического изображения в качестве границы между моментами времени до и после включения выключателя выбраны 400 секунд.

Исследование различных вариантов синхронизации (рис. 2–4) на основании математической модели заключается в варьировании величин, предшествующих включению генераторного выключателя. Включение агрегата может происходить при различных значениях угла δ , на что непосредственное влияние оказывает сам момент включения в секундах. Таким образом, в качестве варьируемых начальных условий принят момент включения, ток возбуждения остается постоянным и обуславливает амплитуду ЭДС генератора, равную 230 В.

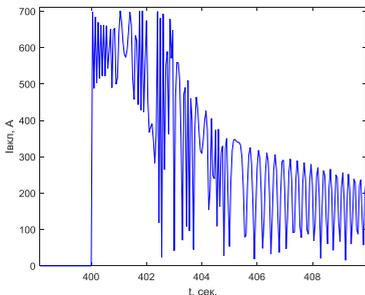


Рис. 2. Изменение уравнивающего тока $I_{\text{ВКЛ}}$ во времени при использовании традиционного метода самосинхронизации

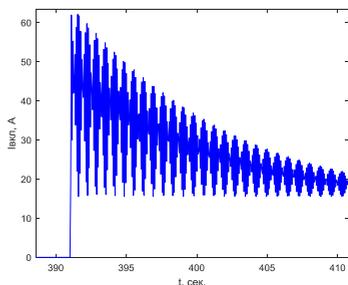


Рис. 3. Изменение уравнивающего тока $I_{\text{ВКЛ}}$ во времени при использовании традиционного метода точной синхронизации

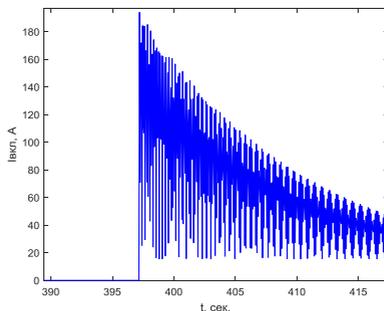


Рис. 4. Изменение уравнивающего тока $I_{\text{ВКЛ}}$ во времени при использовании промежуточного модернизированного метода

Согласно рис., при синхронизации агрегата традиционным методом самосинхронизации максимальный уравнивающий ток в момент включения достигает величины 700А. Так как в модернизированном методе синхронизации угол δ может лежать в диапазоне от 0 до 30...40°, а в традиционном методе точной синхронизации от 0 до 10°, то был выбран такой момент включения в секундах, при котором угол имеет свое максимальное допустимое значение (40° и 10°) для каждого из методов. Тем не менее, модернизированный метод синхронизации осуществляет операцию быстрее, чем метод точной синхронизации. При использовании модернизированного метода уравнивающий ток не превышает величину трехфазного короткого замыкания и, как видно из модели, генератор успешно втягивается в синхронную работу.



Проведенные исследования обладают новизной, так как оптимизация процесса синхронизации с последующей разработкой и применением автоматического управления станционными агрегатами являются одними из составляющих будущего перспективного развития электроэнергетических объектов.

Практическая ценность предложенного модернизированного метода синхронизации заключается в его использовании на мощных генераторах, для которых не рекомендовано аварийное включение методом самосинхронизации. Перспектива использования разработанного метода – в учебном процессе при выполнении студентами лабораторных работ, в ходе проведения научно-исследовательских работ, а также на реальных объектах электроэнергетики.

Выводы по работе:

1. На основании исследования традиционных способов включения синхронных агрегатов на параллельную работу и их основных недостатков разработан промежуточный модернизированный метод синхронизации.

2. Целесообразность применения модернизированного метода доказана аналитическим расчетом, согласно которому значение уравнительного тока в момент включения при использовании промежуточного метода соответствует около 80% от максимального уравнительного тока при традиционном методе самосинхронизации.

3. Согласно представленной математической модели, условия, возникающие в момент включения генераторного выключателя при использовании модернизированного метода, можно рассматривать как оптимальные для аварийного включения синхронных генераторов большой мощности.

4. Модернизированный метод удовлетворяет следующим требованиям: выполняет процесс включения в сеть машины быстрее, чем методом точной синхронизации, но при этом имеет уравнительные токи в момент включения меньшие, чем в методе самосинхронизации.

Библиографический список

1. **Барзам А.Б.** Системная автоматика // 4-е изд., перераб. доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 446 с.
2. **Овчаренко Н.И.** Автоматика энергосистем: уч. для вузов / Под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Изд. дом МЭИ, 2016. 475 с.
3. **Павлов Г.М., Меркурьев Г.В.** Автоматика энергосистем. С.-Пб: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2001. 381 с.



4. Analysis of power system static aperiodic stability with electronic generation / A. Fishov, I. Murashkina, A. Marchenko et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. Vol. 1019. P. 012013. DOI: [10.1088/1757-899X/1019/1/012013](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1019/1/012013).

5. Романов Ю.В., Воронов П.И. Устройство точной автоматической синхронизации синхронного генератора // Релейщик. 2017. № 2. С. 14-15.

6. Bekiroglu E., Bayrak A. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators // IEEE EUROCON 2009. St.-Petersburg, 2009. P. 766-771. DOI: [10.1109/EURCON.2009.5167720](https://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167720).

7. Глазырин Г.В., Кравченко В.А., Фёдорова В.А. Разработка и внедрение микропроцессорной системы синхронизации для учебной электростанции // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: матер. II Всерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2020. Т. 2. С. 28-31. [eLIBRARY ID: [44214596](https://elibrary.ru/44214596)]



METHOD OF RAPID GENERATOR SYNCHRONIZATION WITH SWITCHING ANGLE CONTROL

V.A. Fedorova, V.F. Kirichenko and G.V. Glazyrin

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Abstract. Execution of the synchronization process is carried out in two traditional ways, all of which have significant disadvantages. The seriousness of potential consequences of synchronous generator coupling in parallel operation for power plant and electric power system depends on the selected way of synchronization as well as on human factor. To minimize consequences the intermediate modernized method of synchronization has been developed. This method eliminates disadvantages of the existing traditional methods and is based on automatic devices. The feasibility of modernized method implementation is proved analytically and by using the mathematical model developed in the MATLAB environment. The mathematical model has allowed graphically visualize every possible way of synchronization process execution and determine the most optimal conditions to switch on the device.

Keywords: synchronization, synchronizer, automatic synchronization, modernized method of synchronization, mathematical model.



УДК 621.316.722.076.12

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Д-р техн. наук, проф. **Герман Л.А.**¹Д-р техн. наук, проф. **Серебряков А.С.**²Канд. техн. наук, доц. **Осокин В.Л.**²Канд. техн. наук, доц. **Дулепов Д.Е.**²¹ Самарский государственный университет путей сообщения.
Филиал в г. Нижний Новгород² Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет, г. Княгинино

Аннотация. Работа установок поперечной емкостной компенсации при их включении вдали от источника питания (например, на постах секционирования в тяговой сети или в сетях общего назначения, например, в пунктах отвлечения от магистральных сетей) при распределенной нагрузке имеет ряд особенностей. Эти особенности рассмотрены на примере электрифицированного участка железной дороги. В частности, проанализирована проблема регулирования мощности КУ при средних и максимальных нагрузках.

Ключевые слова: поперечная емкостная компенсация, тяговая сеть переменного тока, электрифицированный участок железной дороги, снижение потерь мощности

Работа установок поперечной емкостной компенсации (КУ) при их включении вдали от источника питания (например, на постах секционирования в тяговой сети или в сетях общего назначения, например, в пунктах отвлечения от магистральных сетей) имеет ряд особенностей. Рассмотрим эти особенности на примере электрифицированного участка железной дороги. В частности, проанализируем известную проблему регулирования мощности КУ.

При расчете мощности установок поперечной емкостной компенсации (КУ) и разработке принципов её регулирования до недавнего времени специалисты ориентировались на известные нормативные документы. Однако известно [1], что КУ являются мощным техническим средством повышения пропускной способности участков железной дороги. Поэтому неслучайно в последнее время стали выполняться ряд мероприятий по КУ с целью повышения пропускной способности.



Цель работы заключается в разработке методов и технических средств для комплексной системы регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации в системах с распределенной нагрузкой, обеспечивающей экономию электроэнергии при малых и средних нагрузках и заданное значение напряжения при больших нагрузках.

Материалы и методы. Управление и автоматика существующих установок поперечной емкостной компенсации (КУ) рассмотрены в [1]. В [2] указано, что для регулирования мощности КУ поста секционирования (ПС) используется третья гармоническая тягового тока. Это объясняется тем, что измерения тяговой нагрузки у поста секционирования не отражают реальную нагрузку, относящуюся к ПС. Действительно, если одинаковые токи расположены с двух сторон на одинаковом расстоянии от ПС, то тяговый ток, отнесенный (приходящийся) к ПС, равен нулю (через ПС ток не протекает), и измеренный ток питающей линии ПС равен нулю. Кроме того, недостаток [2] в том, что регулирование мощности КУ происходит только для снижения потерь мощности в тяговой сети, и совсем не учитывается главный показатель режима – пропускная способность участка.

Для повышения пропускной способности участка железной дороги повышают уровень напряжения в тяговой сети, и поэтому в настоящее время для этого увеличивают мощность установок КУ. Наиболее распространенные установки КУ на отечественных железных дорогах – конденсаторные установки, включенные фильтром на третью гармонику с последовательным включением основной конденсаторной батареи и реактора для предотвращения резонансных явлений. Увеличение мощности КУ сопровождается дополнительной установкой секции конденсаторов, позволяющей выполнять регулирование мощности КУ, при этом дополнительная секция может включаться параллельно или последовательно с основной конденсаторной батареей [3,4]. Преимущества и недостатки указанных принципов включения рассмотрены в [4]. Далее будем рассматривать включение дополнительной секции КУд параллельно основной конденсаторной батарее.

Таким образом, главная цель проведенных авторами исследований – выполнить регулирование мощности КУ так, чтобы повысить пропускную способность электрифицированного участка железной дороги.

Предлагаем следующую схему регулирования мощности КУ (рис. 1).



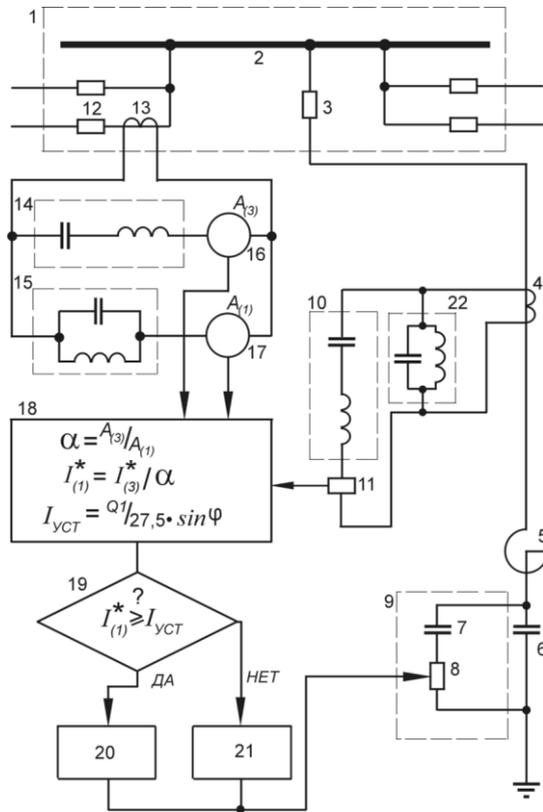


Рис. 1. Схема регулирования мощности КУ

Условные обозначений на рис. 1:

1 – пост секционирования (ПС) с питающими линиями контактной сети на выключателях;

2 – шина ПС;

3 – главный выключатель КУ;

4 – трансформатор тока КУ;

5 – реактор КУ;

6 – основная конденсаторная батарея КУ;

7 – дополнительная конденсаторная батарея КУ_д;

8 – коммутационный аппарат дополнительной конденсаторной батареи КУ_д;

9 – блок дополнительной конденсаторной батареи КУ_д с коммутационным аппаратом;

10 – первый резонансный фильтр на третью гармонику во вторичной обмотке трансформатора тока КУ;

11 – реле контроля третьей гармоники тока КУ;

12 – выключатель питающей линии ПС;

13 – трансформатор тока питающей линии ПС;

14 – второй резонансный фильтр третьей гармоники во вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии;

15 – второй заграждающий фильтр третьей гармоники во вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии;

16 – амперметр А₍₃₎ третьей гармоники тока питающей линии;

17 – амперметр А₍₁₎ первой гармоники тока питающей линии;

18 – расчетный блок

19 – блок сравнения $I^*(1) \geq I_{уст}$

20 – блок включения дополнительной секции КУ_д;

21 – блок отключения дополнительной секции КУ_д;

22 – первый заграждающий фильтр на третью гармонику во вторичной обмотке трансформатора тока КУ.

Описание работы и характеристик блоков в схеме.

Мощность дополнительной секции КУ 9. На основании [5] мощность КУ (Q_1) поста секционирования по реальным нагрузкам обычно равна 4...5 Мвар и определяется необходимостью снижения реактивной мощности межподстанционной зоны до нормируемых значений по формуле «разности тангенсов» [1]. Кроме того, в [6,7] представлены нормативные документы, требующие повышения мощности КУ (до Q_2) для соблюдения требования обеспечения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава (ЭПС) не менее 21(24) кВ. По опыту проектирования обычно выполнение [6,7] требует увеличения мощности КУ по сравнению с требованием [5] (Q_1) в 1,5 раза. При выполнении требования повышения пропускной способности потребуются ещё больше увеличить мощность КУ (Q_3), расчет которой предлагается в [8]. По опыту проектирования выполнение [8] требует увеличения мощности КУ (Q_3) по сравнению с вариантом (Q_2) ещё в 1,5–2 раза. В настоящее время на сети железных дорог переменного тока таких КУ более 200 установок, практически все они по срокам и физическому состоянию требуют капитального ремонта и соответствующей



модернизации. Поэтому логично в настоящее время обратить внимание на модернизацию существующих КУ с учетом повышения пропускной способности участков, что и рассматривается в настоящей статье.

Как указано, мощность дополнительной секции КУ_д 9, определяется с помощью [8]. Поэтому полная мощность КУ совместно с дополнительной секцией КУ_д определяется

$$Q_3 = (U_{\text{ж}} - U_{\text{мин}}) U_{\text{сгрм}} / X_{\text{вх}}, \quad (1)$$

тогда мощность дополнительной секции КУ_д 9, равна

$$Q_{\text{куд}} = Q_3 - Q_1, \quad (2)$$

где:

$U_{\text{ж}}$ – желательное напряжение на токоприемнике, для повышения пропускной способности участка в зависимости от характера нагрузки $U_{\text{ж}} = 25\text{-}28$ кВ;

$U_{\text{мин}}$ – минимальное напряжение на токоприемнике тяжеловесного состава по расчету;

$U_{\text{сгрм}}$ – номинальное напряжение статического генератора реактивной мощности СГРМ;

$X_{\text{вх}}$ – входное индуктивное сопротивление поста секционирования;

Q_1 и Q_3 – мощности КУ соответственно по нормативу [5] и по условию повышения пропускной способности участка [8].

О необходимости формирования фильтров гармонических составляющих тягового тока.

Для получения тока отнесенного к ПС, к сожалению, нельзя разделить его по измерениям. Действительно, при одинаковых токах ЭПС с двух сторон и при одинаковых расстояниях от ПС ток ПС равен нулю. Под отнесенным током к ПС понимаем ток ПС в данной мгновенной схеме, полученный в результате разложения мгновенных токов межподстанционной сети между тяговыми подстанциями и ПС.

Поэтому для расчета тока ПС используется ток третьей гармоники $I_{(3)}$, характерный для выпрямительного электроподвижного состава (ЭПС), как это предложено в [2]. Как бы не располагались ЭПС и сколько их не было все токи третьей гармоники ЭПС будут замыкаться через КУ ПС, так как сопротивление КУ для третьих гармоник всех электровозов рассматриваемой межподстанционной зоны будет практически равным нулю [1]. Вот почему к трансформатору тока КУ ПС 4 подключен резонансный фильтр на третью гармонику 10 с последовательно включенным реле контроля тока третьей гармоники 11 в КУ



ПС. Отметим, что необходимость включения заграждающего фильтра третьей гармоники диктуется соблюдением режима работы трансформатора тока: так как через него всегда протекает ток первой гармоники, определяемый напряжением на шинах ПС, что исключает режим отсутствия тока во вторичной обмотке трансформатора тока установки поперечной емкостной компенсации.

В КУ ПС будет сосредотачиваться весь ток третьей гармоники тяговой сети, относящийся к ПС, и по его максимальному значению будем далее определять ток первой гармоники тягового тока, по которому следует включать дополнительную секцию КУ.

Однако, для контроля реального тока первой и третьей гармоник тягового тока следует выполнять их замеры на питающей линии контактной сети (на любой питающей, например, на линии с выключателем 12 (рис. 1)).

Необходимость получения токов первой и третьей гармоник диктуется определением отношения указанных токов в тяговой сети при нормальной работе межподстанционной зоны. В тяговом токе преобладают наибольшие значения первая и третья гармонические составляющие. Датчики тока третьей и первой гармоник тока КУ формируются на вторичной стороне трансформатора тока 13 питающей линии, для этого цепь трансформатора тока замыкается на резонансный фильтр третьей гармоники 14 и заграждающий фильтр также третьей гармоники (для получения тока первой гармоники в цепи этого фильтра 15), в цепь которых включены амперметры $A_{(1)}$ 17, и $A_{(3)}$ 16. Для экспериментального определения коэффициента α ($\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}$) следует выполнить на момент измерения одностороннюю схему питания с отключением соседней подстанции (для повышенных значений тяговых токов и $I_{(3)}^*$ и исключения уравнительных токов).

В результате измерений получаем

$$\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}. \quad (3)$$

Для расчетов принимаем среднее значение α по проведенным измерениям. С помощью коэффициента $\alpha_{(3)}$ по формуле (4) определяется ток первой гармоники $I_{(1)}^*$.

$$I_{(1)}^* = I_{(3)}^* / \alpha, \quad (4)$$

где $I_{(3)}^*$ максимальное значение измеренной третьей гармоники тока тяговой сети при отключенной дополнительной секции КУ_д, а $I_{(1)}^*$ –



рассчитанное значение первой гармоники тягового тока, при которой включается дополнительная мощность КУ_д при условии (5),

$$I_{(1)}^* \geq I_{уст}, \quad (5)$$

причем при $I_{(1)}^* \geq I_{уст}$ дополнительная секция КУ_д включена, а при $I_{(1)}^* < I_{уст}$ КУ_д – отключена. При необходимости контролировать емкостную составляющую тяговой нагрузки вместо $I_{(1)}$ и $I_{уст}$ определяются $I_{(1)} \sin \varphi$ и $I_{уст} \sin \varphi$, где $\sin \varphi$ определяется путем измерений на рассматриваемом участке.

Расчетный блок 18 определяет:

– коэффициент третьей гармоники $\alpha = A_{(3)} / A_{(1)}$ при максимальном значении $A_{(3)}$ и отключенной дополнительной секции КУ_д с помощью 16 и 17;

– ток первой гармоники тягового тока, при котором происходит подключение дополнительной секции КУ_д (4) и (5);

– ток уставки $I_{уст}$ для перехода в режим повышения пропускной способности (см. (6)).

Таким образом, различают два режима работы КУ:

1. Режим снижения потерь мощности в тяговой сети с использованием алгоритма регулирования мощности из [2].

2. С повышением тока тяговой сети, отнесенного к ПС (5), следует переходить на второй режим – режим повышения пропускной способности участка.

Предлагаем предварительно установить ток уставки для включения дополнительной секции по мощности КУ Q_1 , определяемой по нормативному документу [5]:

$$I_{уст} = Q_1 / (27,5 \sin \varphi) \quad (6)$$

Здесь введение $\sin \varphi$ в знаменателе определяет уставку для полного значения тягового тока. На каждом реальном участке железной дороги предварительное значение $I_{уст}$ уточняется по реальной загрузке участка, характеру движения поездов и параметрам системы электропитания. Далее по максимальному току третьей гармоники в КУ $I_{(3)}^*$, измеренному при отключенной дополнительной секции КУ_д и среднему значению коэффициенту α определяют ток первой гармоники тяговой нагрузки $I_{(1)}^*$ и при выполнении (5) происходит включение дополнительной секции КУ_д.

Новизна предложенного технического решения заключается в следующем:



1. Регулирование мощности КУ происходит не только для снижения потерь мощности в тяговой сети [2], но и для повышения пропускной способности участка железной дороги, то есть вводится комплексное регулирование мощности.

2. Необходимость введения регулирования мощности для повышения пропускной способности определяется повышенным значением тягового тока, отнесенного к ПС, и при тяговом токе первой гармоники более $I_{уст}$ включают дополнительную секцию КУ_д.

3. Тяговый ток первой гармоники, отнесенный к ПС, определяется путем измерения третьей гармоники тока в КУ и затем рассчитывается по формуле (4) при измеренном коэффициенте гармоники α .

4. Коэффициент третьей гармоники α для расчета первой гармоники тягового тока определяется путем формирования резонансного и заграждающего фильтров третьей гармоники на вторичной обмотке трансформатора тока питающей линии контактной сети ПС.

Работа устройства

Устройство работает по алгоритму [2], то есть эффективно снижает потери мощности в тяговой сети. При повышении тягового тока, отнесенного к ПС до уставки $I_{уст}$ и выше, дается команда на включение дополнительной секции КУ_д. В результате суммарная мощность КУ увеличивается, следовательно, повышается напряжение в тяговой сети и улучшаются условия прохождения тяжеловесных поездов. Как только тяговый ток снижается ($I_{уст} < I_{*(1)}$), что свидетельствует об уменьшении тяговой нагрузки, то дополнительная секция КУ_д отключается. Ток уставки для включения дополнительной мощности КУ_д определяется по выражению (6).

Таким образом, реализуется комплексная система регулирования мощности КУ: до тягового тока $I_{*(1)}$ происходит регулирование мощности КУ для снижения потерь мощности в тяговой сети, а в периоды, когда тяговая нагрузка $I_{*(1)}$ превышает $I_{уст}$ (то есть $I_{*(1)} \geq I_{уст}$) регулирование мощности происходит по закону повышение пропускной способности, то есть подключается КУ_д.

Выводы по работе

Идея комплексной системы регулирования мощности КУ должна быть внедрена на всех существующих КУ (в первую очередь, на ПС), где конденсаторная батарея с реактором включены фильтром на третью гармонику. Однако комплексная система регулирования мощности может быть использована и в других регулируемых КУ, например, в СГРМ [4].



Итак, комплексная система регулирования мощности КУ позволяет повысить пропускную способность железной дороги и сократить потери мощности.

Библиографический список

1. **Герман Л.А., Серебряков А.С.** Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: ФГБОУ УМЦ, 2015. 316 с. [eLIBRARY ID: [27909069](#)]

2. А.с. 628520 СССР. Способ регулирования мощности поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с выпрямительными установками / Герман Л.А.; заявитель Герман Л.А. Оpubл. 13.04.77. Бюл. № 38.

3. Пат. № [2475912 C2](#) Рос. Федерация МПК H02H 3/00, МПК H02H 7/16. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации / Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е., Семенов Д.А.; заявитель и патентообладатель Нижегородский государственный инженерно-экономический институт от 09.03.2011. Оpubл. 20.02.2013. Бюл. № 5. [eLIBRARY ID: [37775810](#)]

4. Переключаемая фильтрокомпенсируемая установка в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. Л. Осокин, Д. В. Якунин // Вестник ВНИИЖТ. 2020. № 2. С. 80–87. DOI: [10.21780/2223-9731-2020-79-2-80-87](#). [eLIBRARY ID: [42769716](#)]

5. Приказ Минпромэнерго РФ от 22.02.2007 № 49 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)».

6. Инструкция о порядке выбора параметров и мест размещения продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока. Утверждена ЦЭ ОАО «РЖД» 28.11.2011.

7. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. СТО РЖД 07.022.2 -2015.

8. **Герман Л.А.** Как разделить питание контактной сети / Локомотив. 2020. № 3. С. 35-36. [eLIBRARY ID: [42466575](#)]

9. **Кучма К. Г., Марквардт Г. Г., Пупынин В. Н.** Защита от токов короткого замыкания в контактной сети: М.: Трансжелдориздат, 1960. 131 с.



THE COMPLEX SYSTEM OF POWER CONTROL OF TRANSVERSE CAPACITIVE COMPENSATION DEVICE IN A SYSTEM WITH DISTRIBUTED LOAD

L.A. German¹, A.S. Serebryakov², V.L. Osokin² and D.E. Dulepov²

¹*Samara State University of Railways, Branch in Nizhny Novgorod*

²*Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino*

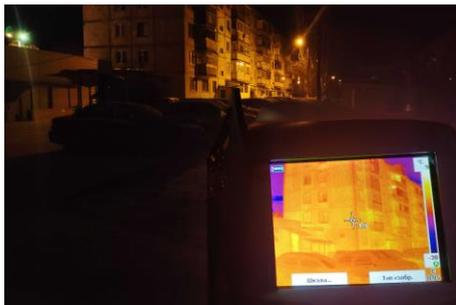
Abstract. The complex system of power control of transverse capacitive compensation device (CD) allows to increase the railroad traffic capacity and decrease power losses in the electrical traction network. The necessity of power control introduction to increase the traffic capacity is caused by the increased value of the traction current which is referred to the sectioning post and when the first harmonic traction current is higher than the current of the devices the additional section of capacitor battery is switched on. The suggested system can be implemented into CD where capacitor battery with reactor is connected through the filter on the third harmonic. It can also be used in other controlled CD, for example, in a static generator of reactive power.

Keywords: transverse capacitive compensation, AC traction network, electrified section of railroad, power losses decrease.



**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ,
ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ**

**ENERGY SAVING
AND ENERGY EFFICIENCY,
POWER ECOLOGY**



УДК 621.577.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ НА ТЭЦ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ

Канд. техн. наук, доц. **Аникина И.Д.**Аспирант **Калмыков К.С.***Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, г. Санкт-Петербург*

***Аннотация.** В статье был произведен укрупненный расчет и анализ типовых решений совершенствования тепловых схем теплофикационных установок теплоэлектроцентрали с поперечными связями на примере I очереди Автовской ТЭЦ-15 г. Санкт-Петербурга. В качестве направления оптимизации схемы ТФУ ТЭЦ-15 выбрано применение парокompрессионных тепловых насосов, а также абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов для снижения тепловой нагрузки бойлеров деаэрационной установки. В качестве источника низкопотенциальной теплоты рассмотрена обратная сетевая вода, в качестве потребителя – подпиточная вода теплосети.*

***Ключевые слова:** энергоэффективность, тепловой насос, теплоэлектроцентраль, ТЭЦ, подпиточная вода, сбросная теплота*

Обычно теплоэлектроцентраль, будучи производственным объектом, обладает достаточно большим количеством низкопотенциальных источников теплоты. Использование низкопотенциальной теплоты с помощью таких теплоутилизационных установок, как тепловые насосы, дает возможность повышения эффективности процесса производства электрической и тепловой энергий [1].

В большинстве исследований использование тепловых насосов (ТН) на ТЭЦ предполагается для схем с техническим водоснабжением, обладающих достаточным количеством сбросной теплоты для ее возврата в цикл. Эффективность же внедрения ТН в схемах с дефицитом сбросной теплоты мало изучена и требует дополнительных исследований.

Цель работы: произвести анализ эффективности включения различных типов ТН в состав теплофикационной установки (ТФУ) ТЭЦ с поперечными связями, работающей в режиме дефицита сбросной теплоты.



Задачи:

1. Выбор оптимальных схемных решений для включения ТН в состав ТФУ ТЭЦ с поперечными связями в условиях работы дефицита сбросной теплоты.

2. Смоделировать работу реальных паротурбинных установок (ПТУ) в составе ТЭЦ с интегрированными для подогрева подпитки ТН и без.

3. Сравнить эффективность работы ТН различных типов и проанализировать влияние и целесообразность включения ТН на экономичность работы паротурбинной установки (ПТУ).

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбрана I очередь ТЭЦ Автовской ТЭЦ-15 филиала Невский ПАО «ТГК-1» г. Санкт-Петербург.

В котельном отделении установлены 5 котлоагрегатов типа ТП-170. В машинном отделении расположены 3 паровые турбины типа Т-22-90 (ТГ-1, 4, 5) и 2 паровые турбины типа ПТ-30-8,8 (ТГ-2, 3). I очередь ТЭЦ имеет поперечные связи по свежему пару, питательной воде, а также по отборному пару на сетевые бойлера. ПТУ первой очереди работают в режиме полного использования теплоты: в качестве охлаждающей воды конденсатора для ТГ-1,5 используется ОСВ, для ТГ-2,3,4 – подпиточная вода теплосети.

Расчеты производились для турбины ПТ-30 ввиду того, что схема включения абсорбционного теплового насоса (АБТН) с отбором греющего пара в генератор ТН предпочтительна для ПТУ с производственным отбором, а также ввиду того, что данные установки находятся в работе наиболее длительный период в течении года.

Выбор ИНТ и потребителей теплоты

В качестве источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) для ТН на ТЭЦ-15 рассматривались два варианта: обратная сетевая вода (ОСВ) и вода в системах охлаждения (охлаждающая вода конденсатора паровой турбины и техническая вода).

Выбор в качестве ИНТ ОСВ позволяет снизить температуру на входе в сетевые бойлера с соответствующим снижением коэффициентов недовыработки электроэнергии. Также потенциал теплоты данного источника по сравнению с охлаждающей системой технического водоснабжения в течение года постоянен. Следует, однако, понимать, что это не сбросная теплота, и возврат данной теплоты в цикл – обязательное условие нормального функционирования схемы.



Выбор в качестве ИНТ охлаждающей воды в прямоточной системе технического водоснабжения позволяет снизить количество сбросной теплоты (понижив температуру сбросной воды), и, как следствие, улучшить экологические показатели станции. Недостатком данного источника является нестабильность в течении года для рассматриваемой станции – при выключении из работы II очереди расходы охлаждающей воды будут определяться только расходами технического водоснабжения I очереди.

В данной работе рассматривается использование полученной от ТН теплоты для подогрева подпиточной воды теплосети после конденсаторов паровых турбин перед системой вакуумного деаэрирования воды. Эта система состоит из последовательно расположенных бойлера холодной подпитки (БХП), вакуумного деаэрата (ВД) и бойлера горячей подпитки (БГП). БХП и БГП, соответственно, служат для обеспечения необходимого температурного уровня подпиточной воды до ВД. Нагрев в БХП и БГП производится с помощью отборов пара из коллектора 1,2 ата.

Преимуществом данного потребителя является снижение расхода отборного пара с высоким коэффициентом недовыработки на подогреватели БХП и БГП. В качестве недостатков данного потребителя можно выделить следующее:

- 1) ограничения мощности, связанные с режимами работы вакуумных деаэраторов [1];
- 2) зависимость от режимов работы конденсаторов паровых турбин, греющих подпиточную воду до ТН.

Моделирование интеграции ТНУ

В связи с вышеизложенными фактами для исследований были выбраны две схемы включения ТНУ в составе первой очереди: пароконденсационный ТН (ПКТН) (см. рис. 1а) и АБТН (см. рис. 1б) для подогрева подпитки теплосети для вытеснения тепловой нагрузки БХП и БГП, в качестве ИНТ – ОСВ. Расчеты производились для характерного зимнего режима с малыми отопительными нагрузками. Температура питательной воды с расходом 600т/ч на входе в конденсатор паровой турбины составила 1,0°C. Температура ОСВ на входе в испаритель теплового насоса – 50,1°C.

Моделирование режимов работы производилось с помощью САПР «United Cycle» (Россия) [2, 3], в котором были созданы имитационные модели без ТН (фактическая схема) и модели с включением ТН мощностью 11 МВт на различных участках схем.



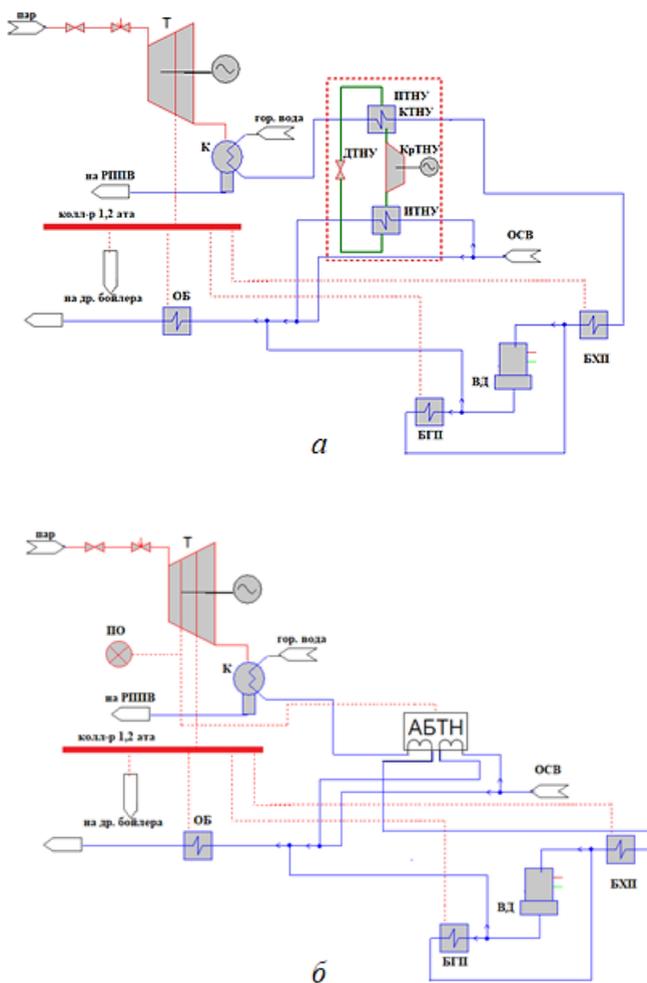


Рис. 1. Схемы включения ПКТН (а) и АБТН (б) в состав I очереди ТЭС-15:
 Т- турбина; К- конденсатор; ПКТН – парокompрессионный ТН; КТНУ – конденсатор ТН; ДТНУ – дроссельное устройство ТН; КрТНУ – компрессор ТН; ИТНУ – испаритель ТН; РППВ – регенеративный подогрев питательной воды; ОСВ - обратная сетевая вода; ОБ – основной бойлер; БХП – бойлер холодной подпитки; ВД – вакуумный деаэрактор; БГП – бойлер горячей подпитки; ПО – производственный отбор; АБТН – абсорбционный ТН

В качестве расчетной схемы ПКТН была выбрана схема одноступенчатого теплового насоса, работающего на озонобезопасном фреоне R134a [4], который получил широкое распространение. Для оценки характеристик ПКТН использовалась программа «CoolPack» (Дания).

При моделировании АТНУ использовались данные российского производителя АТНУ ООО «ОКБ Теплосибмаш» [5], в качестве исходных брались данные для ТН типа АБТН-4000П. Мощность АБТНУ – 11 МВт, параметры отборного пара: $P_{абс}=0,5$ МПа; $T=152^{\circ}\text{C}$.

Результаты моделирования

Сравнение режимов работы АБТН, ПКТН с базовым режимом приведено в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Сравнение режимов работы АТНУ и ПТНУ в составе I очереди

Параметр	Ед. измерения	Значение параметра		
		Базовый режим	Режим ПТНУ	Режим АТНУ
Выработка электроэнергии	МВт	30,00	30,22	30,15
Суммарный отпуск тепла в воде	Гкал/ч	57,42	58,70	57,12
Тепловая нагрузка ПО	Гкал/ч	20,00	20,00	26,59
Температура воды на выходе с конденсатора ПТ	$^{\circ}\text{C}$	23,83	23,43	32,13
Давление в конденсаторе ПТ	кг/см ²	0,04	0,04	0,06
Расход пара, поступающего в конденсатор ПТ	т/ч	18,45	20,40	33,50
Тепловая нагрузка БХП	Гкал/ч	18,05	0,00	0,00
Тепловая нагрузка БГП	Гкал/ч	3,55	12,36	7,15
Расход пара на БХП	т/ч	33,85	0,00	0,00
Расход пара на БГП	т/ч	6,66	23,18	13,30
Расход ОСВ на входе в испаритель ТНУ	т/ч	-	331,00	600,00
Температура ОСВ на выходе из испарителя ТНУ	$^{\circ}\text{C}$	-	25,86	45,02
Тепловая нагрузка испарителя ТНУ	Гкал/ч	-	8,03	3,05
Расход греющего пара в генератор ТНУ	т/ч	-	-	9,9
Заграты на привод компрессора ТНУ	МВт	-	1,41	-
Температура подпиточной воды: на входе в ТНУ на выходе из ТНУ	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$	- -	23,43 39,33	32,13 48,03
Коэффициент преобразования энергии (ПКТН)/Коэффициент трансформации (АБТН)	-	-	6,81	1,75



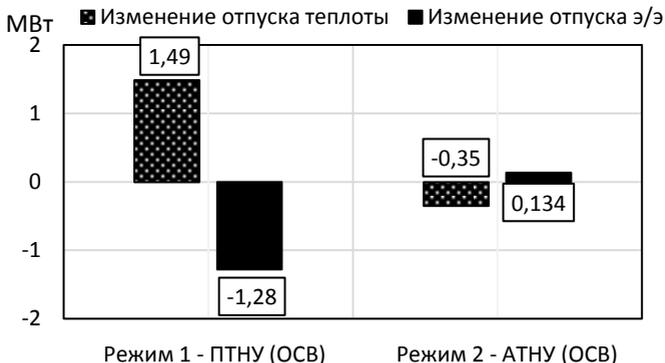


Рис. 2. Влияние интеграции ТНУ

Выводы

Расчеты показали, что внедрение ТН в состав основного оборудования I очереди Автовской ТЭЦ-15 не дает значительного положительного эффекта.

При тарифе на отпуск теплоты 788,47 руб./Гкал и средней стоимости покупки электрической энергии на собственные нужды 1105,13 руб./(МВт·ч) (данные ПАО «ТГК-1» на первый квартал 2020 года) экономические эффекты от внедрения ТН в состав ТЭЦ-15 составили -3,42 млн. рублей и -1,34 млн. рублей для ПКТН и АБТН, соответственно. Экономический эффект рассчитывался для характерного для Санкт-Петербурга отопительного периода (220 дней).

Отрицательные результаты связаны, в первую очередь, с отсутствием достаточного потенциала сбросной теплы на очереди для использования в ТН и вынужденным применением в качестве источника низкпотенциального тепла для ТН ОСВ. Для ПТУ, работающих в режиме полного использования теплоты, снижение температуры обратной сетевой воды за счет применения ТН не дает значительного повышения эффективности и улучшения технико-экономических показателей ТЭЦ.

Применение ПКТН в схеме теплоснабжения с малым расходом подпитки нецелесообразно, так как возрастающие затраты на собственные нужды ТН (ввиду возрастания температурного перепада между испарителем и конденсатором ТН) перекрывают выгоду от увеличения выработки электроэнергии, если таковая имеет место быть.

Что касается АБТН, при небольшом значении дополнительных вспомогательных потребностей (всего 0,016 МВт для привода конденсатного насоса генератора АБТН) отбор пара из ПТУ для генератора АБТН снижает конечную выработку электроэнергии в генераторе паровой турбины. Вероятно, используя АБТН с газовым, а не паровым обогревом, можно было бы повысить итоговое значение выработки электроэнергии. Однако при одинаковой тепловой производительности энергопотребление АБТН с газовым обогревом выше [6,7]. В качестве газа для обогрева взамен природного вполне возможно использование выхлопных газов котлоагрегатов с температурой до (100-140)°С.

Библиографический список

1. **Боровков В. М. Аль Алавин А.А.** Эффективность применения тепловых насосов на тепловых электростанциях с парогазовыми установками: Учеб. пос. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008 263 с. [eLIBRARY ID: [19576856](#)]
2. Software United Cycle for Simulation of Flow Sheets of Power Plants / S. Romanov, A. Kutakhov, N. Zhuk et al. // ECOS-2003. Kopenhagen, 2003. P. 1691-1696.
3. **Аникина И.Д., Калмыков К.С.** Использование теплонасосных установок для повышения эффективности работы ПГУ-ТЭЦ // Современные технологии и экономика в энергетике (МТЭЕ – 2020): Мат. межд. научно-практ. конф. СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 65-68. [eLIBRARY ID: [43148160](#)]
4. Efficiency of using heat pumps with various refrigerants in real steam turbine power units with PT-80 and T-250 turbines / V. Sergeyev, I. Anikina, K. Kalmykov, I. Naletov// E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 140. P. 10001. DOI: [10.1051/e3sconf/201914010001](#). [eLIBRARY ID: [42765653](#)]
5. Абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы ТЕПЛОСИБМАШ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplosibmash.ru/catalog/id/7/> (дата обращения 20.10.20).
6. **Попов А.В.** Абсорбционные бромистолитиевые машины для охлаждения и нагрева воды // Энергосбережение. 2007. № 7. С 52-55.
7. Промышленный опыт и перспективы использования отечественных абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин и тепловых насосов нового поколения / В.Г. Горшков, А.Г. Паздников, Д.Г. Мухин, Р.В. Севастьянов // Холодильная техника. 2007. № 8. С. 23-29. [eLIBRARY ID: [11625291](#)]



USE OF HEAT PUMPS IN CHP WITH CROSS-CONNECTIONS IN A CONTEXT OF WASTE HEAT DEFICIT**I.D. Anikina and K.S. Kalmykov***Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg*

Abstract. The article presents the enlarged calculation and analysis of typical solutions of cogeneration plant's heat network of CHP with cross-connections using the first phase of Avtovo CHP in Saint-Petersburg as an example. As a way of CHP-15 cogeneration plant scheme optimization use of vapor compression heat pumps has been chosen and also lithium bromide absorption heat pumps to decrease the heat load of boilers in the deaeration plant. As a source of low-grade heat, a return heating water has been considered, and as a consumer – feed water of heating network.

Keywords: energy efficiency, heat pump, co-generation plant, CHP, feed water, waste heat.



УДК 621.1

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ R1234YF, R1234ZE ДЛЯ ПАРОКОМПРЕССИОННОЙ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Ассистент **Байда Б.Ю.**¹Канд. техн. наук, проф. **Карнаух В.В.**¹Д-р техн. наук, проф. **Бирюков А.Б.**²¹ Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк² Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

***Аннотация.** В данной работе проведено исследование энергетической и эксергетической эффективности системы парокомпрессионного теплового насоса для обеспечения горячего водоснабжения. Особенностью исследования является сравнительный анализ эффективности теплонасосных систем, работающих на хладагентах третьего (ГФУ) и четвертого (ГФО) поколения. Результаты исследований доказывают эффективность применения холодильных агентов группы ГФО.*

***Ключевые слова:** тепловой насос, термодинамический анализ, эксергетический анализ, горячее водоснабжение, гидрофторуглероды, гидрофторолефины.*

Ввиду постоянного растущего интереса к экологически безопасной энергетике, направленной на сохранения топливно-энергетических ресурсов, актуальной является задача внедрение теплотрансформаторов и других энергосберегающих технологий.

После принятия Монреальского протокола, большинство рабочих тел, используемых в холодильных установках и тепловых насосах, были запрещены в связи с высоким потенциалом разрушения озонового слоя (ODP). В 2010 году было полностью прекращено использование хлорфторуглеродов (ХФУ) и гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ) [1].

Гидрофторуглероды были предложены в качестве замены ХФУ и ГХФУ. Однако данная группа хладагентов обладает высоким потенциалом глобального потепления (GWP), что отмечено в докладе "Гидрофторуглероды" Киотского протокола [2]. Чтобы остановить это явление, были введены правила, которые запрещают применения или регулируют налогообложение жидкостей, создающих парниковый эффект (в том числе ГФУ).



Принимая во внимание вышеизложенное, следующее поколение холодильных агентов должно иметь нулевой показатель разрушения озонового слоя и низкий уровень потенциала глобального потепления.

На сегодняшний день компаниями DuPont и Honeywell разработаны холодильные агенты четвертого поколения, которые относятся к группе гидрофторолефинов (ГФО). Основными ГФО-хладагентами являются R1234ze и R1234yf. Это чистые вещества одного класса, состоящие из водорода, фтора и ненасыщенного углерода. Они оба обладают низкой воспламеняемостью и обладают очень низким GWP.

Цель работы – сравнительный термодинамический и эксергетический анализ эффективности теплонасосных систем для горячего водоснабжения, использующих хладагенты группы ГФО и ГФУ.

Методология исследования заключается в проведении энергетического и эксергетического анализа работы парокompрессионного теплового насоса (ПКТН), согласно методике [3].

Целью энергетического анализа – является определение параметров эффективности работы исследуемой системы. Основными показателями энергетической эффективности выступают удельная тепловая нагрузка теплового насоса ($q_{тн}$), коэффициент преобразования теплоты (μ) [4].

Удельная тепловая нагрузка теплового насоса:

– для схемы с регенеративным теплообменником

$$q_{тн} = q_k, \text{ кДж/кг} \quad (1)$$

– для схемы с регенеративным теплообменником и переохладителем

$$q_{тн} = q_k + q_{по}, \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

где: q_k – удельная тепловая нагрузка конденсатора, кДж/кг; $q_{по}$ – удельная тепловая нагрузка переохладителя, кДж/кг.

Коэффициент преобразования теплоты:

$$\mu = \frac{q_{тн}}{l_{сж}} \quad (3)$$

Термодинамический метод основан на интегральных показателях и сводится к анализу вышеуказанных коэффициентов.

Очевидно, что помимо интегральных показателей важна информация, касающаяся термодинамической эффективности отдельных узлов установки. Для этой цели применяется метод эксергетического



анализа, позволяющего проанализировать эффективность каждого отдельно взятого элемента теплового насоса [5] .

Эксергетический анализ позволяет качественно оценить тепловые потоки, протекающие в теплонасосной системе, степень несовершенства работы термодинамической системы. Основным показателем эффективности системы является эксергетический КПД ($\eta_{\text{э}}$).

В рамках проведенного исследования были выполнены расчеты для двух схем подключения ПКТН: с регенеративным теплообменником (РТО), с РТО и переохладителем с варьированием температуры окружающей среды.

Исходные данные.

Объект исследования – парокompрессионная теплонасосная установка для горячего водоснабжения. Источник низкопотенциального теплоты – воздух. В качестве рабочего вещества были рассмотрены: R134a, R1234ze, R1234yf. Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Наименование параметра	Значение
Тепловая нагрузка $Q_{\text{тн}}$	12 кВт
Температура низкопотенциального теплоносителя (воздуха) на входе в тепловой насос $t_{\text{н1}}$	25°C
Температура низкопотенциального теплоносителя после теплового насоса $t_{\text{н2}}$	20°C
Температура высокопотенциального теплоносителя (воды) на входе в тепловой насос $t_{\text{в1}}$	35°C
Температура горячей воды после теплового насоса $t_{\text{в2}}$	65°C
Температура окружающей среды t_0	-20...20°C
Перепады температур на выходе из теплообменников $\Delta t_{\text{н}}, \Delta t_{\text{к}}, \Delta t_{\text{по}}$	5°C
Температура перегрева пара в промежуточном теплообменнике $\Delta t_{\text{п}}$	20°C

Все расчеты были выполнены с использованием программного обеспечения REFPROF ver. 9.0, MS Excel, CoolPack 1.49.

Результаты исследования представлены в виде диаграмм и графиков. На рис. 1. представлена диаграмма зависимости схемы подключения ПКТН от коэффициента преобразования теплоты μ при температуре окружающей среды равной -10°C.



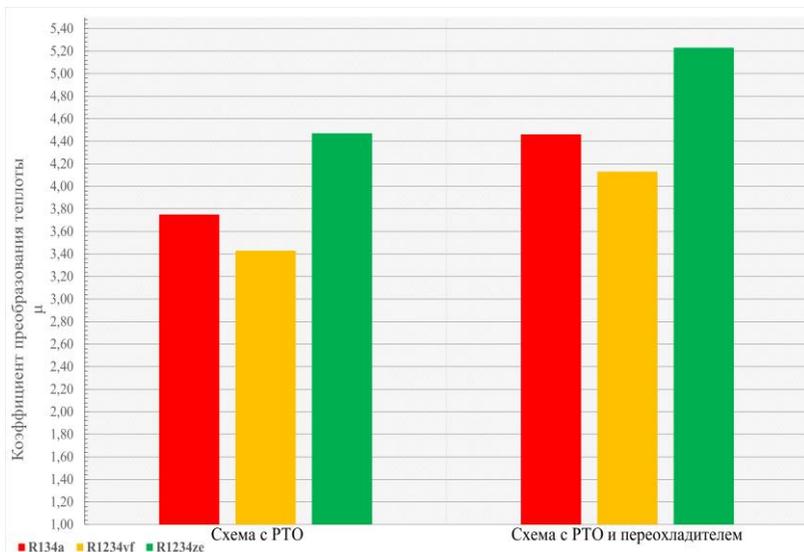


Рис. 1. Диаграмма зависимости коэффициента преобразования теплоты от ПКТН

Проведя анализ полученных данных, изображенных на рис. 1 делаем следующие выводы: наибольший коэффициент преобразования теплоты достигается в схеме с переохладителем и рекуперативным теплообменником (ПТО); прирост относительно схемы с промежуточным теплообменником – 16%; оптимальным для исследуемых условий является хладагент R1234ze.

Разница значений коэффициента μ между R1234ze и R1234yf составляет 23% для схемы с ПТО и 21% для схемы с ПТО и переохладителем. Также наблюдается существенный прирост коэффициента μ в случае перехода с традиционного хладагента R134a на ГФО хладагент R1234ze, в условиях схемы с ПТО и переохладителем ПКТН с рабочим веществом R1234ze будет на 15% эффективнее, чем аналогичная система на хладагенте R134a.

На рис. 2. изображена аналогичная диаграмма зависимости схемы подключения ПКТН от эксергетического КПД (η_e), на которой видно, что наиболее эксергетически совершенны системы, работающие на хладагенте R1234ze.

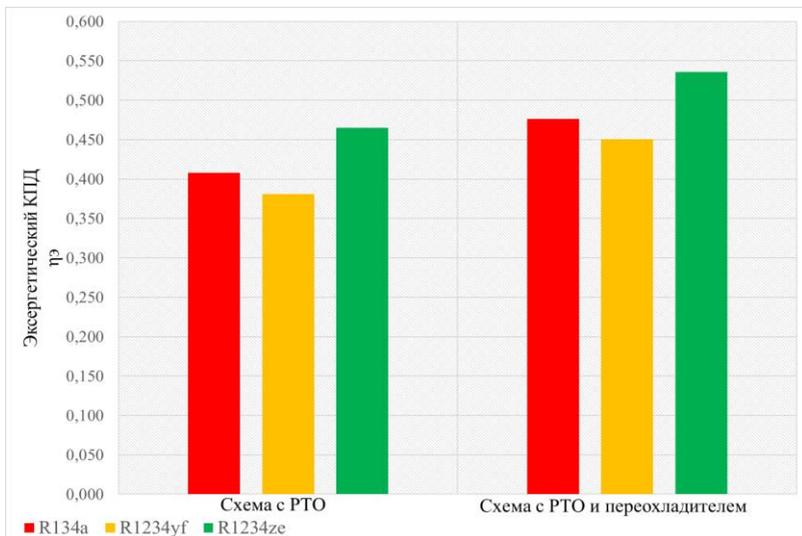


Рис. 2. Диаграмма зависимости эксергетического КПД от схемы работы ПКТН

Разница между R134a и R1234ze составляет 15% в схеме с РТО и 11% в схеме с РТО и переохладителем. Проанализировав представленные данные, можно сделать вывод – применение РТО и переохладителя увеличивает эксергетический КПД на 12%.

В результате эксергетического анализа были определены наиболее несовершенные узлы ПКТН, степень совершенства характеризуется величиной эксергетических потерь в отдельно взятом узле термотрансформаторной системы. Наименьшие эксергетические потери наблюдаются в системах с рабочим веществом R1234ze, самыми несовершенными узлами являются конденсатор и компрессор.

На рис. 3 представлен график, демонстрирующий прямолинейную зависимость коэффициента преобразования теплоты от температуры окружающей среды. Данная зависимость коррелирует с уже известными работами, затрагивающими взаимосвязь между t_0 и μ [6].

Как видно на графике, R1234ze на 25% эффективнее, чем R134a, и на 28% эффективнее R1234yf, что соответствует данным [7]. Шаг изменения μ составляет в среднем 0.043 на каждые 5 градусов.

На рис. 4. отображен график зависимости эксергетического КПД от температуры окружающей среды.

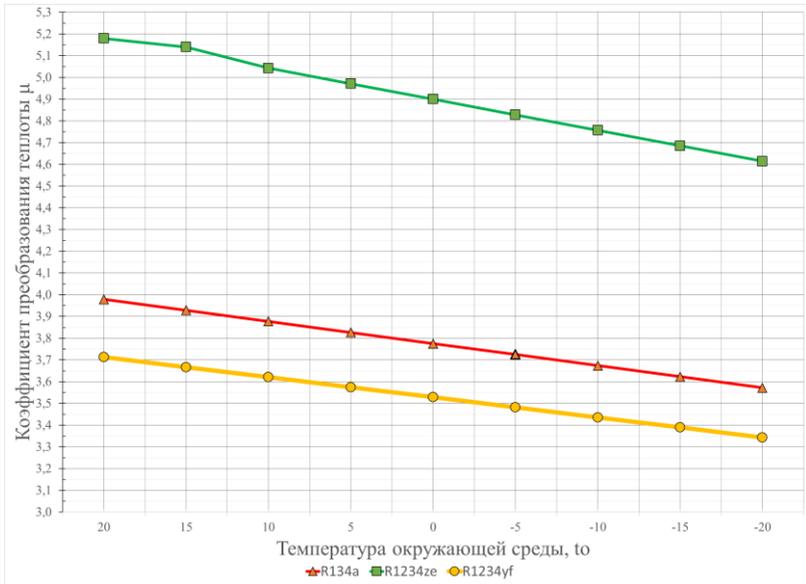


Рис. 3. График зависимости μ от t_0 для схемы с РТО и переохладителем

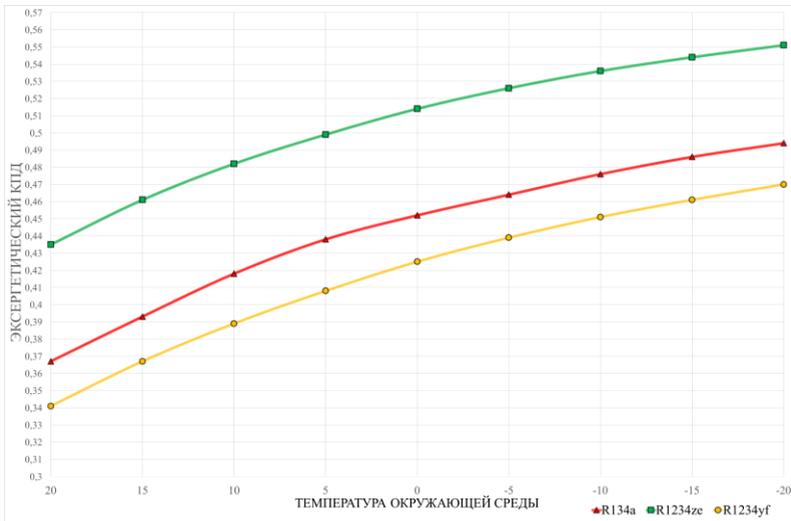


Рис. 4. График зависимости η_3 от t_0 для схемы с РТО и переохладителем

Проанализировав данный график можно сделать вывод, что зависимость η_p от t_0 носит обратно пропорциональный характер: с увеличением температуры окружающей среды эксергетический КПД системы уменьшается. Наиболее высокий показатель эксергетического КПД у R1234ze, эксергетический КПД η_p хладагента R1234ze на 10.5% выше, чем у R134a, и на 15% выше, чем у R1234yf.

Выводы по работе

ПКТН на хладагенте R1234ze демонстрируют наиболее высокие показатели термодинамической эффективности и имеют наименьшие эксергетические потери. При проектировании термотрансформаторных систем особое внимание стоит уделить конструкции конденсатора и компрессора. Приоритетной схемой подключения ПКТН является схема с промежуточным теплообменником и переохладителем. Определена зависимость температуры окружающей среды от термодинамической и эксергетической эффективности работы ПКТН.

Как показали результаты исследования хладагенты группы ГФО R1234yf, R1234ze являются перспективной заменой R134a. R1234yf во многих показателях термодинамической эффективности уступает R134a, однако разница незначительная, а в дальнейшем возможно повышение термодинамической эффективности R1234yf путем модернизации узлов ПКТН для данного хладагента. Доказана целесообразность системы, работающей на R1234ze.

Библиографический список

1. Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer [Электронный ресурс] / United Nations Environment Program (UNEP). 1997. URL: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol/montreal-protocol-substances-deplete-ozone-layer> (дата обращения 20.10.2020).
2. Kyoto Protocol, Report of the Conference of the Parties, United Nations Framework Convention on Climate Change [Электронный ресурс] // UNFCCC. 1997. URL: <https://unfccc.int/documents/2409> (дата обращения 20.10.2020).
3. **Трубачев П.А., Гришко Б.М.** Тепловые насосы: уч. пос. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 142 с. [eLIBRARY ID: [19579365](#)]
4. **Trubaev, P.A.** Exergy analysis of thermal processes in the building materials industry // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2006. Vol. 40(2). P. 175–182. DOI: [10.1134/s0040579506020102](https://doi.org/10.1134/s0040579506020102). [eLIBRARY ID: [13518853](#)]
5. Comparative analysis of different refrigerant using in the high temperature vapor-compression heat pump / V.V.Karnaukh, V.A.Mazur, A.B.Biryukov, K.A.Rzhesik // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2017. Vol. 18(3). P. 161-174. DOI: [10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017022821](https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017022821). [eLIBRARY ID: [35701698](#)]



6. Trade-off working fluid selection for heat pumps / V.V.Karnaukh, V.A.Mazur, A.B.Biryukov, K.A.Rzhesik // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 791. P. 012066. DOI: [10.1088/1757-899X/791/1/012066](https://doi.org/10.1088/1757-899X/791/1/012066). [eLIBRARY ID: [43283110](https://elibrary.ru/43283110)]

7. A review of refrigerant R1234ze(E) recent investigations / A.Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbrí, F. Molés et al. // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 95. P. 211-222. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2015.09.055](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.055).



ENERGY AND EXERGY STUDY OF FREON'S R1234YF AND R1234ZE FOR A VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP UNIT

B.Yu. Baida¹, V.V. Karnauh¹ and A.B. Biryukov²

¹*Donetsk National University of Economy and Trade named after Mykhajlo Tugan-Baranovskogo, Donetsk*

²*Донецкий национальный технический университет, Donetsk*

Abstract. This paper has carried out the study of the energy and exergy effectiveness of vapor compression heat pump system for hot water supply. Specific of the study is in the comparative analysis of heat pump systems efficiency which operates on refrigerants of third (hydrofluorocarbons HFC) and fourth (hydrofluoroolefins HFO) generation. The study results have proven the effectiveness of the refrigerant agents of HFO group use.

Keywords: heat pump, thermodynamic analysis, hot water supply, hydrofluorocarbons, hydrofluoroolefins.



УДК 567:78

КАЧЕСТВО ВОДНОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ГИДРОБИОНТОВ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

канд. биол. наук, доц. **Говоркова Л.К.**канд. хим. наук **Анохина О.К.***Казанский государственный энергетический университет*

***Аннотация.** Наиболее масштабное однократное употребление воды - производство электроэнергии, в котором вода используется главным образом для охлаждения и конденсации пара, вырабатываемого турбинами тепловых электростанций. При этом вода нагревается в среднем на 7°C, после чего сбрасывается непосредственно в реки и озера, являясь основным источником дополнительного тепла - «теплового загрязнения водоемов». Науке известно огромное количество загрязнителей природных вод, которое пагубно влияет на здоровье населения, ведет к гибели рыб, водоплавающих птиц и других животных, а также к гибели растительного мира водоёмов. При этом не только ядовитые химические и нефтяные загрязнения, но и избыток органических и минеральных веществ, поступающих со смывом удобрений с полей, опасны для водных экосистем. Проблема сохранения качества воды является на данный момент самой актуальной.*

***Ключевые слова:** энергетика, химическое загрязнение, тепловое загрязнение, гидробионты, тяжелые металлы, качество водной среды.*

1. Введение

Потребление энергии является обязательным условием существования человечества. Наличие доступной для потребления энергии всегда было необходимо для удовлетворения потребностей человека, увеличения продолжительности и улучшения условий его жизни. Среди природных богатств человечества большое значение имеют водные ресурсы, которые вовлекаются в общественное производство во всевозрастающих масштабах. Интенсивное развитие промышленности, сельского хозяйства, рост народонаселения служат причиной загрязнения водоемов, в них сбрасываются индустриальные, сельскохозяйственные и бытовые стоки [1, С. 32]. Загрязнения водоемов сточными водами может вызвать устойчивое загрязнение воды и пагубно влиять на фауну и флору водных источников. При этом портятся товарные качества рыбы как пищевого продукта, гибнет молодь и пищевые ор-



ганизмы, снижается продуктивность водоемов. Загрязнение водоемов может сказываться и на здоровье людей в виде инфекционных заболеваний и отравлений. Особенно опасны сбросы в водоем неочищенных или недоочищенных сточных вод, содержащих токсические вещества [2, С. 36].

Одной из наиболее острых и актуальных экологических проблем водоемов-охладителей объектов энергетики является их тепловое загрязнение. Мощные электростанции заметно нагревают воды в водоемах, на которых они расположены. Происходит это в результате поступления термически нагретых вод, сбрасываемых после охлаждения энергетического оборудования. Повышение температуры воды в водоеме, приводит к разрастанию сине-зеленых водорослей, в результате чего уменьшается концентрация растворенного в воде кислорода. Это является причиной гибели обитателей водоемов, не терпящих высокие температуры. Повышение температуры воды может привести к угнетению водных организмов, а при ограничении кормовой базы или превышении пороговых (летальных) температур к их гибели [3, С. 187].

Ухудшение кислородного режима водоемов-охладителей, приводящее к смерти рыб, приводит к сокращению численности стада ценных рыб и последующей замене ценных видов на сорные [4, С. 98]. Общее ухудшение характеристик среды обитания приводит к возникновению эпизоотий и появлению алиментарных болезней.

Воздействие многочисленных и мощных источников антропогенного химического, биологического и теплового загрязнения в условиях зарегулированного стока способствуют накоплению биомассы водорослей, среди которой значительная часть представлена цианобактериями. Отмирание и разложение в конце вегетации на ограниченных участках акватории водоема водной растительности приводит к резкому снижению кислорода в воде. Снижение pH водной среды способствует увеличению растворимости и подвижности ионов тяжелых металлов, их десорбции из донных отложений водоема-охладителя, перехода в воду токсичных солей тяжелых металлов. Из донных отложений увеличивается и поступление фосфора в водную среду, ускоряется процесс эвтрофирования [5, С. 35, 6, С. 185].

Химическое загрязнение является главным, как по масштабам распространения, так и по силе воздействия и приносит очень большой вред водоемам. К наиболее опасным химическим загрязнителям окружающей среды относятся ионы тяжелых металлов. Это обусловлено, прежде всего, их высокой токсичностью по отношению к гидробионтам и человеку. Опасность усугубляется тем, что металлы не подвер-



гаются химической и биологической деградации, как это свойственно органическим токсикантам, поэтому, попав однажды в окружающую природную среду, они лишь перераспределяются между биотическими и абиотическими звеньями, изменяя форму нахождения и взаимодействуя с различными категориями живых организмов [7, С. 86]. Особая опасность накопления тяжелых металлов в водоемах в том, что они сохраняются постоянно при любых условиях.

Ухудшение качества воды в загрязненных водоемах оказывает отрицательное влияние на условия нагула, питания, нереста рыб, снижает эффективность их естественного воспроизводства и, следовательно, численность популяции в целом [8, С. 71]. Наблюдается также снижение качества продуктов переработки промысловых рыб вследствие аккумуляции в их организмах различных токсикантов. Нефтепродукты, наряду с тяжелыми металлами, являются опасными загрязнителями водоемов. Они отличаются большой стойкостью, благодаря чему сохраняются в водоеме годами, не утрачивая своих ядовитых свойств [9, С. 99].

Способность водоемов к самоочищению не безгранична, и охрана их от загрязнения невозможна без максимального обезвреживания сточных вод. Если бы сточные воды не подвергались очистке, в считанные месяцы экосистемы внутренних водоемов полностью бы деградировали. Поэтому сброс неочищенных стоков повсеместно запрещен, требуемая степень очистки регламентируется законодательством. С помощью физических, химических и биологических методов сточные воды на очистных сооружениях доводятся до состояния, отвечающего определенным гигиеническим и биологическим требованиям. Различные вещества, остающиеся в сточной воде, не должны находиться в количестве, превышающем предельно допустимые концентрации (ПДК). Установление ПДК ведется с учетом гигиенических требований и интересов охраны экосистемы водоемов [1, С. 12].

2. Материалы и методы

Целью исследований, результаты которых изложены в данной работе, явилось определение влияния сточных вод Ульяновской ТЭЦ-1 на качество вод р. Свияги. Качество вод оценивалось по химическим и гидробиологическим показателям. В связи с этим были отобраны пробы воды и грунта в р. Свияге, а также гидробиологические пробы в весеннее-осенний период 2018-2019 годы. Пробы отбирались на разных станциях выше и ниже выпуска сточных вод Ульяновской ТЭЦ-1 (УТЭЦ-1).



Отбор, фиксация и хранение проб воды и грунта, а также определение в них тяжелых металлов производили в соответствии методическими указаниями [10, С. 56, 11, С. 17].

Отбор, фиксация, хранение гидробиологических проб, а также определение их качественного и количественного состава проводилось по стандартной методике [12, С. 123, 13, С. 7].

3. Результаты

В начале декабря 1946 года при автомобильном заводе была построена первая в Ульяновске теплоэлектроцентраль. С годами, постоянно расширяясь и совершенствуясь в соответствии с возрастающими потребностями города в тепле и электроэнергии, УТЭЦ-1 превратилась в мощное предприятие.

В 1973 году УТЭЦ-1 перешла на газ как на основной вид топлива. В настоящее время установленная электрическая мощность УТЭЦ-1 составляет – 435 МВт, установленная тепловая мощность – 1539 Гкал/час. ПП «Ульяновская ТЭЦ-1» Ульяновского филиала ОАО «Волжская ТГК» расположено в западной части г. Ульяновска на левом берегу р. Свияга на территории промышленной зоны (рис. 1).



Рис. 1. Участок р. Свияги в районе Ульяновской ТЭЦ-1

Ближайшая жилая застройка находится на расстоянии более 500м от границ промплощадки Ульяновской ТЭЦ-1. Площадь территории, арендуемой предприятием, составляет 93,246204га. На Ульяновской ТЭЦ-1 действует оборотная система водоснабжения с градирнями, используемая для охлаждения технологического оборудования, включающая две башенные градирни, площадью орошения 3200 м² (производительностью 25000 м³/час) и 1600 м² (производительностью 12500 м³/час). Циркуляционная вода четырьмя циркуляционными насосами типа 48Д-22 подается в цикл технического водоснабжения. При работе оборотной системы теряется некоторое количество воды, которое складывается из затрат циркуляционной воды на унос и испарение с градирен, продувки оборотной системы. Для восполнения потерь используется техническая вода, забираемая с Волжского водовода технической воды по договору с УМУП «Ульяновскводоканал». В реку Свяга сбрасываются сточные воды после механической очистки (отстоя) на отстойнике минерализованных стоков.

В составе сточных вод в водоемы сбрасывается большое количество различных загрязняющих веществ, которые включаются в трофические цепи и круговорот веществ. Поэтому для сохранения окружающей среды на УТЭЦ-1 были введены очистные сооружения. Формирование гидрохимического режима р. Свяги происходит под влиянием поверхностного и грунтового стока. Содержание кислорода в поверхностных и глубинных горизонтах р. Свяги не понижалось ниже 4,5-5,5 мг О/л, т.е. соответствовало нормативным значениям. Свяга относится к рекам с повышенной минерализацией (гидрокарбонатный характер с преобладанием ионов кальция в солевом составе). Минерализация воды р. Свяги колеблется в пределах 400-1100 мг/л. Неоднородность химического состава воды обусловлена подземным питанием реки, а также влиянием притоков.

Среднегодовое содержание органических и биогенных веществ в водах реки Свяги представлены в табл. 1.

В сточных водах различных промышленных предприятий, в том числе и УТЭЦ-1, содержится определенное количество таких загрязняющих, как тяжелые металлы. Они могут накапливаться в воде, в грунтах, в гидробионтах, в рыбах. Среднегодовые концентрации тяжелых металлов в воде и грунтах р. Свяги представлены на рис. 2 и 3.

Наряду с химическими показателями воды были исследованы пробы по гидробиологическим показателям (фитопланктон и зоопланктона) и определено качество вод.



Таблица 1

Среднегодовое содержание органических и биогенных веществ р. Свияги, (мг/л)

Станции	pH	Минерализация	БПК ₅	Хлориды	Сульфаты	Азот аммонийный	Нитриты	Нитраты	Фосфор	Железо
1	8,9	627	6,0	48,66	399,2	0,20	0,043	0,04	0,015	0,21
2	8,2	548	3,2	24,93	60,15	0,26	0,145	3,97	0,199	0,51
3	8,2	577	4,8	17,00	40,10	0,21	0,112	4,21	0,165	0,04

Примечание: 1 – место выпуска сточных вод; 2 – выше выпуска 100 м; 3 – ниже выпуска 200 м.

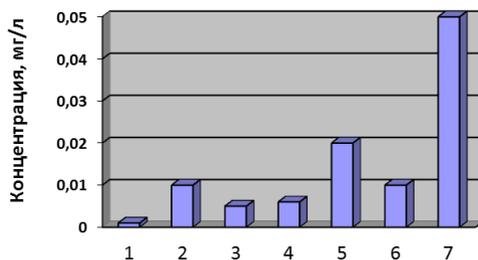


Рис. 2. Среднегодовая концентрация тяжелых металлов в воде р. Свияги:

1 – медь; 2 – цинк; 3 – кадмий; 4 – свинец; 5 – хром; 6 – марганец; 7 – нефтепродукты

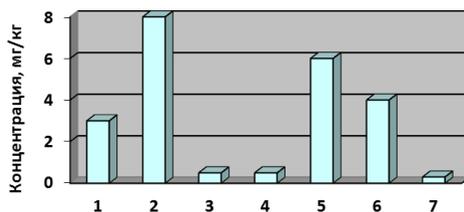


Рис. 3. Среднегодовая концентрация тяжелых металлов в грунтах р. Свияги:

1 – медь; 2 – цинк; 3 – кадмий; 4 – свинец; 5 – хром; 6 – марганец; 7 – нефтепродукты



Как известно, вода является необходимо важным компонентом жизнедеятельности человека. Воздействие сточных вод, сбрасываемых в водоемы, отрицательно влияют, как на обитателей водоемов, так и на людей. Загрязнение водоемов сильно сказывается на видовом составе обитающих организмов. Исчезают чистолюбивые виды, а появляются организмы, характерные для загрязненных участков. Вследствие чего подрывается продуктивность кормовой базы рыб, что в свою очередь приводит к дальнейшим глубоким последствиям. В настоящее время получил широкое применение контроль качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям [14, С. 155].

В пробах фитопланктона было обнаружено 171 таксонов водорослей рангом ниже рода из семи отделов. По числу видов преобладали диатомовые (Bacillariophyta) (39% от общего числа видов), затем следовали зеленые (Chlorophyta) (33%), сине-зеленые (Cyanophyta) (11%), золотистые (Chrysophyta) (6%), эвгленовые (Euglenophyta) и криптофитовые (Cryptophyta) (по 4%), динофитовые (Dinophyta) (2%) (рис. 4).

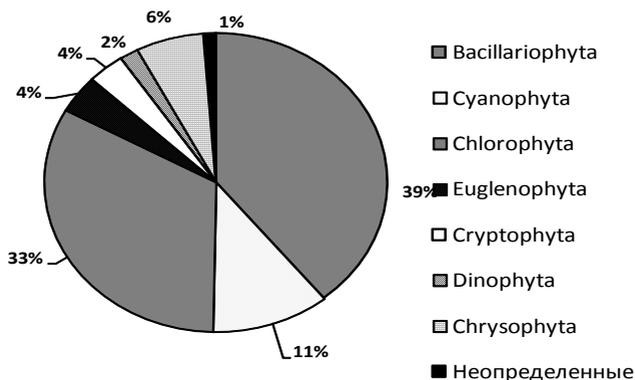


Рис. 4. Таксономический состав фитопланктона

Удельное видовое разнообразие в районе исследования в среднем составило $46 \pm 4,1$ видов/станцию и колебалось от 30 до 66. Максимальное количество таксонов было встречено на станции, расположенной в месте выпуска стоков УЛТЭЦ-1, а минимальное – в водохранилище в 50-ти метрах выше плотины у левого берега. На всех станциях в районе исследования по количеству таксонов преобладали диатомовые водоросли. Их доля колебалась от 43% (13 видов) до 57% (35

видов). Второй по значимости таксономической группой на исследованных станциях были зеленые водоросли, их доли варьировали от 25% (8 видов) до 30% (20 видов).

Биомасса фитопланктона в районе исследования колебалась от 1,7 до 5 мг/л, в среднем $2,9 \pm 0,3$ мг/л. Максимальная биомасса фитопланктона была сосредоточена на станциях 3 и 8 в водохранилище в 50-ти метрах выше плотины у правого берега и в отстойнике минерализованных стоков УлТЭЦ-1.

В составе зоопланктона исследованного участка было выявлено 20 видов организмов зоопланктона, из них 12 видов коловраток, 2 вида ветвистоусых рачков и 3 вида веслоногих рачков (рис. 5). Число видов зоопланктона в пробах колеблется от 1 до 8, в среднем составляя $3 \pm 0,5$ вида на одну пробу.



Рис. 5. Численность и биомасса зоопланктона по станциям в районе исследований.

4. Обсуждение

Анализ полученных результатов, показал, что в пробах воды содержание кадмия составляет меньше 0,005, а хрома меньше 0,02, что соответствует нормативам, так как ПДК кадмия в воде составляет 0,005 мг/л, а ПДК хрома – 0,02 мг/л. Концентрация свинца также находится в пределах нормы. Содержание меди не превышала предельно-допустимых концентраций, составляющих 0,001 мг/л. Содержание цинка в пробах воды находилось в пределах от 0,01 мг/л до 0,017 мг/л, марганца - в пределах от 0,01 мг/л до 0,013. При том, что ПДК по цинку составляет – 0,01 мг/л, а марганца – 0,01 мг/л. Концентрация нефтепродуктов в пробах воды р. Свияги и сбрасываемых водах ТЭЦ находится в пределах допустимых концентраций – 0,04 – 0,05 мг/л.

Существует большое количество нормативов содержания загрязняющих веществ в донных отложениях водоема. Это фоновые концентрации, используемые в США, Бельгии, Голландии, Нидерландах. Есть и такие нормативы, которые предлагаются в России на примере разных водоемов в различных регионах страны. Но дело в том, что грунты сильно отличаются друг от друга по своему составу. На разных водоемах стараются определить свои нормативы загрязняющих веществ в грунтах. Поэтому, лучше всего пользоваться нормативами тех пресноводных систем, грунты которых по составу похожи на грунты конкретно исследуемого водоема. Уже несколько лет на Куйбышевском водохранилище проводятся исследования грунтов и устанавливаются в них определенные нормативы загрязняющих веществ в донных отложениях. [15, С. 268]. Грунты Куйбышевского водохранилища Ульяновского плеса очень схожи по составу с грунтами исследуемого нами участка. Поэтому, мы опирались на эти предложенные нормативы. Превышение предельно допустимых концентраций исследуемых металлов в грунтах не наблюдается.

Таким образом, в пробах воды и грунтов р. Свияги в районе Ульяновской ТЭЦ-1 несомненно присутствуют определенные загрязняющие вещества, но их содержание не превышает предельно-допустимые концентрации.

В практике ранжирования уровня загрязнения воды широко применяется интегральный биологический показатель видового разнообразия (ИВР) – индекс Шеннона. Поэтому, качество воды на исследованных участках по фитопланктону определялось с помощью этого индекса. Также была определена степень загрязнения воды, характеризующаяся индексом сапробности. Для этого применен метод индикаторных зоопланктонных организмов по Пантле и Буку в модификации Сладечека [13, С. 7].

Видовое разнообразие сообщества зоопланктона в сентябре на исследованных участках небольшое. Индексы видового разнообразия изменяются на разных станциях от 0 до 2 (по численности) и от 0 до 2,8 (по биомассе). Средние по участку значения индексов равны $1,05 \pm 0,18$ по численности и $0,75 \pm 0,22$ по биомассе. Средний по исследованной акватории индекс сапробности (по численности) равен $1,53 \pm 0,06$, что соответствует β -мезосапробной зоне, умеренно загрязненной степени, III классу качества воды. В целом, значения индекса на разных станциях изменяются от 1,3 (олигосапробная зона) до 2,1 (β -мезосапробная зона).



Видовое разнообразие сообщества зоопланктона в октябре очень низкое. Индексы видового разнообразия изменяются на разных станциях от 0 до 2,32 (по численности) и от 0 до 1,62 (по биомассе). Средние по участку значения индексов равны $1,05 \pm 0,041$ по численности и $0,81 \pm 0,35$ по биомассе. По исследованной акватории индекс сапробности (по численности) равен $1,75 \pm 0,08$, что соответствует β -мезосапробной зоне, умеренно загрязненной степени, III классу качества воды (табл. 2).

Таблица 2

Интегральные показатели определения качества вод

№	Индекс видового разнообразия по Шеннону	Индекс сапробности по Пантле и Буку	Зона сапробности	Характеристика качества воды
1	2,69	2,21	β - α -мезосапробная	Умеренно-загрязненная-загрязненная
2	2,30	1,57	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная
3	1,32	1,55	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная
4	2,18	1,55	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная
5	2,37	1,55	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная
6	1,93	1,50	олигосапробная	Чистая
7	1,62	1,55	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная
8	1,90	1,37	олигосапробная	Чистая
9	1,94	1,64	β -мезосапробная	Умеренно-загрязненная

Таким образом, значения ИВР на разных станциях отбора проб в осенний период находятся в пределах 0,18 – 1,62, а индекс сапробности изменялся от 1,3 до 2,1. Воды характеризуются как «умеренно-загрязненные» и относятся к III классу качества воды.

1. Заключение

Мощные электростанции заметно нагревают воды в водоемах, на которых они расположены. Летом, когда потребность в электрической энергии для кондиционирования воздуха очень велика и ее выработка возрастает, эти воды часто перегреваются. Понятие "тепловое загряз-



нение" относится именно к таким случаям, так как избыточное тепло уменьшает растворимость кислорода в воде, ускоряет темпы химических реакций и, следовательно, влияет на жизнь животных и растений в водоприемных бассейнах. В условиях температурного загрязнения происходит устойчивое повышение температуры в водоемах ГРЭС, что практически приводит к изменению температуры и изменению рыболовной зоны по критерию температурного режима.

Повышение температуры воды также ускоряет химические и биохимические процессы, способствует интенсивному разложению органических веществ, оказывает влияние на газовый режим водоема, в результате могут возникать заморные явления и гибель рыбы в водоемах. Необходим постоянный мониторинг за качеством среды обитания гидробионтов в водоемах.

Библиографический список

1. **Валиев В.С., Закиров А.Г., Фролова Л.Л.** Методологические аспекты создания базы данных по содержанию тяжелых металлов в водных экосистемах // Эколого-ихтиотоксикологические аспекты мониторинга пресноводных объектов. Вып. 326. СПб, 2000. С. 66-69.
2. **Вундцеттель М.Ф.** Санитарная гидробиология. Рыбное: ВНИИПРХ, 2002. 62 с.
3. Биологический контроль окружающей среды Биоиндикация и биотестирование / О.П. Мелехова, Е.И. Егорова, Т.И. Евсеева и др. М.: Академия, 2007. 288 с. [eLIBRARY ID: [19494668](#)]
4. **Калайда М.Л.** Современное состояние и задачи развития аквакультуры в Республике Татарстан / Состояние и пути развития аквакультуры в Российской Федерации в свете импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности страны: мат. нац. научно-практ. конф. Саратов: Научная книга, 2016. С. 37-43.
5. **Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.** Потребление воды и ее дефицит: экологический аспект // Глобальные экологические проблемы России. М.: Наука, 2008. С. 35-92.
6. Формирование кислородного режима водоема-охладителя БГРЭС-1 / О.Г. Морозова, С.В. Морозов, Р.З. Пен, С.М. Репях // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2002. № 45(6). Р. 185-188.
7. **Демина Т.А.** Экология, природопользование, охрана окружающей среды. М.: Аспект пресс, 1995. 86 с. [eLIBRARY ID: [22295080](#)]
8. **Комаровский Ф.Я., Полищук Л.Р.** Ртуть и другие тяжелые металлы в водной среде: миграция, накопление, токсичность для гидробионтов // Гидробиологический журнал. 1981. № 17(5). С.71-83.



9. **Комов В.Т., Комаровский Ф.Я., Полищук Л.Р.** Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок: ИБВВ РАН, 2004. С. 99-123. [eLIBRARY ID: [21547482](#)]

10 Инструкция по отбору и консервированию проб для анализа на содержание токсичных веществ. М.: ВНИИПРХ, 1984. 14 с.

11. Методика выполнения измерений массовых концентраций бериллия, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, сурьмы и хрома в питьевых, природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектрометрии. ПНД Ф 14.1:2:4.140-98. М., 1998. 28 с.

12. **Березина Н.А.** Гидробиология. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 360 с.

13. **Sladeczek V.** System of water quality from the biological point of view. Н. 7. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1973. 218 p. DOI: [10.1002/iroh.19740590412](#).

14. **Садчиков А.П.** Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа, 2003. 157 с.

15. **Степанова Н.Ю., Латыпова В.З., Яковлев В.А.** Экология Куйбышевского водохранилища: донные отложения, бентос и бентосоядные рыбы. Казань: Академия наук РТ, 2004. 268 с.



QUALITY OF HYDROBIONTS`S AQUATIC HABITAT NEAR A THERMAL POWER PLANT

L.K. Govorkova and O.K. Anokhina

Kazan state power engineering university, Kazan

Abstract. The largest momentary use of water is electrical power production where water is mainly used for cooling and condensation of steam being generated by the power station`s turbines. During this process water is heated on average of 7°C following which it is dumped directly into rivers and lakes creating additional heating - so-called «water`s thermal pollution». Science knows many natural water contaminants which are harmful to the health of a population, lead to mortality of fish, water birds, other creatures, and also destroy aquatic plants living in the water. Besides, not only poisonous chemical and oil pollutants but also an excessive amount of organic and mineral matter, washed out from the fields, are harmful to the aquatic ecosystems. The issue of water quality control is the most pressing issue these days.

Keywords: power industry, chemical pollution, thermal pollution, hydrobionts, heavy metals, quality of the aquatic environment.



**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

**ALTERNATIVE AND RENEWABLE
ENERGY SOURCES**



УДК 621.383.4: 62-97/-98

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук, доц. **Воскресенская С.Н.**Д-р техн. наук, проф. **Бекиров Э.А.**Студент **Енина А.А.***Крымский федеральный университет
имени В.И. Вернадского, г. Симферополь*

Аннотация. Разработана программа расчета фотоэлектрической системы, позволяющая использование без предварительного обучения. Для этого сформулированы требования, которым она должна соответствовать, составлен алгоритм ее работы. Программа реализована на языке JavaScript и проведены расчеты для отдельных случаев.

Ключевые слова: фотоэлектрическая система, программа расчета, солнечные модули, нагрузка.

Во многих странах мира, в том числе и в России, одной из важных проблем солнечной энергетики является недостаточная осведомленность людей в данной области, которая частично затормаживает процесс развития и внедрения. Поэтому важна популяризация возобновляемых источников энергии и, в том числе, развитие возможностей по самообучению и внедрению простых программ, с помощью которых каждый потребитель сможет рассчитать, выгодно ли ему использование солнечной энергии, какое оборудование для этого нужно. Хотя основной все же называют проблему инфраструктуры электроэнергетической системы [1, 2].

Цель работы. Целью является разработка программы для расчета фотоэлектрической системы для разного типа пользователей.

Задачи: определить требования к программе; создать алгоритм расчета; реализовать программу на языке программирования; провести испытание программы для энергосистем с различными параметрами.

Требования к алгоритму и программе для расчёта.

В соответствии с поставленной задачей требуется разработать алгоритм и программу для расчета фотоэлектрической системы. Программа должна отвечать следующим требованиям: простота и гибкость; возможность внесения значений об инсоляции вручную или используя предустановленные данные программы; возможность вы-



полнения приблизительного сбора нагрузок; наличие выбора солнечных модулей; дружелюбный интерфейс; работа в любом браузере.

Простота и гибкость должны позволить произвести расчёт любому типу пользователей. Таким образом, расчёт может быть выполнен как для индивидуального потребителя, так и для электростанции. Программа должна позволить рассчитать установленную мощность системы по известным данным о потреблении или при известной установленной мощности выполнить расчёт выработки по месяцам.

Данные о поступающей солнечной радиации могут вноситься вручную или выбираться из соответствующей базы городов, что позволит упростить пользователю расчёт фотоэлектрической системы.

Для индивидуальных систем должна быть предусмотрена возможность выполнения приблизительного сбора нагрузок. Сбор нагрузок в программе можно осуществить двумя способами. Первый – путём внесения вручную данных о среднем энергопотреблении зимой и летом (кВт·ч в месяц). Второй – с помощью базы данных о нагрузках в программе. База данных нагрузок состоит из названия бытовых приборов, их мощности и времени работы в сутки. Отдельной нагрузкой считается освещение. Оно не входит в базу данных по бытовым приборам, так как существует очень много вариантов. После выбора нагрузок происходит автоматическое вычисление требуемой энергии, которое необходимо для дальнейшего расчёта.

Наличие выбора солнечных модулей позволяет пользователю подобрать фотоэлектрическую систему без сильной привязки к конкретным фирмам по установке солнечных батарей. В программе должна присутствовать база модулей с данными о напряжении, площади и мощности.

Дружелюбный интерфейс подразумевает удобство пользования программой, освоение работы за минимальное время и с минимальными усилиями при решении необходимых задач. Поэтому нужны небольшие пояснения, расчет должен быть разбит на части.

Программа не должна требовать дополнительного программного обеспечения, кроме того, что доступно всем пользователям компьютеров. В базовом виде программа может работать без выхода в интернет.

Алгоритм расчёта программы представлен на рис. 1 и 2, он состоит из трёх блоков.

В первом блоке производится расчёт требуемой энергии путём сбора нагрузок (приборов) и освещения, или введением данных о нагрузках вручную.



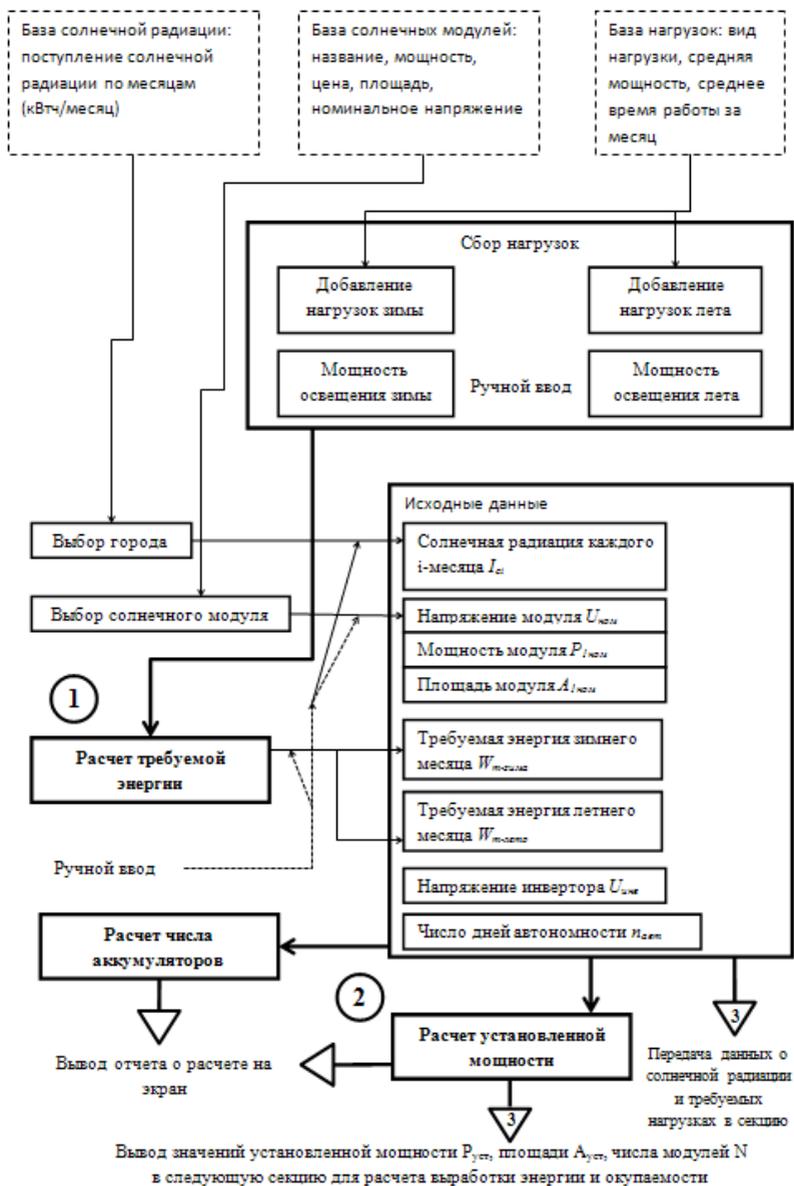


Рис. 1. Первые два блока алгоритма программы

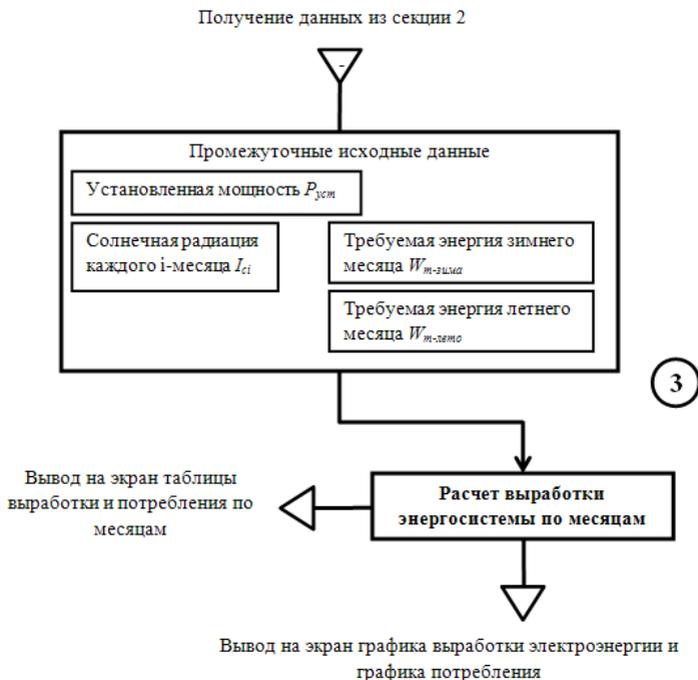


Рис. 2. Третий блок алгоритма программы

Во втором блоке выполняется расчет установленной мощности системы в соответствии с исходными данными.

В третьем блоке определяется выработка системы по месяцам.

В алгоритме представлены три источника данных: база солнечной радиации, база солнечных модулей и база нагрузок.

Между вторым и третьим блоком происходит передача сведений об установленной мощности, площади и числе модулей. Таким образом, результаты расчета второго блока используются как исходные данные третьего блока.

В алгоритме предусмотрен вывод следующей информации: результаты расчета установленной мощности в виде отчета о выполненных операциях (блок 2), таблица выработки по месяцам (блок 3), график потребления и выработки (блок 3).

Интерфейс программы состоит из 3 секций, соответствующих трём шагам расчёта.

Первая секция содержит таблицу для выбора исходных данных о расположении фотоэлектрической системы и необходимого времени её работы. Вторая секция включает сбор нагрузок или их задание (рис. 3), а также выбор типа солнечного модуля, напряжения инвертора, числа дней автономной работы и других исходных данных. В данной секции выполняется основной расчёт необходимой установленной мощности системы. Третья секция содержит инструменты проверочного расчёта энергосистемы - выработки энергии по месяцам с возможностью вывода данных в виде таблицы и графика.

Для написания программы был выбран язык программирования JavaScript.

Проверка работы программы

Для проверки работы программы была рассчитана фотоэлектрическая система, используемая в г. Симферополь. В результате сбора нагрузок получили, что электропотребление составило 150 кВт·ч в месяц. Были выбраны солнечный модуль Delta BST 280-24P и инвертор SILA_PV_5000P, с напряжением на входе 48В. Число дней автономной работы - 0,5 (12 часов).

Шаг 2 - выбор нагрузки и параметров системы

Выбрать нагрузку для индивидуальной системы

Зима

Чайник Кондиционер Духовка Микроволновая печь Посудомоечная машина
Фен Тостер Утюг Пылесос Стиральная машина Плазменный телевизор
Холодильник Компьютер Игровая приставка Принтер

Нагрузка	Мощность, кВт	Врем. раб. в месяц, ч
Освещение	0.15	240
Чайник	2	5
Духовка	3	7.5
Микроволновая печь	1.5	5
Фен	1.538	2.5
Тостер	1.1	1
Утюг	1.1	1.5
Пылесос	0.65	2.5
Стиральная машина	0.425	10
Плазменный телевизор	0.339	145
Холодильник	0.16	180
Компьютер	0.65	110
Игровая приставка	0.65	45
Принтер	0.045	0.5

Очистить

Лето

Чайник Кондиционер Духовка Микроволновая печь Посудомоечная машина
Фен Тостер Утюг Пылесос Стиральная машина Плазменный телевизор
Холодильник Компьютер Игровая приставка Принтер

Нагрузка	Мощность, кВт	Врем. раб. в месяц, ч
Освещение	0.15	120
Чайник	2	5
Кондиционер	0.8	100
Микроволновая печь	1.5	5
Фен	1.538	2.5
Тостер	1.1	1
Утюг	1.1	1.5
Пылесос	0.65	2.5
Стиральная машина	0.425	10
Плазменный телевизор	0.339	145
Игровая приставка	0.65	45
Компьютер	0.65	110
Холодильник	0.16	180

Очистить

Выбран модуль: TBS Powerline PS1400-24

Среднее энергопотребление зимой (кВтч в месяц)	267.1975
Среднее энергопотребление летом (кВтч в месяц)	306.675

TopRaySolar 65P
 TopRaySolar 110P
 TopRaySolar 160P

Рис. 3. Проверка функции сбора нагрузок

В результате расчета были получены следующие данные.

- выбран модуль: Delta BST 280-24P;
- выбран инвертор: SILA_PV_5000P;
- предварительное число модулей: 11.694724650047059;
- модулей последовательно: 2;
- модулей параллельно: 6;
- уточненное число модулей: 12;
- установленная мощность всех модулей: 3.36 кВт;
- установленная площадь всех модулей: 19,44 м²;
- число инверторов мощностью: 1 (5 кВт каждый);
- требуемая емкость АБ: 389 А·ч;
- число АБ: 2.

На рис. 4 приведен график выработки, выводимый программой.

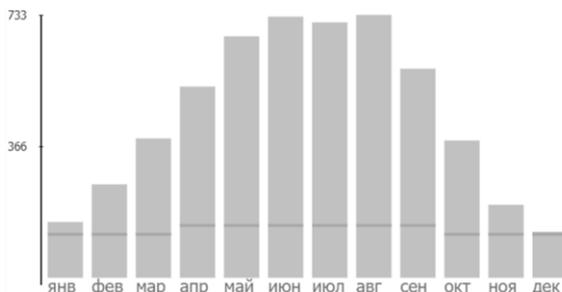


Рис. 4. График выработки электроэнергии, кВт·ч в месяц

Программа позволяет задавать различный состав [3, 4], в т.ч. без аккумуляторных батарей, менять инверторы и солнечные модули.

Выводы по работе. Таким образом, был разработан алгоритм и создана программа расчета фотоэлектрической системы в соответствии со сформулированными требованиями. Проведены ее испытания. Рассчитанные с ее помощью значения совпадают с теми, которые были получены вручную. Разработанная программа может быть усовершенствована путём внесения дополнительных баз данных по городам, солнечным модулям [5, 6], различным типам аккумуляторных батарей [7], инверторов и дополнительных нагрузок.

Для усовершенствования интерфейса возможно добавление карты Крыма/России, фотографий солнечных модулей и прочих элементов системы.



Библиографический список

1. Энергетические проекты на основе возобновляемых источников энергии: экономическая значимость и развитие / А.А. Даудова, И.Н. Володина, О.Л. Захарова, С.М. Авдеева // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2020. № 4 (184). С. 20-25. DOI: [10.33285/1999-6942-2020-4\(184\)-20-25](https://doi.org/10.33285/1999-6942-2020-4(184)-20-25). [eLIBRARY ID: [42657213](#)]
2. **Теодорович Н.Н., Исаева Г.Н.** Альтернативная энергетика: перспективы развития // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8, № 6 (37). С. 47. [eLIBRARY ID: [28420802](#)]
3. **Саврасов Ф.В.** Варианты построения автономных систем электроснабжения с использованием фотоэлектрических устройств и алгоритмы их работы // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 6 (19). С. 156. [eLIBRARY ID: [21405255](#)]
4. Выбор структуры фотоэлектрической системы электроснабжения // Б.Н. Лобов, П.Г. Колпахчян, С.А. Белокопытов, А.Д.Р. Али Маджид // Электротехника. 2015. № 7. С. 36-41. [eLIBRARY ID: [23618331](#)]
5. **Панченко В.А.** Солнечные модули различных типов для энергоснабжения потребителей // Эксперт года 2019: Сб. ст. VI Межд. научно-иссл. конк. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 23-27. [eLIBRARY ID: [38484644](#)]
6. **Дайчман Р.А.** Анализ солнечных батарей современных производителей // Современная наука и практика. 2015. № 4 (4). С. 5-11. [eLIBRARY ID: [25023772](#)]
7. **Тимонин И.** Сравнение аккумуляторных батарей различного типа. ОАО "ВНИИР" // Электроэнергия. Передача и распределение. 2014. № 2 (23). С. 78-80. [eLIBRARY ID: [23618396](#)]



DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR PHOTOELECTRIC SYSTEM CALCULATION

S.N. Voskresenskaia, E.A. Bekirov and A.A. Enina
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Abstract. The article presents the development of the software for photoelectric system calculation which can be used without pretraining. For this purpose, the requirements for software have been formulated and the algorithm of operation composed. The software is realized on JavaScript and the calculations for specific cases are presented.

Keywords: photoelectric system, software, solar panels, load



УДК 628.474.3:662.767.2

РАСЧЕТ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ БИОГАЗА И RDF-ТОПЛИВА

Ст. преп. **Корнилова Н.В.**Д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.***Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

Аннотация. В работе предложен метод расчета горения при совместном сжигании твердого и газообразного топлива. Расчет предлагается проводить на единицу выделяемой при горении суммарной тепловой мощности, а не на единицу массы или объема топлива. Метод апробирован для оценки выброса парниковых газов при сжигании различных видов топлив и при совместном сжигании отходов и свалочного газа. При сгорании углей и отходов содержание CO_2 в продуктах сгорания составляет около $0,05 \text{ м}^3/\text{МВт}$, при сжигании природного газа – $0,028 \text{ м}^3/\text{МВт}$, что практически в 1,8 раз ниже, чем для угля. При сжигании биогаза содержание углекислого газа в продуктах сгорания зависит от концентрации метана в биогазе и составляет $0,04 \dots 0,06 \text{ м}^3/\text{МВт}$. Повышенное выделение CO_2 при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но так как биогаз оказывает значительный парниковый эффект из-за содержания в нем метана, сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на $0,6 \dots 1,9 \text{ м}^3/\text{МВт}$ в CO_2 -эквиваленте.

Ключевые слова: биогаз, свалочный газ, твердые коммунальные отходы, твердые бытовые отходы, расчет горения, парниковый эффект, совместное сжигание

Введение

В настоящее время нет технологии утилизации твердых коммунальных (бытовых) отходов (ТКО или ТБО), сочетающей экономическую эффективность и экологическую безопасность. Большинство систем управления отходами в странах Европы использует низко затратные варианты утилизации в виде захоронения отходов на полигонах [1] или сжигание [2]. Первоначальная цель совместного сжигания отходов и газообразного топлива – стабилизировать тепловыделение в печи и упростить процесс розжига котла, снизив повышенные выбросы, характерные для этого процесса [3]. Так же увеличение температу-



ры газового потока приводит к полному сгоранию находящихся в нем твердых частиц топлива [4] и органических соединений, выделяющихся при низкотемпературном или неполном сгорании [5], что значительно снижает выбросы, образующиеся при сгорании отходов [6].

На полигонах твердых коммунальных (муниципальных) отходов образуется свалочный газ (биогаз), основными компонентами которого является метан CH_4 (35-60%), углекислый газ CO_2 (20-40%) и азот N_2 (до 40%). Свалочный газ так же требует утилизации [7], так как по разным оценкам парниковый эффект метана превышает парниковый эффект углекислого газа в 25-70 раз [8]. Низкая теплота сгорания биогаза и большое количество CO_2 и примесей является основным препятствием для его использования в энергетических электрогенерирующих установках [9].

Еще в 1990 г. Gas Research Institute (USA) разработал систему сжигания для печей ТКО с совместным сжиганием небольшого количества природного газа и свалочного газа (рис. 1). Это позволяло контролировать выбросы диоксинов и фуранов, одновременно стабилизируя тепловую мощность агрегата.

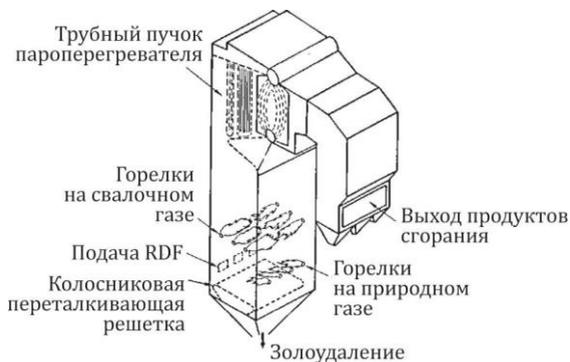


Рис 1. Установка для совместного сжигания отходов, природного газа и биогаза [3]

Были проведены исследования на двух паровых котлах, сжигающих отходы с расходом 13,6 т/ч и 90,7 т/ч. Первоначально котлы были спроектированы для совместного сжигания RDF и угля, но эксплуатация показала неэффективность такого подхода из-за резкого неконтролируемого колебания нагрузки из-за изменения состава RDF, входя-

щих до 20-25%, трудностей розжига и большого количества вредных выбросов. Для совместного сжигания RDF, свалочного и природного газа была разработана двухуровневая горелка. В нижней части топки котла над колосниковой решеткой были расположены горелки для природного газа, обеспечивающие 10% тепловой нагрузки. В средней части топки были расположены горелки для сжигания свалочного или природного газа, так же обеспечивающие 10% нагрузки.

Таким образом для определения возможности совместного сжигания неподготовленных или подготовленных отходов и биогаза необходимо установить возможность получения требуемых температур, что требует выполнения расчета горения.

Целью работы является разработка метода расчета горения при совместном сжигании отходов (твердого топлива) и биогаза (газообразного топлива) и апробирование методики для оценки выброса парниковых газов при различных способах сжигания.

Методика расчета

Единицы удельного расчета и расходы топлив

Расчет предлагается проводить на единицу выделяемой при горении суммарной мощности. В этом случае массовый удельный расход твердого топлива:

$$m_s = (1 - q_g)/Q_s, \text{ кг/МВт}; \quad (1)$$

объемный удельный расход свалочного газа:

$$v_g = q_g/Q_g, \text{ м}^3/\text{МВт}, \quad (2)$$

где q_g – доля энергии, выделяющейся при сгорании свалочного газа, в общей энергии; Q_s – низшая теплота сгорания твердого топлива, МВт/кг; Q_g – низшая теплота сгорания свалочного газа, МВт/м³.

Если задан массовый расход твердого топлива, объемный расход свалочного газа может быть определен по выражению

$$v_g = (1 - m_s Q_s)/Q_g, \quad (3)$$

в обратном случае

$$m_s = (1 - v_g Q_g)/Q_s. \quad (4)$$

Расчет горения при совместном сжигании твердого и газообразного топлив

Элементарный состав отходов представлен следующими элементами:

$$C^r, H^r, O^r, N^r, S^r, A^r, W^r, \text{ массовые \%}$$



Состав газообразного топлива:

CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , CO_2 , H_2 , H_2S , O_2 , N_2 , объемные %

Теоретический объем воздуха, необходимый для горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{air}}^0 = (1 / 29,87) \cdot (2,67C^r + S^r + 8H^r - O^r) \cdot m_s + \\ + 0,0476 \cdot (0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} + \\ + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2) \cdot v_g \quad (5)$$

Действительный объем влажного воздуха для горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{air}} = \alpha V_{\text{air}}^0 (1 + 1,293 / 0,805 \cdot d_{\text{air}}) \quad (6)$$

Состав продуктов горения, $\text{м}^3/\text{МВт}$:

$$V_{\text{cp CO}_2} = 0,01 (1,87C^r + 0,7S^r) \cdot m_s + \\ + 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{S}) \cdot v_g; \quad (7)$$

$$V_{\text{cp H}_2\text{O}} = (0,111\text{H}^r + 0,012\text{W}^r) \cdot m_s + \\ + 0,01(\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{S}) \cdot v_g + \\ + \alpha V_{\text{air}}^0 \cdot 1,293 / 0,805 \cdot d_{\text{air}} + \rho_g / 0,805 \cdot d_g \cdot v_g \quad (8)$$

$$V_{\text{cp N}_2} = 0,79\alpha V_{\text{air}}^0 + 0,008 \text{N}^r \cdot m_s + 0,01\text{N}_2 \cdot v_g \quad (9)$$

$$V_{\text{cp O}_2} = 0,21(\alpha - 1) V_{\text{air}}^0, \quad (10)$$

где d_{air} – влагосодержание воздуха, кг влаги/кг сухого воздуха; где d_g – влагосодержание газообразного топлива, кг влаги/кг газа; ρ_g – плотность газообразного топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$; α – коэффициент избытка воздуха.

Приведенные выражения (11)–(16) могут быть использованы и при расчете на единицу топлива.

При расчете удельных показателей на 1 кг твердого топлива расходы будут равны:

$$m_s = 1 \text{ кг}; v_g = \frac{q_g}{1 - q_g} \frac{Q_s}{Q_g}, \frac{\text{м}^3 \text{ газа}}{\text{кг твердого топлива}}, \quad (11)$$

а при расчете на 1 м^3 биогаза:

$$v_g = 1 \text{ м}^3; m_s = \frac{1 - q_g}{q_g} \frac{Q_g}{Q_s}, \frac{\text{кг твердого топлива}}{\text{м}^3 \text{ газа}}. \quad (12)$$



Апробация расчета для оценки выброса парниковых газов при сжигании топлива

С использованием предложенной методики был произведен расчет выбросов CO₂ для сжигания различных топлив и при совместном сжигании RDF-топлива и свалочного газа.

Исходные данные для расчета

Средний состав углей принят по работе [10], состав ТКО – по работе [11]. При сушке отходов в барабанной сушилке 6х20 м производительностью 1 т/ч отходов с влажностью 50% расход природного газа на нагрев сушильного агента составляет 50 м³/ч. Таким образом теплота сгорания полученного топлива составляет 6,5 ГДж/ч, а тепловая энергия используемого для сушки газа – 1,8 ГДж/ч. Поэтому переработка отходов в RDF топливо связана с высокими энергетическими затратами. Между тем необходимая температура горения (900-1000°C) может быть обеспечена при сжигании отходов даже с влажностью 50% [12]. Поэтому для исследования использован средний состав твердых муниципальных отходов с различной влажностью (табл. 1):

- без подготовки с влажностью 50%;
- частично высушенные отходы с влажностью 30%;
- с влажностью 10%, характерные для RDF-топлива.

В работе [13] на основании исследований фактического выхода биогаза с полигонов ТКО установлено, что состав свалочного газа крайне неравномерен. Поэтому в качестве газообразного топлива рассмотрены три варианта: метан в качестве эталонного топлива, обычный биогаз с содержанием метана 60% и биогаз с низким содержанием метана 35% (табл. 2). Состав биогаза задан исходя из средних значений инструментальных измерений. Учитывались только три компонента в связи с незначительным содержанием остальных.

Таблица 1

Характеристики твердого топлива

Наименование	Элементарный состав, массовые %							Теплота сгорания Q _н ^p , кДж/кг
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	
Антрацит	60,12	1,02	0,93	0,64	2,02	27,36	8,28	21 342
Бурый уголь	34,41	2,51	10,98	0,55	0,57	17,66	33,34	12 278
Каменный уголь	54,79	3,44	7,45	1,24	0,70	22,12	10,25	21 126
RDF-топливо	34,4	4,6	23,0	0,9	0,3	26,9	10,0	13 655
Частично высушенные ТКО	26,8	3,6	17,9	0,7	0,2	20,9	30,0	10 063
Неподготовленные ТКО	19,1	2,5	12,8	0,5	0,1	15,0	50,0	6 470



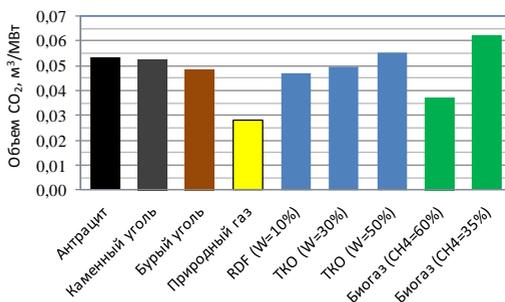
Таблица 2

Характеристики газообразного топлива

Наименование	Состав, объемные %			Плотность ρ , кг/м ³	Теплота сгорания $Q_{нт}^p$, кДж/м ³
	CH ₄	CO ₂	N ₂		
Метан	100	0	0	0,716	35 820
Обычный биогаз	60	20	20	1,072	21 492
Биогаз с низким содержанием метана	35	43	22	1,370	12 537

Результаты расчета выброса парниковых газов для различного топлива

На рис. 2 представлено содержание CO₂ в продуктах сгорания топлива различного вида, отнесенное к его теплоте сгорания.

Рис. 2. Содержание CO₂ в продуктах сгорания топлива

При сгорании углей и отходов выделяется почти в два раза больше углекислого газа, чем при сжигании природного газа. Повышенное выделение CO₂ при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но при сжигании свалочного газа необходимо учитывать, что парниковый эффект от метана в 25...70 раз выше, чем от углекислого газа. Для получения 1 МВт мощности необходимо 0,028 м³ метана. Поэтому сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на 0,6...1,9 м³/МВт в CO₂-эквиваленте. На рис. 3 представлено изменение объема углекислого газа в продуктах сгорания при совместном сжигании отходов и газообразного топлива. Применение для



дожига отходов природного газа и биогаза обычного состава приводит к снижению выбросов парниковых газов. Применение для дожига свалочного газа с низким содержанием метана на объем CO_2 в продуктах сгорания почти не влияет.

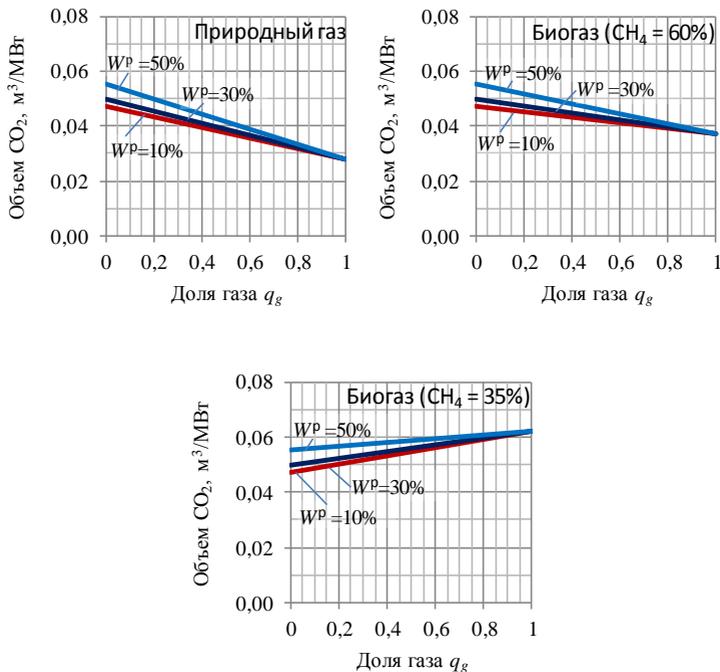


Рис. 3. Содержание CO_2 в продуктах сгорания при совместном сжигании ТКО разной влажности и природного газа и биогаза

Так как при сжигании свалочного газа дополнительно происходит предотвращение выброса в атмосферу метана, произведен расчет снижения парниковых выбросов (рис. 4).

Величина снижения, приведенная к единице теплоты сгорания смеси топлив, от концентрации метана в биогазе не зависит. Так же в связи с высокой величиной снижения парниковых выбросов на ее величину влажность сжигаемых отходов практически не влияет.



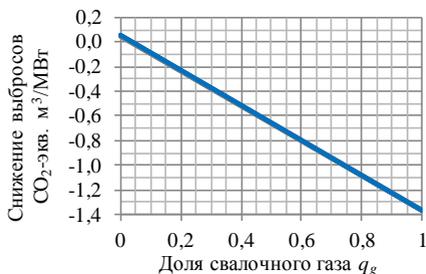


Рис. 4. Снижение выбросов парниковых газов при совместном сжигании отходов и свалочного газа

Выводы

В работе предложен метод расчета горения при совместном сжигании твердого топлива, в том числе отходов или RDF-топлива и газообразного топлива – природного газа или биогаза. Расчет предлагается проводить не на единицу объема или массы топлива, а на единицу суммарной мощности сгорания смеси топлив, в качестве которой принят МВт.

Методика апробирована для оценки выброса парниковых газов при сжигании различных видов топлив и при совместном сжигании отходов и свалочного газа. При сгорании углей и отходов содержание CO₂ в продуктах сгорания составляет около 0,05 м³/МВт, при сжигании природного газа – 0,028 м³/МВт, что практически в 1,8 раз ниже, чем для угля. При сжигании биогаза содержание углекислого газа в продуктах сгорания зависит от концентрации метана в биогазе и составляет 0,04...0,06 м³/МВт. Повышенное выделение CO₂ при сгорании биогаза по сравнению с природным газом объясняется большим содержанием углекислого газа в самом биогазе. Но так как биогаз оказывает значительный парниковый эффект из-за содержания в нем метана, сжигание свалочного газа, который без утилизации был бы выброшен в атмосферу, приводит к снижению выбросов парниковых газов на 0,6...1,9 м³/МВт в CO₂-эквиваленте.

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Библиографический список

1. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe / J. Malinauskaite, H. Jouhara, D.Czajczyński et al // Energy. 2017. Vol. 141. P. 2013-2044. DOI: [10.1016/j.energy.2017.11.128](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128).

2. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities / J.M. Fernández-González, A.L. Grindlay, F. Serrano-Bernardo // Waste Management. 2017. Vol. 67. P. 360–374. DOI: [10.1016/j.wasman.2017.05.003](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003).

3. Design of advanced combustion systems for co-firing of natural gas with refuse derived fuels and landfill gas / D.K. Moyeda, G.C. England, W.R. Seeker, D.G. Linz // In Proceedings of National Waste Processing Conference. New York: ASME, 1990. P. 203-210.

4. **Ветрова Ю.В., Васюткина Д.И., Радоуцкий В.Ю.** Модели распространения вредных веществ в окружающей среде // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 4. С. 159-162. [eLIBRARY ID: [18310440](https://elibrary.ru/18310440)]

5. The formation and control of PCDD/PCDF from RDF-fired combustion systems/ D.K. Moyeda, W.R. Seeker, G.C. England, D.G. Linz // Chemosphere. 1990. Vol. 20(10-12). P. 1817-1824. DOI: [10.1016/0045-6535\(90\)90347-V](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90347-V).

6. **Werther J.** Gaseous emissions from waste combustion // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 144(3). P. 604-613. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2007.01.116](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.116).

7. Investigation of waste biogas flame stability under oxygen or hydrogen-enriched conditions / N. Striūgas, R. Paulauskas, R. Skvorčinskienė A. LISAUSKAS // Energies. 2020. Vol. 13(18). P. 4760. DOI: [10.3390/en13184760](https://doi.org/10.3390/en13184760).

9. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Электронный ресурс] / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2015. 151 p. URL: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf.

9. **Суслов Д.Ю., Темников Д.О.** Оптимальное расположение биометановой установки и станции подачи биометана в системы газоснабжения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 196-203. [eLIBRARY ID: [42737925](https://elibrary.ru/42737925)]

10. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина; 4-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2007. 561 с. (Сер. «Теплоэнергетика и теплотехника»; Кн. 2).

11. **Левин Б.И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.



12. Kornilova N.V., Trubaev P.A. Analysis of MSW Combustion temperature in a hot water boiler with the low-capacity // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1066(1). 012003. DOI: [10.1088/1742-6596/1066/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012003). [eLIBRARY ID: [37571786](#)]

13. Investigation of Landfill Gas Output from Municipal Solid Waste at the Polygon / P.A. Trubaev, O.V. Verevkin, B.M. Grishko et al // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1066(1). 012015. DOI: [10.1088/1742-6596/1066/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012015). [eLIBRARY ID: [38619254](#)]



CALCULATION OF BIOGAS AND RDF COFIRING

N.V. Kornilova and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Abstract. The paper suggests the calculation method of combustion when solid and gaseous fuels are cofired. The calculation is suggested to carry out per unit of heat output released during combustion but not per unit of mass or volume of fuel. The method has been tested for evaluation of greenhouse gas emissions during combustion of different fuel types and during waste and landfill gas cofiring. During coal and waste combustion, the CO₂ content in products of combustion is around 0,05 m³/MW, for natural gas combustion - 0,028 m³/MW which is 1,8 times lower than for coal firing. During biogas combustion, the carbon dioxide content in the combustion products depends on the methane concentration in biogas and is around 0,04...0,06 m³/MW. The increased CO₂ emission during biogas combustion in comparison to natural gas is explained by a high carbon dioxide content in biogas itself. Having in mind that biogas creates a significant greenhouse effect due to methane presence in it the landfill gas utilization, which would have been released into the atmosphere anyway, leads to greenhouse gas emissions decrease by 0,6...1,9 m³/MW of CO₂ equivalent.

Keywords: biogas, landfill gas, solid household waste, solid municipal waste, combustion calculation, greenhouse effect, cofiring.



УДК 662.767.2:662.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ СОСТАВА БИОГАЗА НА СВОЙСТВА ФАКЕЛА

Магистрант **Леонов Е.С.**Д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.***Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

Аннотация. Целью работы являлось исследование зависимости длины факела от состава биогаза с целью анализа, необходима ли реконструкция топков котлов и печей, работающих на природном газе, при их переводе на биогаз, или возможно использование существующих агрегатов. Использовались аналитическая одномерная модель диффузионного прямого факела в неограниченном и ограниченном пространстве и численная трехмерная модель турбулентного факела в закрученном потоке воздуха. Определялась длина факела при содержании метана в биогазе от 20 до 100%. Сделан вывод, что при изменении содержания метана в биогазе возможно поддержание стабильного режима работы теплотехнической установки при условии регулирования расхода биогаза для обеспечения постоянного выделения теплоты при его сгорании и обеспечение турбулентного факела с закрученным потоком воздуха. Сжигание при этом может проводиться с использованием одной и той же горелки и без изменения размеров топки.

Ключевые слова: биогаз, длина факела, горение.

Введение

Биогаз – это газ, образующийся при анаэробном сбраживании органического вещества. Он образуется естественным путем из твердых коммунальных отходов (такой газ называют свалочным), коммунальных сточных вод, отходов и сточных вод сельскохозяйственных производств, навоза животных. Состав биогаза сильно зависит от характеристик усваиваемого субстрата и условий образования. В общем случае биогаз содержит около 60% метана CH_4 , 20% углекислого газа CO_2 , 20% азота N_2 , небольшое количество кислорода O_2 , сероводорода H_2S , водорода H_2 , иных органических веществ. Наличие метана в биогазе позволяет его использовать в качестве топлива для производства тепловой и электрической энергии [1].



Биогаз не может быть использован в горелках в качестве прямой замены природного газа, так как у него иное соотношение расходов воздуха и газа, так же горение не является достаточно стабильным из-за высокого содержания в биогазе CO_2 . Таким образом, для биогаза должна быть установлена новая горелка с отдельной контрольно-измерительной системой.

В работе [2] было проведено исследование горения биогаза, в основном беспламенного в смоделированной камере сгорания и показана объемная зависимость обычного сжигания биогаза и CH_4 (рис. 1). В работе [3] выполнено моделирование горения газа при различном содержании CO_2 (рис. 2). Как видно из рис., температура горения при повышении содержания CO_2 уменьшается. Но в проведенных исследованиях расход биогаза был равен расходу природного газа, следовательно, уменьшалось количество выделяемой теплоты. Целесообразно исследование проводить при постоянной тепловой мощности агрегата, то есть при снижении теплоты сгорания увеличив его расход топлива.

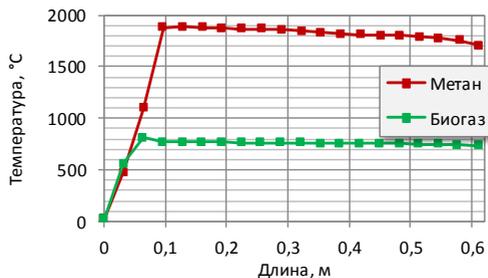


Рис. 1. Изменение температуры на центральной линии печи при сжигании метана и биогаза [2]

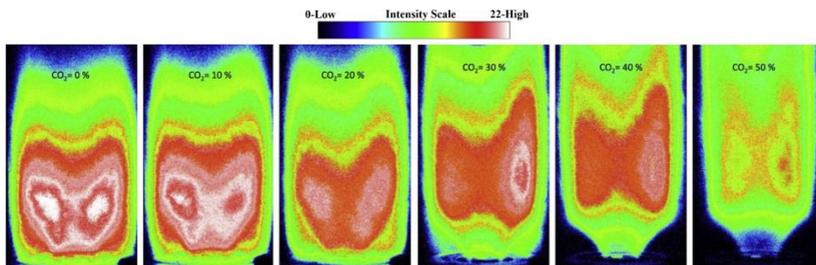


Рис. 2. Температура горения биогаза при разном содержании CO_2 [3]

В работе [4] исследовано влияние степени закрутки воздуха на длину и форму диффузионного факела. Установлено, что короткий диффузионный факел, закрученный направляющими лопатками под углом 45° , обеспечивает требуемую интенсивность горения. В работе [5] при моделировании сжигания биогаза различного состава было установлено, что механические рассекатели пламени позволяют повысить тепловую мощность горелки, причем для каждой концентрации метана длина рассекателя должна быть подобрана индивидуально.

Таким образом сжигание биогаза вместо природного газа допустимо, но необходимо выбирать режим горения в зависимости от состава биогаза.

Целью работы являлось исследование зависимости длины факела от состава биогаза с целью анализа, необходима ли реконструкция топок котлов и печей, работающих на природном газе, при их переводе на биогаз, или возможно использование существующих агрегатов.

Методы исследования

Использовались три математические модели сгорания газообразного топлива при его отдельной подаче с воздухом, приведенные в работе [6]:

- 1) прямоточный диффузионный факел в неограниченном пространстве (одномерная аналитическая модель);
- 2) прямоточный диффузионный факел в ограниченном цилиндрическом пространстве (одномерная аналитическая модель);
- 3) турбулентный факел в закрученном потоке воздуха (трехмерная модель).

Основными компонентами биогаза являются метан, азот и углекислый газ. Состав свалочного газа характеризуется неравномерностью состава [7], поэтому исследовалась длина факела при содержании метана в биогазе от 20 до 100%.

При моделировании рассматривались три варианта:

а) сжигание газа переменного состава с одинаковым объемным расходом газа, подаваемого в горелку;

б) сжигание при постоянной теплопроизводительности (теплоты, выделяемой при сгорании топлива) с использованием одной и той же горелки, при этом при уменьшении содержания метана в газе увеличивался расход топлива и скорость его вылета из горелки;

в) сжигание при постоянной теплопроизводительности с изменением диаметра горелки при увеличении расхода газа для обеспечения постоянной скорости газа.



Результаты моделирования

Результаты расчета длины факела при изменении концентрации метана в биогазе представлены на рис. 3. При снижении концентрации метана во всех случаях длина факела уменьшается.

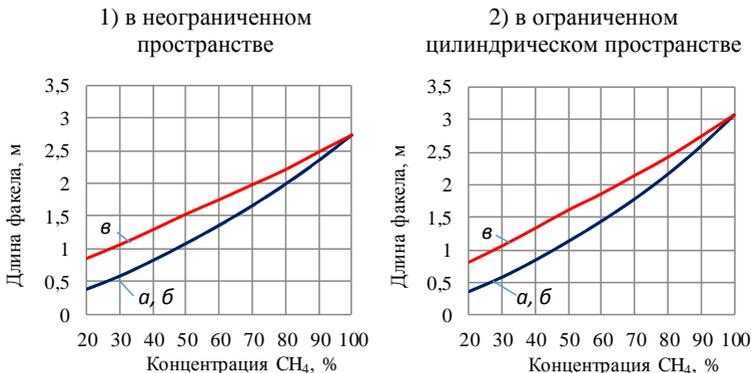


Рис. 3. Длина прямооточного диффузионного факела (одномерная модель) при различной концентрации метана в биогазе:

а) постоянный расход; б) постоянная мощность и диаметр горелки, изменяется скорость; в) постоянная мощность и скорость, изменяется диаметр горелки

Для турбулентный факел в закрученном потоке воздуха наблюдается повышение длины факела в два раза при снижении концентрации метана до 70-80% (рис. 4). Для биогаза обычного состава (60% метана) длина факела в 1,4 раза выше, чем при сгорании природного газа. Это можно объяснить худшим смешением топлива с воздухом из-за наличия в газе негорючих примесей.

На рис. 5 приведены результаты моделирования для топлива с разной концентрацией метана и углом закрутки воздушного потока. Для газа с содержанием метана 60% наблюдается иная зависимость, чем для природного газа – максимальная длина факела при угле закрутки 45%. Таким образом изменяя условия сжигания можно обеспечить факел необходимого размера.

Выводы

Можно сделать вывод, что при изменении содержания метана в биогазе возможно поддержание стабильного режима работы теплотехнической установки при условии регулирования расхода биогаза для обеспечения постоянного выделения теплоты при его сгорании и обеспечение турбулентного факела с закрученным потоком воздуха.

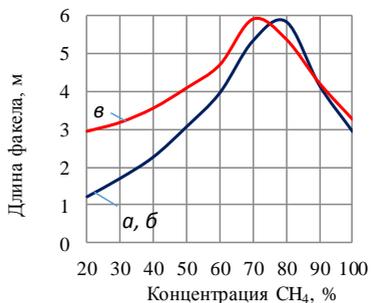


Рис. 4. Длина турбулентного факела в закрученном потоке воздуха при различной концентрации метана в биогазе (угол закрутки 45°):
 а) постоянный расход; б) постоянная мощность и диаметр горелки, изменяется скорость; в) постоянная мощность и скорость, изменяется диаметр горелки

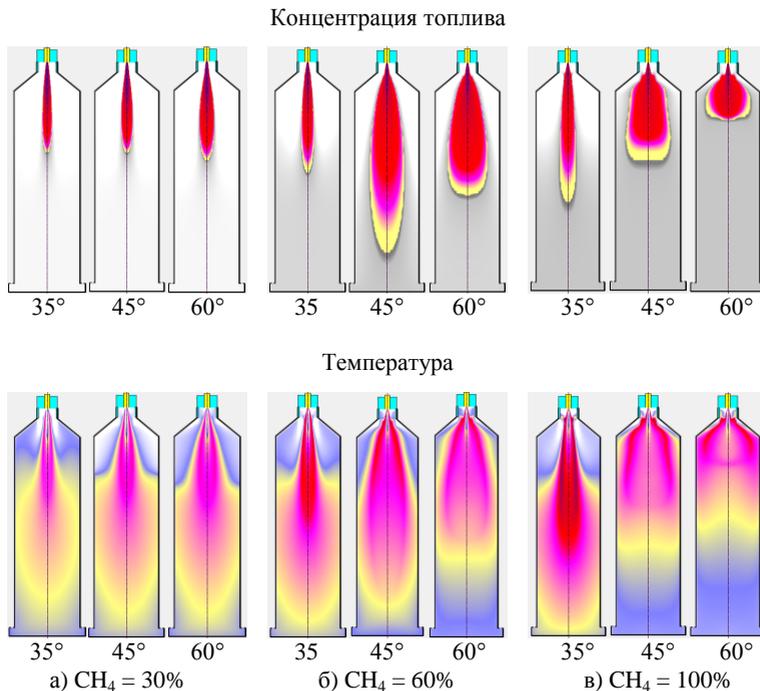


Рис. 5. Поля концентраций и температуры при различном угле закрутки

Сжигание биогаза может проводиться с использованием одной и той же горелки и без изменения размеров топки.

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Библиографический список

1. **Vajpai P.** Biomass to Energy Conversion Technologies. Amsterdam: Elsevier, 2020. 246 p.
2. **Hosseini S.E., Bagheri G., Wahid M.A.** Numerical investigation of biogas flameless combustion // Energy Convers. Manag. Pergamon. 2014. Vol. 81. P. 41-50. DOI: [10.1016/j.enconman.2014.02.006](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.006).
3. **Mordaunt C.J., Pierce W.C.** Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping concentration in CH₄ to emulate biogas combustion // Fuel. 2014. Vol. 124. P. 258-68. DOI: [10.1016/j.fuel.2014.01.097](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.097).
4. **Альмохаммед О.А., Кузнецов В.А.** Численное исследование закономерностей горения природного газа в вертикальной топке // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 163-167. [eLIBRARY ID: [18802944](#)]
5. **Суслов Д.Ю., Рамазанов Р.С.** Моделирование сжигания биогаза в инжекционной горелке с тепловым рассекателем // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 40-47. [eLIBRARY ID: [42788142](#)]
6. **Кузнецов В.А., Трубаев П.А.** Математические модели тепломассопереноса в высокотемпературных установках: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. 272 с. [eLIBRARY ID: [35300593](#)]
7. Investigation of Landfill Gas Output from Municipal Solid Waste at the Polygon / P.A. Trubaev, O.V. Verevkin, B.M. Grishko et al // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 1066. P. 012015. DOI: [10.1088/1742-6596/1066/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1066/1/012015). [eLIBRARY ID: [38619254](#)]



ANALYSIS OF BIOGAS COMPOSITION INFLUENCE ON THE FLAME CHARACTERISTIC

E.S. Leonov and P.A. Trubaev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Abstract. The goal of this paper was the study flame lengths dependence on biogas composition to decide if the boiler`s furnaces using natural gas need reconstruction for biogas usage or it is possible to use the already existing equipment. The analytical one-dimensional model of a diffusion straight-flow flame in unrestricted and restricted space and the numerical three-dimensional model of a turbulent flame in a swirled airflow have been applied in this research. The research has analyzed the flame length for methane content of 20 to 100% in biogas. It has been concluded that by changing the methane content in biogas the heating plants operating mode can be stable on the condition that the biogas flow rate is controlled to ensure constant heat production during its combustion and turbulent flame with a swirled airflow. Combustion, in this case, can be done by using the same burner and without changing the size of the furnace.

Keywords: biogas, flame length, combustion.



УДК 621.98

СОЛНЕЧНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Магистрант **Маринина С.С.**

Канд. техн. наук, доц. **Яворовский Ю.В.**

Д-р техн. наук, проф. **Султангузин И.А.**

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Аннотация. В работе проведено теоретическое исследование системы отопления и горячего водоснабжения с помощью теплового насоса, использующего в качестве низкопотенциального источника теплоты солнечные коллекторы и льдоаккумулятор. Произведен расчет баланса льдоаккумуляторной установки и срока окупаемости льдоаккумуляторной установки, дана оценка экономической целесообразности использования установки посредством сравнения ее с альтернативными наиболее распространенными источниками теплоснабжения.

Ключевые слова: Солнечная энергия, льдоаккумулятор, тепловой насос, возобновляемые источники энергии, солнечные коллекторы.

Введение. В настоящее время во всем мире происходит увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическом балансе стран. Для России данная тема также является актуальной, поскольку способствует снижению использования органического топлива на теплоснабжение зданий, а также снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. Поэтому разработка систем теплоснабжения зданий с использованием ВИЭ является перспективным направлением, в котором необходимо проводить исследования.

В настоящее время одним из перспективных направлений применения ВИЭ является применение тепловых насосов. Тепловой насос можно считать энергетически-эффективной системой, с помощью которой можно получить теплоту для обеспечения нужд системы отопления и системы горячего водоснабжения за счет использования низкопотенциальных источников энергии.

В данной работе в качестве низкопотенциального источника теплоты для теплового насоса предлагается использовать солнечные коллекторы в совокупности с льдоаккумулятором, главная особенность



которого заключается в возможности использования теплоты фазового перехода для обеспечения необходимой теплотой в случае, если солнечной инсоляции недостаточно. Льдоаккумулятор представляет собой размещенный в грунте резервуар с запасами льда и воды, а также оснащенный теплообменным аппаратом для отвода теплоты из него [1].

Цель работы состоит в оценке эффективности применения льдоаккумуляторной установки для теплоснабжения индивидуального дома.

1. Схема теплоснабжения

На рис. 1 представлена разработанная принципиальная схема теплоснабжения с использованием льдоаккумуляторной установки.

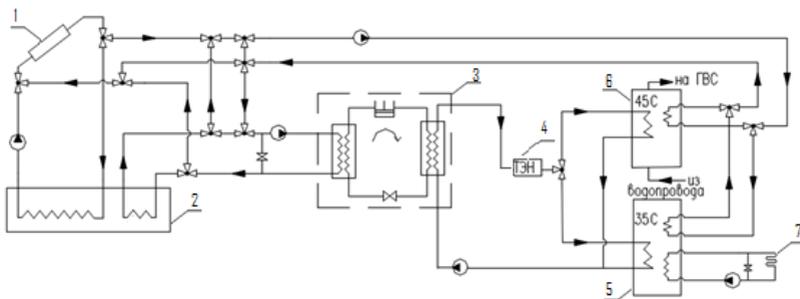


Рис. 1. Принципиальная схема льдоаккумуляторной установки:

1 – солнечные коллекторы; 2 – льдоаккумулятор; 3 – тепловой насос; 4 – термоэлектрический нагреватель; 5 – бак-аккумулятор системы отопления; 6 – бак-аккумулятор системы горячего водоснабжения; 7 – система отопления (теплый пол).

Принцип работы схемы следующий: часть полного солнечного излучения преобразуется коллекторами в полезную для системы теплоту. Затем эта энергия в зависимости от режима работы, т.е. в зависимости от имеющегося температурного уровня с помощью циркуляционного насоса поступает:

1) в бак-аккумулятор горячей воды (бак-ГВС), если температура на выходе из солнечного коллектора превышает температуру горячей воды в баке. При этом нагрев горячей воды в баке может продолжаться до тех пор, пока температура в баке-ГВС не достигнет 75 °С. В данном режиме после бака-ГВС теплоноситель поступает в льдоаккумулятор

где отдает остаток теплоты и далее возвращается в солнечный коллектор. В том случае, если значение температуры, равное $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ превышено, то теплоноситель в обход бака-ГВС поступает сразу в льдоаккумулятор. Такая схема движения теплоносителя характерна для летнего периода в дневное время суток, когда приход солнечной энергии находится в избытке;

2) в тепловой насос, если температура на выходе из солнечного коллектора находится в диапазоне от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура в баке-ГВС меньше $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такая схема движения теплоносителя в большей степени характерна для межсезонного и зимнего периода, когда существует дефицит солнечной энергии;

3) в льдоаккумулятор, если температура на выходе из солнечного коллектора больше температуры в льдоаккумуляторе, а потребность в горячем водоснабжении либо отсутствует, либо осуществляется за счет другого источника теплоты;

4) в бак-аккумулятор системы отопления, если температура на выходе из солнечного коллектора больше температуры в баке системы отопления и меньше температуры в баке-ГВС. Такая схема движения теплоносителя характерна для межсезонного периода, когда приход солнечной энергии есть, но ее недостаточно, чтобы обеспечить нагрев бака-ГВС до требуемых температур.

Наряду с вышеперечисленным, обеспечение тепловой энергией для нужд отопления и горячего водоснабжения может осуществляться посредством извлечения из льдоаккумулятора как явной теплоты, с помощью которой происходит нагрев бака-ГВС или бака-СО (характерно для межсезонного периода и холодных дней в летний период), так и скрытой теплоты, поступающей в испаритель теплового насоса, который свою очередь производит нагрев бака-ГВС или бака-СО (характерно для холодного периода года).

В очень холодных погодных условиях в течение длительного периода времени уровень льда, образующийся в льдохранилище, может достигать максимально допустимого (70% от всего объема). В этом случае теплота берется от солнечных коллекторов и поступает в испаритель высокого давления теплового насоса, который начинает работать при отрицательных температурах. Если температурные условия будут ухудшаться, то тепловой насос больше не сможет удовлетворить весь объем производства горячего водоснабжения и системы отопления. В этой ситуации предусмотрен дополнительный источник теплоты - трубчатый электронагреватель.



2. Описание объекта исследования

Для данной схемы был произведен почасовой расчет для индивидуального жилого дома. Рассматриваемый дом представляет собой одноэтажное здание площадью 102 м^2 , расположенное в городе Москве, где средняя температура наружного воздуха за отопительный период составляет $-2,2^\circ\text{C}$, продолжительность отопительного периода 205 суток, градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) равны $4551 \text{ сут}\cdot^\circ\text{C}$ [2]. Годовое потребление теплоты для ГВС и отопления составляет: $12593 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ [3]. Характеристики дома представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики дома

Характеристика	Значение
Термическое сопротивление стен	$10 \text{ м}^2\text{C}/\text{Вт}$
Термическое сопротивление окон	$0,9 \text{ м}^2\text{C}/\text{Вт}$
Термическое сопротивление подполья	$10 \text{ м}^2\text{C}/\text{Вт}$
Удельная отопительная характеристика здания	$0,2 \text{ Вт}/\text{м}^3\text{C}$
Система отопления	Теплый пол (35°C)
Температурный уровень горячего водоснабжения	45°C

3. Результаты расчета

Расчет проводился для каждого часа в году с использованием реальных данных о погодных условиях в городе Москве за усредненный 2018-2019 г. [4–6]. В результате расчета подобрано количество солнечных коллекторов: 3 шт. Рассчитан объем льдоаккумулятора: 20 м^3 . Минимальная температура охлаждения бака – 0°C . Максимальная температура нагрева льдоаккумулятора – 70°C .

На рис. 2 показан годовой тепловой баланс льдоаккумуляторной установки: зимой наблюдается небольшой прирост и большая потребность в энергии, в то время как солнечные коллекторы дают больше энергии летом. В целом, потребность в энергии за вычетом той энергии, что покрывается за счет солнечного излучения, сопоставима с солнечным приходом в летний период. А именно, за год в льдоаккумуляторе можно накопить $3433 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ с учетом теплоты фазового перехода, при этом в зимний период извлекается $2528 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. За счет использования теплоты фазового перехода температура в льдоаккумуляторе держится на уровне 0°C , что способствует более эффективной работе теплового насоса, коэффициент трансформации которого не опускает-



ся ниже 3, в связи с чем уменьшается количество затраченной энергии на привод насоса. Сезонный коэффициент производительности, представляющий из себя отношение суммарной выработанной теплоты к затраченной энергии составляет 4, что говорит об эффективности использования льдоаккумуляторной установки.

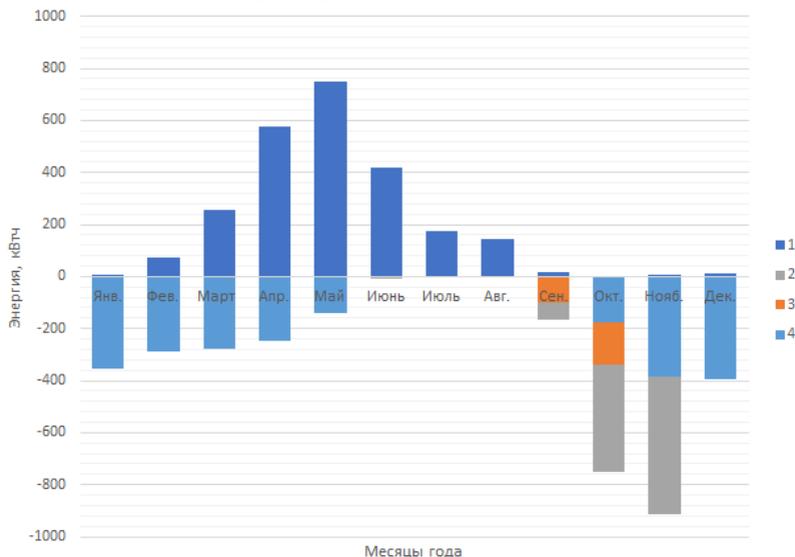


Рис. 2. Годовой тепловой баланс льдоаккумулятора:

1 – количество теплоты, накопленное в льдоаккумуляторе; 2 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для непосредственного нагрева воды в баке системы отопления; 3 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для непосредственного нагрева воды в баке горячего водоснабжения; 4 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для работы теплового насоса.

4. Экономическая оценка использования льдоаккумуляторной установки

Экономическая эффективность использования льдоаккумуляторной установки может быть определена в сравнении с альтернативными наиболее распространенными традиционными энергоисточниками. В настоящей работе были рассмотрены следующие виды систем теплоснабжения: отопление с использованием магистрального газа, отопление с использованием газгольдера и отопление с использованием элек-

тричества. Капитальные затраты (ΔK) на основные элементы установок приведены в табл. 2. Для каждого вида систем теплоснабжения была рассчитана стоимость получения 1 кВт·ч тепловой энергии [7], с учетом которой посчитаны годовые эксплуатационные затраты ($\Delta \Xi$), которые приведены в табл. 3.

Оптимальным решением отопления дома считается тот вариант, для которого срок окупаемости минимальный.

Срок окупаемости рассчитан по методу приведенных затрат [8]:

$$T = \frac{\Delta K}{\Delta \Xi} \quad (1)$$

Таблица 2

Капитальные затраты систем теплоснабжения (ΔK)

Оборудование	Количество, шт.	Цена за единицу продукции, руб.	Стоимость, руб.
Отопление с помощью льдоаккумуляторной установки с тепловым насосом			
Солнечные коллекторы (VFK 135/2 VD)	3	79 722	239 166
Тепловой насос BWC/BW/BWS 301.B06 (5,7 кВт)	1	533 328	533 328
Льдоаккумулятор (20 м ³)	1	46 200	924 000
Отопление с помощью газгольдера			
Газовый котел VR2BB03 (18 кВт), включая монтаж и проведение пуско-наладочных работ	1	200 000	200 000
Газгольдер (1500 м ³), включая все дополнительные работы (земляные, монтаж, пуско-наладочные)	1	765 000	765 000
Отопление с помощью магистрального газа			
Газификация, включая работы по технологическому присоединению	1	260 000	260 000
Газовый котел, включая монтаж и проведение пуско-наладочных работ	1	160 000	160 000
Отопление с помощью электричества			
Электрический котел, включая монтаж и проведение пуско-наладочных работ	1	86 000	86 000

Таблица 3

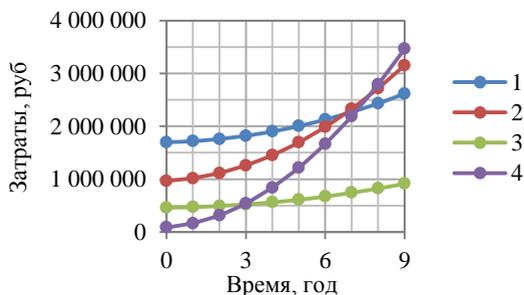
Эксплуатационные затраты систем теплоснабжения (ΔЭ)

Вид системы теплоснабжения	Стоимость за 1 кВт·ч, руб.	Стоимость потребления теплоты, руб./год
Отопление с помощью льдоаккумуляторной установки с тепловым насосом	0,8	10 074
Отопление с помощью газгольдера	3,86	48 609
Отопление с помощью магистрального газа	5,96	75 054
Отопление с помощью электричества	1,62	20 401

Срок окупаемости, рассчитанный по формуле (1) не учитывает следующие факторы:

- 1) рост тарифов на тепловую энергию;
- 2) процентов по кредиту;
- 3) дисконтирования будущих денежных поступлений.

Расчет показал, что магистральный газ является наиболее дешевым способом отопления дома (рис. 3). Однако при отсутствии возможности подключения к нему наиболее экономически целесообразным является использование льдоаккумуляторной установки, срок окупаемости которой составляет 7,2 года в сравнении с отоплением при помощи газгольдера и 6,6 лет в сравнении с электроотоплением.

**Рис. 3. Срок окупаемости:**

- 1 – льдоаккумуляторная установка; 2 – газгольдер; 3 – магистральный газ;
4 – электрокотел



При этом возможно снижение срока окупаемости льдоаккумуляторной установки при условии приобретения льдоаккумулятора у отечественных производителей.

В настоящее время готовых льдоаккумуляторов в России не производят, однако предварительный расчет его стоимости при конструировании в России показал, что цена за 1 кубометр льдоаккумулятора составит 8645 руб./м³, что снижает срок окупаемости до 5 лет в сравнении с отоплением при помощи электроотопления и меньше года в сравнении с газгольдерным отоплением (рис. 4). Капитальные затраты на основные материалы, требующиеся для изготовления льдоаккумулятора приведены в табл. 4.

Таблица 4

Стоимость материалов для изготовления льдоаккумулятора

Стоимость материалов для изготовления льдоаккумулятора (V = 20 м ³)	Количество	Единица измерения	Стоимость, руб.
Бетон	8,8	м ³	37 400
Арматурная сталь	684	кг	18 468
Нержавеющая сталь	8,2	кг	1 968
Алюминий	7,6	кг	1 596
Экструдированный полистирол	135	кг	6 400
Земельные работы	265,9	м ³	100 000
Трубы из нержавеющей стали	17,7	кг	7 080

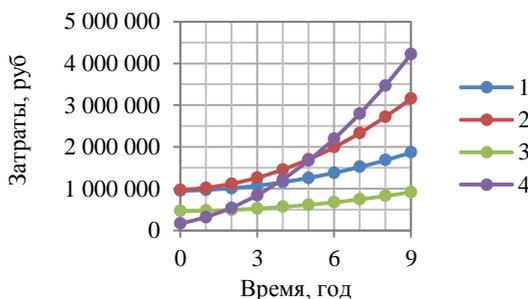


Рис. 4. Срок окупаемости:

1 – льдоаккумуляторная установка; 2 – газгольдер; 3 – магистральный газ;
4 – электродотел



Вывод. Проведенное расчетное исследование показало, что солнечная система теплоснабжения с использованием льдоаккумулятора способна эффективно генерировать теплоту для системы отопления и горячего водоснабжения индивидуального дома: установка обеспечивает 100% снабжение дома тепловой энергией без использования термоэлектрических нагревателей или других низкоэффективных источников теплоты.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что с экономической точки зрения использование льдоаккумуляторной установки наиболее выгодно в случае ее производства в России. Из этого следует, что на данном этапе развития важно уделять внимание разработке отечественных льдоаккумуляторов.

Библиографический список

1. **Gschwend, A., Bertsch, S.S.** Domestic Heat Pump System With Solar Thermal Collectors as Heat Source and Annual Ice Storage [Электронный ресурс] // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. West Lafayette (USA): Purdue University, 2012. P. 1177. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/i racc/1177/> (дата обращения 20.10.2020).
2. **СП 131.13.330-2018.** Строительная климатология. М.: Стандартинформ, 2019. 140 с.
3. **Шелгинский А.Я.** Системы отопления жилых, общественных и производственных зданий: уч. пос. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 116 с.
4. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Калинин; под ред. В.И. Виссарионова. М.: Изд. дом МЭИ, 2011. 276 с. [eLIBRARY ID: [19576611](#)]
5. **Бекман У., Клейн С., Даффи Дж.** Расчет систем солнечного теплоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 80 с.
6. **Тлеуов А.Х.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1. Использование энергии солнечного излучения: Учебное пособие для практических. Астана: КазАУ, 2004. 66 с.
7. **Горшкова Н.С.** Выбирая сравни альтернативы, или как выгоднее отопить дом [Электронный ресурс] // СОК. 2018. № 1. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/vybiraya-sravni-alternativy-ili-kak-vygodnee-otopit-dom> (дата обращения 20.10.2020).
8. **Горшков А.С.** Об окупаемости инвестиций на утепление фасадов существующих зданий // Энергосбережение. 2014. № 4. С. 12-27. [eLIBRARY ID: [21674378](#)]



SOLAR HEATING SUPPLY OF AN INDIVIDUAL HOME USING AN ICE ACCUMULATING UNIT

S.S. Marinina, Y.V. Yavorovsky and I.A. Sultanguzin

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Abstract. The paper has carried out the theoretical examination of the heating system and hot water supply system by using a heat pump which uses as a low-grade heat source a solar panel and ice accumulator. The paper presents the balance calculation of ice accumulation unit and pay-back period for ice accumulation unit, evaluation of the economic feasibility of unit operation by comparing it with the heat supply source alternatives that are commonly available.

Keywords: Solar energy, ice accumulator, heat pump, renewable energy sources, solar panels.



УДК 620(075.8)

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Канд. техн. наук, доц. **Муровский С.П.**Канд. техн. наук, доц. **Муровская А.С.**Ассистент **Иванова Е.В.***Крымский федеральный университет
им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

***Аннотация.** В работе рассмотрены перспективы повышения эффективности комбинированных систем энергоснабжения удаленных объектов на базе возобновляемых источников энергии. Разработанное схемное решение комбинированного энергоснабжения удаленных объектов на базе мини-ГЭС, ГТ и термоэлектрических генераторов, установленных на газоотводной трубе котла, позволит перераспределять энергию между потребителями внутри объекта или накапливать ее в системе электрохимического аккумулирования в период минимального потребления.*

***Ключевые слова:** гидротурбина, термоэлектрический генератор, возобновляемые источники энергии, вторичные энергоресурсы, автономное энергоснабжение*

Территория Республики Крым имеет достаточно разнообразный рельеф местности. Большое количество площади полуострова занимают возвышенности и горные массивы. Следовательно, поставлять бесперебойно электроэнергию удаленным потребителям не всегда является возможным или влечет за собой большое количество затрат. Выход из данной ситуации очевиден: децентрализованное генерирование электричества непосредственно на объектах при помощи использования установок на базе возобновляемой энергетики (ВИЭ). Учитывая сложившуюся ситуацию в энергопроизводстве и состоянии энергосетей, можно прийти к выводу о необходимости развития в Крыму собственных производственных мощностей и разработки инновационных решений на базе ВИЭ, которые бы повысили уровень надежности энергоснабжения потребителей. Одним из направлений развития собственной генерации является установка мини-ГЭС в комплексе с другим источником электрогенерации вблизи удаленных объектов [1].



Целью данного проекта является оценка возможности установки комбинированного энергокомплекса, на базе гидротурбин и термоэлектрических генераторов, установленных на трубе отходящих газов нагревательного котла, для обеспечения автономного электроснабжения объекта. Оценка возможности и целесообразность установки мини-ГЭС на полноводной реке, расположенной вблизи объекта, обеспечивающих генерацию электроэнергии для собственных нужд за счет избыточной энергии проходящей воды с учетом климатических и рельефных особенностей, имеющегося специализированного оборудования на энергорынке Крыма.

Для разработки технических решений по применению мини-ГЭС и термоэлектрических генераторов (ТЭГ) в качестве дополнительного источника электрогенерации в системе децентрализованного электроснабжения удаленного объекта, был проведен анализ гидрологических параметров горных рек Крыма по данным многолетних наблюдений [2]; обоснован выбор рациональной конструкции мини-ГЭС и ТЭГ с учетом особенности территории размещения объекта. Предлагаемые технические решения являются весьма актуальными для децентрализованного электроснабжения удаленных объектов Крымского региона учитывая требования госпрограммы, направленной на энергосбережение традиционных энергоносителей.

Установка мини-ГЭС на реках, которые протекают вблизи жилого объекта, позволит использовать избыточную энергию воды путем генерации электроэнергии для собственных нужд (рис. 1).

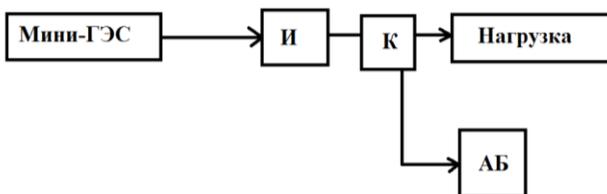


Рис. 1. Блок схема электроснабжения жилого дома на базе мини-ГЭС и аккумуляторного устройства

Гидроэлектростанции малой мощности обладают целым рядом преимуществ, которые делают это оборудование все более популярным. Прежде всего, стоит отметить экологическую безопасность мини-ГЭС – критерий, который становится все более важным в свете проблем защиты окружающей среды. Малые ГЭС не оказывают вредного

влияния ни на параметры, ни на качество проходящей воды. Дополнительными преимуществами мини-ГЭС является возможность работы в автоматическом режиме без обслуживающего персонала.

Так же есть возможность установить гидроагрегат на водогрейном котле в контуре циркуляции теплоносителя, что позволит использовать энергию циркулирующего теплоносителя для вращения гидротурбины и, тем самым, выработки дополнительной электрической энергии. Необходимым условием подобных проектов является установка запаасающих электрическую энергию устройств. Они будут установлены с целью запасания излишков электрической энергии, вырабатываемой за счет всех генерирующих устройств. В момент пиковой нагрузки мы сможем использовать запасенную энергию для электропитания потребителей дома. Таким образом сможем избежать дополнительной генерации энергии за счет дизель-генератора (ДГ) или питающей линии [3]. В работе будет рассмотрен усовершенствованный проект автономного электроснабжения жилого дома, расположенного вблизи реки, который заключается в установке ТЭГ на дымоходе от котла, гидротурбины (ГТ) в контуре циркуляции теплоносителя котла и установке более мощных гидроагрегатов на русле протекающей речки. Как результат, разработанное схемное решение (рис. 2) окажет положительный эффект на экономическую и экологическую сторону данного проекта. Так же позволит приобрести большую независимость и автономию от центральной электрической сети [4].

Мини – ГЭС является основным источником электроэнергии в неотапительный период. На время отопительного сезона предусмотрена комбинированная система для генерации электрической энергии, которая включает в себя ТЭГ, установленный на газоотводящей трубе действующего котла и ГТ, установленную в контуре циркуляции теплоносителя котла. Конструкция ТЭГ, применяемая в качестве автономного источника питания, содержит узел нагревателя, имеющий в поперечном сечении развитую поверхность, узел охладителя и батареи термоэлементов, выполненные в виде модулей, которые собраны в блок, размещенный между узлами нагревателя и охладителя [5].

Нагрев поверхности нагревателя, происходящий за счет конвекционного тепла от выходящих газов котла и одновременно охлаждение холодных спаев термоэлементов за счет притока наружного воздуха в котел приводит к возникновению разности температур между холодными и горячими спаями термоэлементов, на которых благодаря эффекту Зеебека возникает термо-ЭДС, которая по специальным тоководам направляется в нагрузку общего электрического контура.



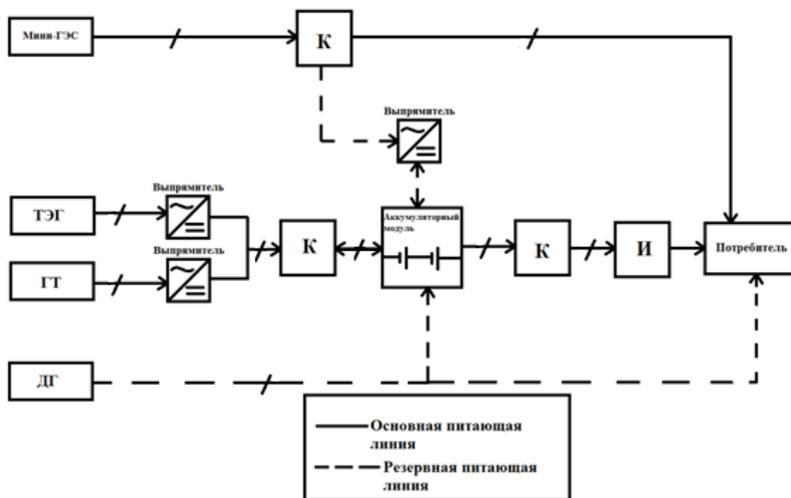


Рис. 2. Предлагаемая комбинированная система автономного энергоснабжения объекта

Рабочая температура рассматриваемых элементов Пельтье составляет от $+50^{\circ}\text{C}$ до $+90^{\circ}\text{C}$. Поскольку, температура отходящих газов котла составляет, порядка 100°C , а температура окружающей среды не будет превышать $5-10^{\circ}\text{C}$, следовательно, работа элементов Пельтье будет наиболее эффективной.

Технической задачей проекта явилось совершенствование конструкции комбинированной системы автономного электроснабжения (КСАЭС) в составе энергоустановки на базе ТЭГ и микро-ГЭС, снижение случайных отказов и обеспечение бесперебойной работы за счет введения дополнительного генерирующего устройства, расширение эксплуатационных возможностей, повышение надежности и безопасности.

Техническая задача решается тем, что КСАЭС, подключенная к потребителю электроэнергии, содержит два внешних источника генерации электроэнергии на базе ТЭГ и микро-ГЭС, силовой блок и преобразователь напряжения, соединенный с аккумуляторной батареей и блоком управления газового котла.

Исходя из проведенных расчетов, потребление электроэнергии выбранным объектом, с учетом имеемого оборудования, в неделю со-

ставило $W_{\text{пер}} = 115$ кВт · ч. С целью определения пика потребляемой нагрузки был построен недельный график распределения нагрузки всего оборудования объекта. Анализируя полученный суммарный график нагрузки видно, что максимальное значение составляет 3 560 Вт. Для накопления излишков генерируемой электроэнергии выбираем аккумуляторную батарею (АБ) типа GLP 12-200 с номинальным напряжением $U_{\text{ном}} = 12$ В, и емкость $q_{\text{ном}} = 200$ А · ч [6]. Для обеспечения объекта электроэнергией потребуется 22 аккумуляторные батареи. Был проведен эксперимент с элементами Пельтье. На металлическую трубу дымохода были закреплены элементы Пельтье, с целью обеспечения хорошего теплового контакта применялась термопаста. Элементы были соединены последовательно для выработки требуемого напряжения [5]. Для чистоты эксперимента внутри трубы поддерживалась постоянная температура, соответствующая температуре отходящих газов котла (рис. 3).

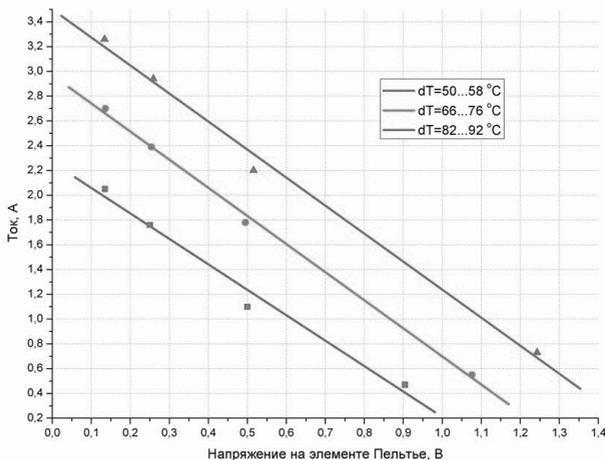


Рис. 3. ВАХ исследуемого элемента Пельтье

Входе эксперимента было установлено, что данный проект имеет право на существование и может быть применен в практических целях. Согласно проведенным расчетам по действующим методикам и исходя из описания установки и размеров трубы, было получено, что для данного проекта потребуется 24 одинаковых блока элементов Пельтье, которые будут вырабатывать электроэнергию и подавать её на АБ.

Суммарная генерируемая мощность составит 1,4 кВт, что позволит обеспечить до 30% от всей требуемой электроэнергии. В ходе разработки комбинированной энергоустановки, включающей в себя ТЭГ и ГТ на циркуляции теплоносителя, появилась необходимость автоматического включения и переключения заряда АБ от ТЭГ и ГТ. Было принято решение о разработке автоматического контроллера, который бы переключал заряд АБ от ТЭГ и ГТ.

Разработанная КСАЭС работает следующим образом. Источники генерации электроэнергии на базе мини-ГЭС с однофазным генератором обеспечивают потребителя электроэнергией с требуемыми параметрами. При выработке мощности больше потребления объектом, избыток электроэнергии идет на заряд накопителя энергии, который разряжается при недостатке мощности выработки на источниках генерации, компенсируя недостающую мощность потребления. Главной чертой данного комплекса является наличие внешнего источника генерации электроэнергии на базе ВИЭ, подключенного к шинам питания потребителя электроэнергии (рис. 4).

В проекте предусмотрен объем автоматизации, который обеспечивает оптимальный режим энергоснабжения удаленного объекта, экономию материальных и энергетических ресурсов, обеспечение условий для обслуживания технологического оборудования [4].

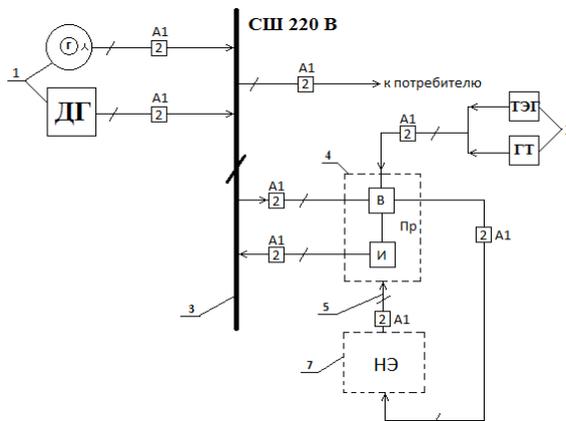


Рис. 4. Схемное решение децентрализованного энергоснабжения удаленного объекта в составе мини-ГЭС, ТЭГ и ГТ:

1 – электрогенерирующие устройства; 2 – контроллеры; 3 – система шин;
4 – преобразователь; 5 – питающая линия

Выводы

1. Рассмотрена возможность внедрения перспективных технологий на базе ВИЭ для децентрализованного электроснабжения удаленных объектов, которые позволяют существенно снизить потребление традиционных энергоресурсов.

2. Проведен расчет системы энергопотребления объекта, с учетом возможного перспективного развития, выбраны и рассчитаны с применением математического моделирования наиболее эффективные электрогенерирующие агрегаты для данного объекта, разработаны преобразовательные устройства для обеспечения качественной электроэнергией объекта.

3. Проведенные расчеты показали, что разработанная комбинированная система энергоснабжения является эффективной, позволит обеспечить электроэнергией дом с пиковой нагрузкой - 3,6 кВт. Генерация электроэнергии от мини – ГЭС составит 3 кВт при работе в нормальном режиме, а от ТЭГ и ГТ в контуре котла - 1,6 кВт. Экономия электроэнергии от центральных сетей в течении года составит 8000 руб.

Библиографический список

1. **Муровский С.П., Курзо А.Н.** Система автономного электроснабжения удаленных потребителей на базе возобновляемых источников энергии // Успехи современной науки: Сб. ст. Межд. научно-практ. конф. Белгород: Эпицентр, 2017. С. 54-58. [eLIBRARY ID: [29119124](#)]

2. Поверхностные водные объекты Крыма. Справочник. Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. 113 с.

3. Statistical data processing during wind generators operation / M. Zaliskyi, Y. Petrova, M. Asanov, E. Bekirov // International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications. 2019. Vol. 8(1). P. 33-38. DOI: [10.18178/ijeetc.8.1.33-38](#). [eLIBRARY ID: [38694737](#)]

4. **Муровский С.П., Сокут Л.Д.** Оптимизация состава и структуры автономных систем энергоснабжения на основе возобновляемых источников энергии // Строительство и техногенная безопасность. 2012. № 44. С. 115-124. [eLIBRARY ID: [25516978](#)]

5. **Шостаковский П.** Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. 2010. № 1. С. 120-126. [eLIBRARY ID: [15136041](#)]

6. **Kuvshinov V.V., Al-Rufaae F.M.** The use of solar power plants to provide energy security of the crimean region // Applied Solar Energy. 2019. Vol. 55(4). P. 252-255. DOI: [10.3103/S0003701X19040066](#). [eLIBRARY ID: [41818684](#)]



7. **Тахистов Ф. Ю.** Расчет параметров термоэлектрических модулей с учетом температурных зависимостей термоэлектрических свойств // Термоэлектрики и их применения: Докл. VIII Межгос. сем. СПб.: ФТИ, 2002. С. 311-316.



EFFICIENCY INCREASE OF COMBINED POWER SUPPLY SYSTEMS OF REMOTE FACILITIES

S.P. Murovskii, A.S. Murovskaia and E.V. Ivanova

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

Abstract. The paper has examined the outlook for efficiency increase for combined power supply systems of remote facilities on the basis of renewable energy sources. The developed schematic solution of combined power supply for remote facilities on basis of mini HPP, Gas turbine, and thermoelectric generators, installed on the gas outlet pipe of the boiler, will allow to redistribute the energy between consumers inside the facility or accumulate it in the electrochemical storage system when consumption is minimal.

Keywords: hydro turbine, thermoelectric generator, renewable energy source, secondary energy resources, stand-alone power supply.



ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

ENERGY AND RESOURCE SAVING IN TECHNOLOGIES



УДК 662.998

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВНУТРИ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАНОВКИ ЗА СЧЕТ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА

Канд. техн. наук, доц. **Нешпоренко Е.Г.**Д-р техн. наук, проф. **Картавцев С.В.**Магистрант **Иванова С.В.***Магнитогорский технический университет
им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск*

Аннотация. *Предложена математическая модель процесса рекуперации теплоты внутри футеровки высокотемпературной установки за счет термического разложения метана в условиях охлаждения высокотемпературных установок. Исследуемая модель позволяет оценить возможность использования регенеративного теплоиспользования, с целью снижения тепловых потерь через ограждение высокотемпературной установки за счет утилизации теплоты жидкого теплоносителя, позволяя повысить производительность высокотемпературного процесса. Все высокотемпературные установки имеют основную задачу – обеспечение непрерывности процесса с минимальным расходом топлива, используя энергию как основных, так и вторичных энергоресурсов (ВЭР). В условиях пиролиза метан наиболее термически устойчив, так как термическая деструкция метана термодинамически возможна при температуре выше 560 °С. Однако достигая значительных скоростей движения метан разлагается при температурах порядка 900°С, а при температуре больше 1400 °С полностью распадается на углерод и водород. Природный газ как энергоноситель имеет массу достоинств и по сравнению с другими видами топлива может быть использован в полной мере, так как для него легко организовать полное сжигание с минимальными потерями тепла. Стоит отметить, что в природном газе отсутствует балласт и вредные примеси, также ему свойственна высокая теплота сгорания и при сжигании развиваются высокие температуры.*

Ключевые слова: *энергетический баланс, высокотемпературные процессы, термическое разложение метана, охлаждение футеровки, энергоэффективность.*

Промышленные высокотемпературные установки относятся к основным потребителям топливно-энергетических ресурсов страны. Все



теплотехнологические высокотемпературные схемы связаны с высокой энергоемкостью и относительно низкой энергоэкономичностью.

Повышение эффективности использования топлива в высокотемпературных установках достигается тремя путями [1, 2, 3]:

- уменьшение тепловых отходов;
- регенерации тепловых отходов;
- внешнее использование тепловых отходов в энергетических или технологических целях.

Для большинства высокотемпературных реакторов на показатели топливоиспользования влияют тепловые потери теплоты через кладку и с охлаждением отдельных элементов ограждения, в окружающую среду.

Рассматривая тепловые потери, теряемые через ограждение, то метод термохимической регенерации с применением перфорированного ограждения позволит дополнительно снизить расход топлива на технологический процесс.

Перфорированное ограждение представляет собой стенку с равномерно продуваемыми отверстиями, позволяющий отбирать тепло от стенки высокотемпературного реактора и возвращая тепловые потери в технологический процесс [4, 5]. В качестве такого газа рассматривается газообразное топливо – природный газ.

При нагревании природного газа свыше 1400 °С осуществляется процесс термического разложения метана на углерод и водород [6].

Существует множество аппаратов для пиролиза метана в жидком теплоносителе, которые позволяют снизить тепловые потери через стенки высокотемпературного реактора за счет утилизации теплоты отработанного газообразного теплоносителя, что приводит к повышению эффективности установки [7, 8, 9]. При предварительном подогреве углеводородного сырья в патрубке подвода метана за счет утилизации теплоты отработанного газообразного теплоносителя, снижает тепловые потери в окружающую среду, что приводит к повышению производительности аппарата для пиролиза природного газа в жидком теплоносителе [9, 10].

Цель работы

Исследование математической модели процесса рекуперации теплоты внутри футеровки высокотемпературной установки за счет разложения термического разложения метана, что дает определить коэффициент теплоотдачи и температурного поля нагрева метана внутри одной трубки при заданных граничных условиях и теплофизических параметрах рассматриваемой системы.



Решение поставленной задачи позволит повысить энергоэффективность высокотемпературного процесса. Также входе расчетов был проведен анализ существующих аппаратов для пиролиза метана с жидким теплоносителем для производства черной металлургии, определены зависимости: теплоотдачи, режима течения газа (при $Re \leq 105$), число Нуссельта, количество теплоты, принятой и отданной в процессе разложения, от температуры нагрева природного газа и представлен график долей углерода и водорода входе термического разложения в условиях охлаждения высокотемпературной установки.

1. Термическое разложение метана

Постановка задачи

Отверстие расположено в ограждении высокотемпературной установки и подвергается воздействию высоких температур со стороны зоны обработки материала, где также на отверстие подается определенное количество теплоты. Внешние стенки отверстия принудительно не охлаждаются и находятся под воздействием окружающей среды температура, которой ниже температуры внутренних стенок отверстия.

Природный газ поступает в отверстие (рис. 1) диаметром $d_{\text{отв}} = 0,1$ м, с температурой окружающей среды $t_{\text{нач}} = 0$ °С и со скоростью движения $w_{\text{ПГ}} = 3$ м/с, температура внутри высокотемпературной установки $t_{\text{кон}} = 1500$ °С.

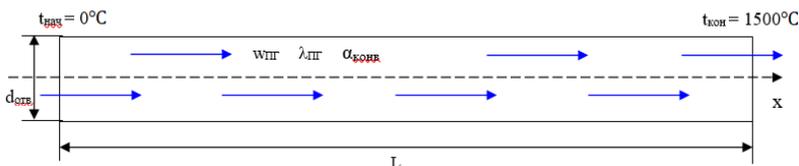
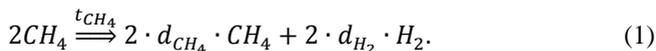


Рис. 1. Постановка задачи отверстия с теплоносителем

Во время движения внутри трубки, природный газ начинает постепенно нагреваться от противоположно движущегося теплового потока жидкого теплоносителя, получая энергию для диссоциации С-Н (1), тем самым приобретенная энергия природным газом возвращается обратно в высокотемпературный процесс [11, 12]:



Решение поставленной задачи

Задача относится к уравнению нестационарной теплопроводности, так как температура природного газа, на каждом участке трубы, изменяется во времени, где также изменяется количество подведенной Q_1 кДж/м³ и отведенной теплоты Q_2 кДж/м³. Течение внутри трубки рассматривается относительно координатной плоскости X.

Краевыми условиями для решения дифференциального уравнения теплопроводности являются действие теплового потока жидкого теплоносителя на движущейся поток газа, внутри трубки. Распределение температуры природного газа tПГ и коэффициента теплоотдачи α от поверхности стенок трубки к движущемуся газу задается граничными условиями 3-го рода (2, 3) [11]:

$$\alpha_T(t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) = -\lambda_T \frac{dt}{dx}, \quad (2)$$

где: α_T – коэффициент теплоотдачи стенки трубки, Вт/(м² · °C); $t_{\text{кон}}$ – температура на конце трубки, °C; $t_{\text{нач}}$ – начальная температура движущегося теплоносителя, °C; λ_T – теплопроводность стенки трубки, Вт/(м·°C); t – искомая температура движущегося теплоносителя, °C.

Температурное поле рассчитывается помощью метода конечных разностей (рис. 2), используя уравнение:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_T \frac{dt}{dx} \right) + \frac{d}{dr} \left(\lambda_T \frac{dt}{dr} \right) = 0. \quad (3)$$

Расчеты граничных условий дополняются критериальными уравнениями расчета теплоотдачи. При ламинарном движении теплоносителя в трубе (3) [11]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} = \\ &= 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{L}{30} \right)^3}{\nu^2} \right)^{0,1}. \end{aligned} \quad (4)$$

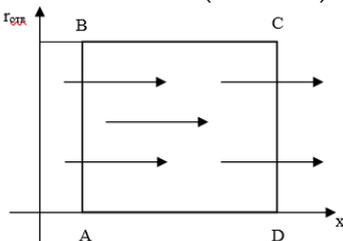


Рис. 2. Одна вторая ось-симметричная область отверстия

В ходе расчетов, трубку разделили на 30 частей, чтобы определить в разный момент времени коэффициент теплоотдачи и температуру нагрева движущегося теплоносителя, при условии $Q_1 \approx Q_2$:

$$Q_1 = \alpha_{\text{ПГ}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \cdot \pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot \frac{L}{30}, \quad (5)$$

$$Q_2 = C \cdot \rho_{\text{ПГ}} \cdot V_{\text{ПГ}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \cdot \pi \cdot \omega_{\text{ПГ}} \cdot \frac{d_{\text{отв}}^2}{4}, \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{ПГ}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \cdot \pi \cdot d_{\text{отв}} \cdot \frac{L}{30} = C \cdot \rho_{\text{ПГ}} \cdot V_{\text{ПГ}} \cdot (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}) \cdot \pi \cdot \omega_{\text{ПГ}} \cdot \frac{d_{\text{отв}}^2}{4}. \quad (7)$$

В разный момент времени при постоянном диаметре и скорости, метан начинает отбирать тепло от стенок отверстия и распадается на углерод и водород в определенных долях в зависимости от температуры нагрева (рис. 3). Из графика видно, что при достижении температуры нагрева метана свыше 500 °С увеличивается скорость разложения метана, и доля чистого метана становится меньше, а доля водорода увеличивается. Также при 900 °С наблюдается полное разложение метана на С-Н.

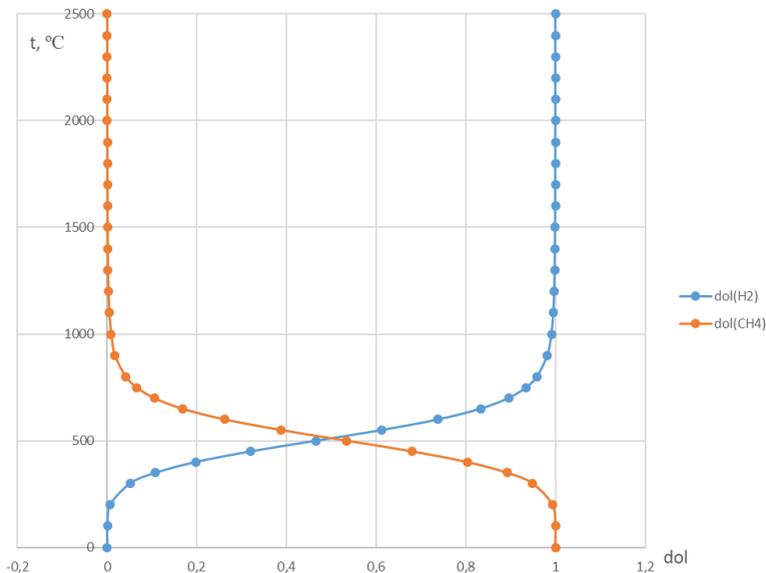


Рис. 3. Зависимости долей метана и водорода от температуры нагрева



Исходя из выше изложенных расчетов и полученных значений тепловых потоков, были выявлены зависимости коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности и критерия течения газообразного теплоносителя, от температуры разложения метана (рис. 4–6).

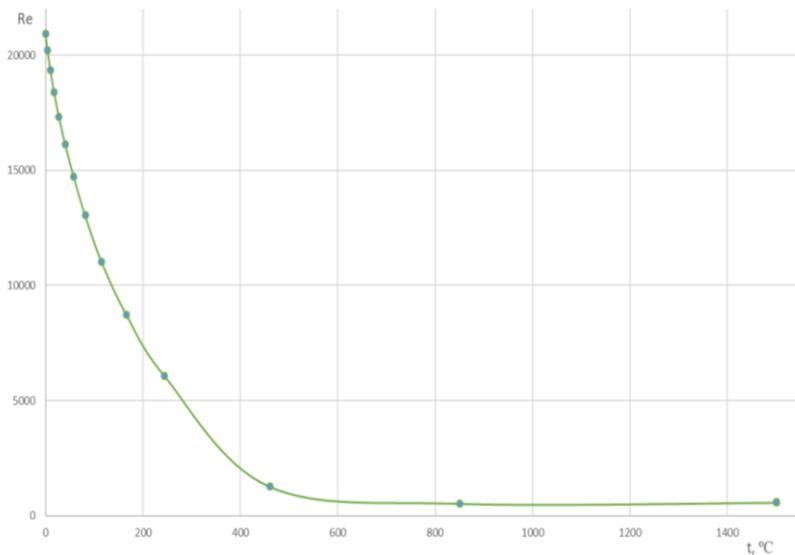


Рис. 4. Критерий течения газообразного теплоносителя ПГ

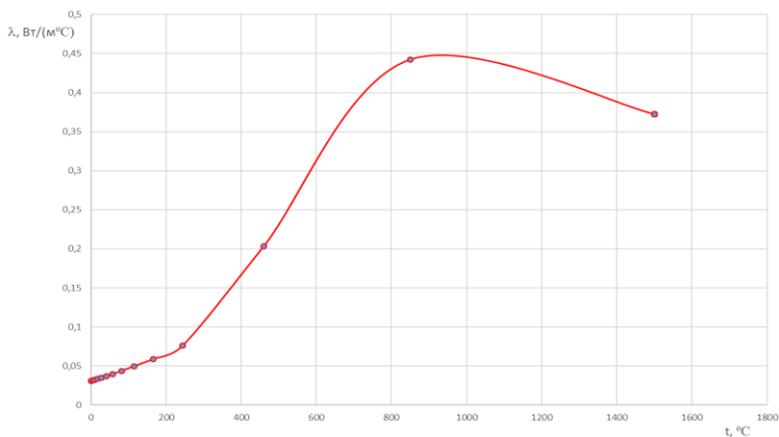


Рис. 4. Коэффициент теплопроводности ПГ

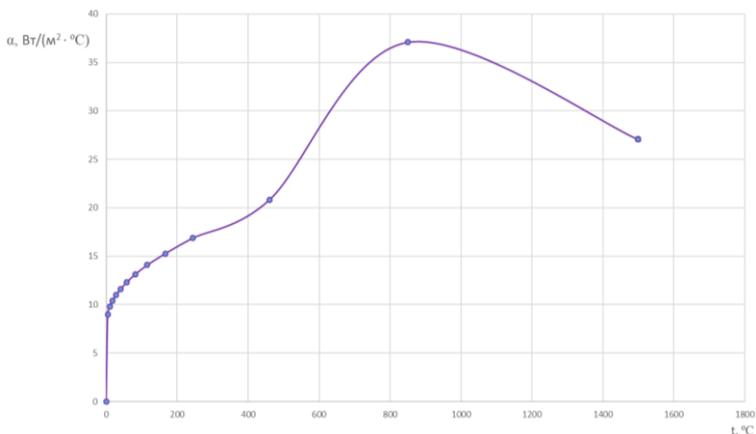


Рис. 6. Коэффициент теплотдачи ПГ

На рис. 7 показаны тепловые потоки движущегося теплоносителя внутри отверстия и поток от жидкого теплоносителя, где на каждом из участков отверстия метан приобретает и отдает приблизительно одинаковый тепловой поток и возвращает его обратно в жидкий теплоноситель. Согласно рис. 7 на 13 участке отверстия метан полностью распадается и нагревается до конечной температуры жидкого теплоносителя $t_{\text{кон}} = 1500^{\circ}\text{C}$, и тепловой поток не успевает дойти до конца отверстия, что позволяет снизить тепловые потери внутри высокотемпературного процесса [13].

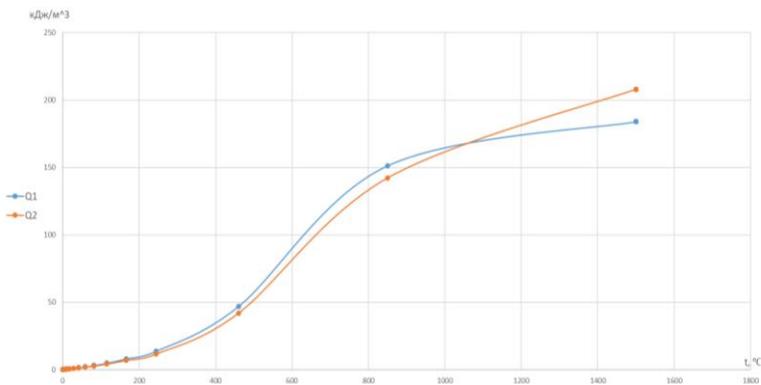


Рис. 7. Тепловые потоки



2. Результаты исследования

В качестве газообразного теплоносителя рассматривался природный газ с температурой 0°C, температура жидкого теплоносителя внутри высокотемпературной установки 1500°C. Количество выделяемой теплоты от процесса термического разложения метана равно 183,9 – 207,9 кДж/м³. Максимальное среднее значение коэффициента теплоотдачи природного газа внутри отверстия составил 37,1 Вт/(м²·°C), при диаметре 0,1 м отверстия и длине 1 м. Теплопроводность газа входе разложения при температуре 1500°C составил 0,37 Вт/(м·°C). Все представленные расчеты являются продолжением исследования продувки перфорированного ограждения, для снижения тепловых потерь через ограждения высокотемпературных процессов и установок [14-16].

Заключение

Входе решения поставленной задачи, составлена математическая модель энергетического баланса процесса термического разложения метана в условиях охлаждения высокотемпературных технологических установок, где были получены теплофизические свойства метана при нагревании от жидкого теплоносителя. Полученное решение дает возможность оценить применения природного газа в качестве газообразного теплоносителя внутри перфорированного ограждения, для регенерации теплового потока [17, 18, 19, 20], что позволит снизить тепловые потери и повысит процесс интенсификации плавки внутри высокотемпературной установки.

Библиографический список

1. Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки: Учеб. для вузов / И.И. Перелетов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.; Под ред. А.Д. Ключникова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 336 с.
2. **Ключников А.Д.** Энергетика технологии и вопросы энергосбережения. М.: Энергоатомиздат, 1986. 128 с.
3. **Чоджой М.Х.** Энергосбережение в промышленности / Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 272 с.
4. **Нешпоренко Е.Г., Баскакова А.А.** Математическая модель теплового состояния пластины с равномерно распределенными продуваемыми отверстиями // Энергетика Теплотехнологий. 2018. № 4. С. 9-12. [eLIBRARY ID: [37416648](#)]
5. **Ячиков И.М., Миронова Г.А., Петин С.Н.** Математическое моделирование теплового состояния расплава в реакторе с кипящим слоем // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2007. № 1(1). С.170-176. [eLIBRARY ID: [21357669](#)]
6. **Рябов В.Д.** Химия нефти и газа. М.: Техника, 2004. 288 с.



7. Пат. [RU 71982 U1](#) МПК C10G 9/34. Устройство пиролиза сырья в жидком теплоносителе / С.Н. Петин, А.Д. Ключников; патентообл. ГОУВПО «МЭИ». № 2007141786/22, заявл. 14.11.2007, опубл. 27.03.2008. [eLIBRARY ID: [38436541](#)]

8. Пат. [RU 58120 U1](#) МПК C10G 9/34. Аппарат для пиролиза углеводородного сырья в жидком теплоносителе / С. В. Картавец, С. Н. Петин, Е. Г. Нешпоренко, А. В. Бурмакина; патентообл. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. № 2006114864/22; заявл. 02.05.2006, опубл. 10.11.2006. [eLIBRARY ID: [38427992](#)]

9. Пат. [RU 2352519 C1](#) МПК C01B 3/02. Способ пиролиза углеводородного сырья / А.Д. Ключников, С.Н. Петин; патентообл. ГОУВПО «МЭИ». № 2007141785/04, заявл. 14.11.2007, опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11. [eLIBRARY ID: [37547506](#)]

10. **Шиповская Ю.И., Петин С.Н.** Перспектива производства СПГ на котельной / Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2017: сб. науч. ста. 6-й Межд. мол. науч. конф. Том 4. Курск: Университетская книга, 2017. С. 275-277. [eLIBRARY ID: [31750369](#)]

11. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: уч. для вузов / 4-е изд., перераб и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

12. **Гольдфарб Э.М.** Теплотехника металлургических процессов. М.: Металлургия, 1967. 439 с.

13. **Вафина Д.Э., Бикмухаметова К.М., Картавец С.В.** Влияние потерь теплоты через ограждения в высокотемпературных теплотехнологических процессах // Энерго - и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: мат. Даниловских чтений. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 99-102.

14. **Wesenberg M.H.** Gas Heated Steam Reformer Modelling: Ph. D. Thesis. Trondheim (Norwegian): TNNU, 2006. 210 с.

15. **Попов С.К., Свистунов И.Н.** Энергосбережение в топливных печах посредством конверсии природного газа // Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 45–54. DOI: [10.24160/1993-6982-2017-2-45-54](#). [eLIBRARY ID: [28879326](#)]

16. **Картавец С.В., Иванова С.В., Старкова Е.С.** Оценка значения тепловых потерь в высокотемпературных процессах // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. школы-конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. Вып. 4. С. 71–72. [eLIBRARY ID: [42325663](#)]

17. **Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В.** Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2007. 153 с. [eLIBRARY ID: [19603958](#)]

18. **Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В., Сысуев Н.Е.** Обоснование эффективности регенерации теплоты через перфорированные ограждения



высокотемпературных установок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2013. № 1 (41). С. 86–89. [eLIBRARY ID: [18882670](#)]

19. **Нешпоренко Е.Г.** Экспериментальное исследование гарниссажного режима регенерации теплоты через перфорированное ограждение установок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 4 (32). С. 81–84. [eLIBRARY ID: [15521025](#)]

20. **Нешпоренко Е.Г.** Регенерация тепловых потерь через перфорированное ограждение высокотемпературных технологических установок // Вестник Московского энергетического института. 2008. № 1. С. 74–78. [eLIBRARY ID: [10344468](#)]



STUDY OF HEAT RECOVERY PROCESS INSIDE A LINING OF A HIGH-TEMPERATURE PLANT USING THERMAL DECOMPOSITION OF METHANE

E.G. Neshporenko, S.V. Kartavtcev and S.V. Ivanova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

Abstract. The paper has suggested the mathematical model of the heat recovery process inside the high-temperature plant's lining using thermal decomposition of methane in conditions of high-temperature plants cooling. The examined model allows evaluation of regenerative heat use possibility to reduce heat losses through the enclosure of high-temperature plant by utilizing the heat of a liquid heat carrier which can increase high-temperature process productiveness. All high-temperature plants have a primary objective – ensure process continuity with minimal fuel flow rate using the energy of primary as well as secondary energy resources (SER). In pyrolysis conditions, methane is the most thermally stable because methane thermal decomposition happens at a temperature higher than 560°C. However, when methane reaches a significant speed of movement it decomposes at a temperature of about 900°C, and temperature 1400°C breaks up to carbon and oxygen. Natural gas, as an energy carrier, has many advantages and in comparison, with the other fuel types, it can be used to the full extent because it is easy to organize its complete combustion with minimal heat losses. It should be noted that natural gas has no ballast or harmful substances, it possesses high heat value and its combustion creates high temperatures.

Keywords: energy balance, high-temperature process, methane thermal decomposition, cooling of lining, energy efficiency.



УДК 57.013

КЛАСТЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОД, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ, ПО ВЕЛИЧИНЕ СУММАРНОЙ АНТИКОСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ

Д-р биол. наук, проф. **Калайда М.Л.**Канд. биол. наук **Гордеева М.Э.***Казанский государственный энергетический
университет, г. Казань*

Аннотация. На большинстве крупных водоемов располагаются объекты энергетики, следовательно, вопрос качества воды стоит особо остро на акватории таких водных объектов. В работе приводится кластерная классификация водных объектов по величине суммарной антиоксидантной активности и рекомендации по значениям суммарной антиоксидантной активности воды на водозаборе и водосбросе теплоэлектростанций.

Ключевые слова: водоемы объектов энергетики, качество воды, комплексный показатель, антиоксидантная активность, кластеры вод, индекс структуры воды.

Водные системы являются источником воды как для людей, так и для промышленности. В настоящее время в условиях усиления антропогенного воздействия на водные ресурсы особенно актуальным становится определение приоритетных задач в области охраны вод и их рациональное использование [1]. Особую значимость в данном контексте приобретают водоемы, являющиеся объектами многоцелевого использования, в том числе и для целей энергетики. В Республике Татарстан насчитывают 7 действующих электростанций (Казанская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, Нижнекамская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, Набережночелнинская ТЭЦ, Урусинская ГРЭС), 2 тепловых электростанции (Заинская ГРЭС и ПГУ-ТЭС ПАО «Нижнекамскнефтехим»), 1 гидроэлектростанцию (Нижнекамская ГЭС). Для функционирования перечисленных объектов энергетики необходим источник воды – различные типы водоемов. В большинстве случаев вода используется в значительных количествах в качестве хладагента. К качеству воды, используемой объектами энергетики, предъявляются достаточно высокие требования, в первую очередь к жесткости воды и количеству примесей (не более 10 мг/л). Соблюдение требований к качеству воды на



этапе водоподготовки позволяет предотвратить аварийные остановки теплоэнергетического оборудования. Всегда возникает желание найти комплексный показатель качества вод, который отражал бы возможности и направления использования воды: с наименьшим количеством примесей для технических объектов, «живой» воды для использования в сельском хозяйстве и аквакультуре, без «живых» объектов для питьевого потребления людьми. Одним из таких актуальных комплексных показателей качества воды в настоящее время является суммарная антиоксидантная активность (САОА).

Цель работы провести классификацию вод водоемов-охладителей объектов энергетики по величине суммарной антиоксидантной активности, используя кластерный подход.

Материалы и методы

Суммарную антиоксидантную активность (САОА) определяли кулонометрическим методом с помощью электрогенерированного брома. Пробы анализировали на кулонометре «Эксперт-006» (ООО «Эконик-Эксперт», Россия) по сертифицированной методике [2]. Электрогенерацию брома осуществляли из 0.2 М раствора калия бромида в 0.1 М водном растворе кислоты серной при постоянной силе тока 100.0 мА. В электролитическую ячейку вводили 30 мл фонового раствора, и, при достижении индикаторным током определенного значения, аликвоту водного экстракта исследуемого образца объемом 100 мкл. Определение проводили при комнатной температуре. Прибор калибровали спиртовым раствором российского стандартного образца (РСО) рутина [3], приготовленного по действующей Государственной фармакопее XI издания. САОА выражали в мг стандартного образца рутина (Ru) на 1 дм³ (л) извлечения или в г Ru на 100 г исследуемого образца.

Результаты и обсуждения

В специализированной гидрохимической литературе [4, 5] отсутствует классификация вод по показателю САОА и не приводятся нормы САОА для целей водоподготовки [6] на объектах энергетики.

Проведенный множественный корреляционно-регрессионный анализ САОА и других физико-химических показателей выявил слабую связь с содержанием в воде растворенного кислорода и окислительно-восстановительным потенциалом и сильную связь с рН [1]. Многочисленные исследования на кафедре «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета позволили выделить ряд кластеров вод с разными химическими характеристиками (рис. 1) [7]:



Кластер №1 – 7.5469 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №2 – 6.8212 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №3 – 6.0956 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №4 – 5.3699 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №5 – 4.6443 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №6 – 3.9912 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №7 – 3.2655 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №8 – 2.4673 мг Ru на 1 дм³;
 Кластер №9 – 1.8142 мг Ru на 1 дм³.

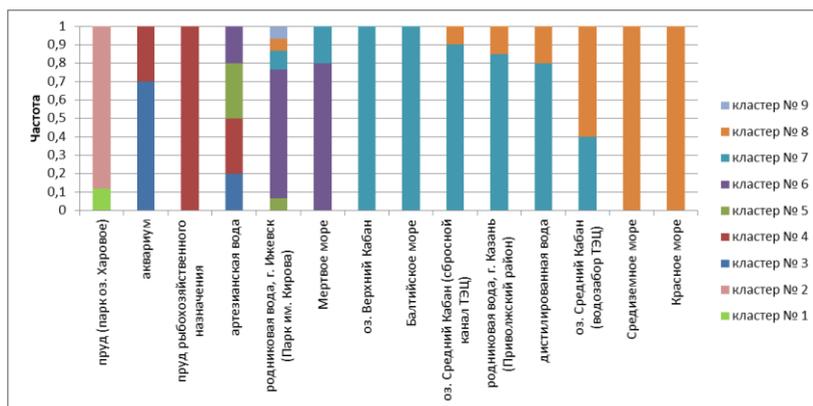


Рис. 1. Кластеры воды различных водных объектов, выделенные по величине суммарной антиоксидантной активности

Как видно из данных, приведенных на рис. 1 вода сбросного канала объекта энергетики характеризуется наличием кластера № 7 (доминирование, 90%) и кластера № 8 (10%). При этом, вода аналогичного озера, не испытывающего антропогенного воздействия, представленного в виде сброса подогретых теплых вод объекта энергетики, состоит из одного кластера - № 7 (3.2655 мг Ru на 1 дм³).

Следует отметить, что вода водозаборной части водоема-охладителя характеризуется наличием двух кластеров воды – №7 и №8. В отличие от воды сбросного канала, в воде водозабора меняется доминирующий тип кластера с №7 на № 8 (CAOA – 2.4673 мг Ru на 1 дм³; встречаемость 60%).



Для сравнения обратим внимание на состав кластеров в морях. Средиземное и Красное моря, которые характеризуются достаточным количеством солей (36-40 и 40-41‰ соответственно) характеризуются наличием одного кластера в структуре – кластера № 8 (CAOA – 2.4673 мг Ru на 1 дм³). Воды Балтийского моря отличаются более низкой соленостью – 3-4‰, в связи с чем данное море называют солоноватоводным водоемом. По структуре воды Балтийское море, аналогично Средиземному и Красному, состоят из одного типа кластера, однако происходит смена значений CAOА с 2.4673 мг Ru на 1 дм³ на 3.2655 мг Ru на 1 дм³.

Особое внимание привлекают артезианские и родниковые воды. Именно данные типы вод наиболее сложные по своей кластерной структуре (рис. 2). В артезианской воде присутствует 4 типа кластеров вод (кластеры: 3, 4, 5, 6, что соответствует значениям CAOА 6.0956; 5.3699; 4.6443; 3.9912 мг Ru на 1 дм³), в родниковой воде – 5 типов (кластеры: 5, 6, 7, 8, 9, что соответствует значениям CAOА 4.6443; 3.9912; 3.2655; 2.4673; 1.8142 мг Ru на 1 дм³).

По сравнению с родниковой и артезианской водой, воды озер, испытывающих антропогенное воздействие, имеют более простую кластерную структуру (присутствие 2 кластеров воды вместо 4-5). При этом воды море (за исключением Метрового моря) и водоемов рыбохозяйственного значения характеризуются только одним кластером воды (рис. 2).

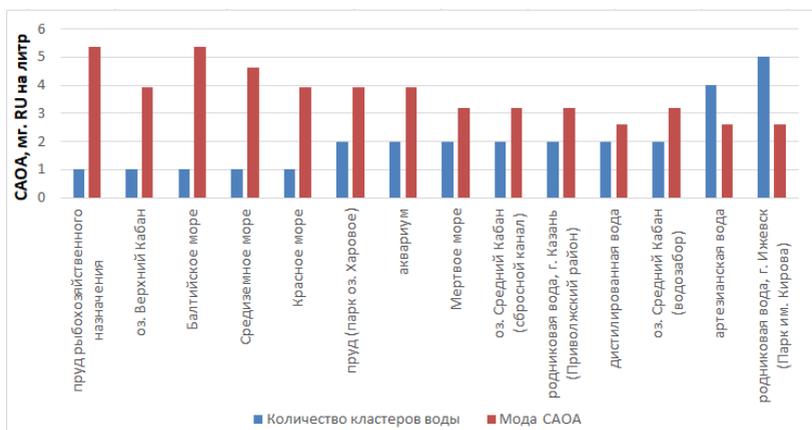


Рис. 2. Количество кластеров в воде из разных водных объектов

Из данных, представленных на рис. 2 видно, что упрощенной (один кластер воды) структурой воды обладают воды прудов рыбохозяйственного назначения с родниковым питанием, озера со слабым антропогенным воздействием и моря (Балтийское, Средиземное и Красное), при этом мода САОА максимальная из исследованных. Обычной структурой вод (наличие двух кластеров) характеризуются воды прудов с родниковым питанием, расположенные в городской черте, озера с антропогенным воздействием, в том числе водоемы-охладители объектов энергетики, моря (Мертвое море), родниковые и дистиллированные воды. Усложненной кластерной структурой (4 кластера) характеризуются артезианские воды, а сложной – родниковые воды (5 кластеров), при этом мода значений САОА минимальная.

Поскольку в структуре природных вод отличалось разное процентное соотношение кластеров, которые характеризовались разными значениями САОА воды предложен индекс структуры воды, который определялся по формуле 1:

$$\text{Исв} = (\text{Чв} \times \text{САОА}) \times \text{Кт} / \text{К}, \quad (1)$$

где Чв – частота встречаемости кластера воды (в долях);

САОА – значение суммарной антиоксидантной активности (мг Ru на 1 дм³);

Кт – коэффициент трофии (0,5 – дистрофные водоемы; 1 – олиготрофные водоемы; 2 – мезотрофные водоемы; 3 – эвтрофные водоемы);

К – количество выделенных кластеров в анализируемом образце.

На рис. 3 показано разнообразие характеристик вод из разных источников по индексу структуры воды. Как видно из данных, приведенных на рис. 3, минимальные значения индекса отмечены для дистиллированной воды (0,7765).

Артезианская вода и родниковая относятся ко 2 группе со значениями индекса от 0,8 до 2,5.

Следующая группа характеризуется значениями индекса от 2,5 до 7. В этой группе представлены различные типы озер, реки и моря.

Максимальные значения индекса, от 7 и выше, принадлежат рыбохозяйственным водоемам с высоким уровнем трофии.

Особо следует отметить воды озера Средний Кабан со значениями индекса 2,7865-3,1856. В 20-е годы XX века воды этого озера были признаны наилучшими с позиции солевого состава и мягкости для использования в теплоэнергетике. Как видно из данных по индексу структуры воды эта вода близка к дистиллированной и родниковой.



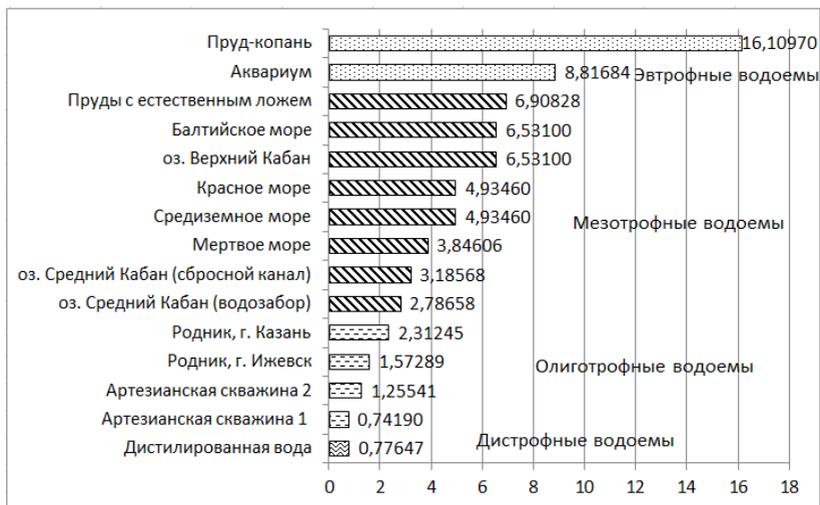


Рис. 3. Классификация вод по индексу структуры воды

Как и любые физико-химические показатели, значения САОА воды изменяются в течение года (рис. 4).

Из данных, приведенных на рис. 4 видно, что диапазон изменения значений САОА воды в зоне водозабора от 2,6124 до 5,3699 мг Ru/дм³, в зоне водосброса от 2,6124 до 6,0956 мг Ru/дм³ [8]. Таким образом, размах вариационного ряда в зоне сбросного канала ТЭЦ выше в 1,3 раза.

Повышение значений САОА воды наблюдается в июле месяце при максимальных уровнях развития биоты. В зоне водозабора аналогичное повышение наблюдается также в феврале, на участке без оледенения, в зоне максимального перемешивания вод с высоким содержанием кислорода. Количество кластеров воды, встреченных как в зоне водозабора, так и в зоне водосброса за год – 5 типов.

Выводы по работе

Вода в целом имеет сложную структуру с разными величинами САОА, которые позволяют выделить кластеры. Выделены воды с упрощенной структурой, содержащие в составе 1 кластер. Эти воды характерны для водоемов с обилием жизни – рыбохозяйственных прудов, морей. Для обычных вод характерно наличие 2-х кластеров в структуре. Это воды, используемые человеком широко для хозяйственно-бытового потребления. Воды с 3-4 кластерами наблюдаются в

артезианских скважинах. Наиболее сложная по кластерному составу - вода родниковая (5 кластеров), может быть это делает ее такой привлекательной для людей.

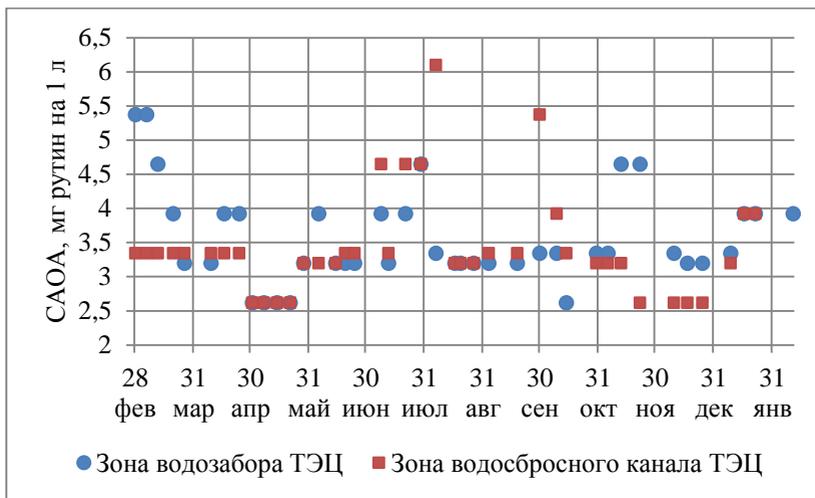


Рис. 4. Годовая динамика САОА (мг Ru/дм³) в водоеме-охладителе объекта энергетики

Проведенный анализ выявил, что объекты энергетики, как гидро-, так и теплоэнергетики используют воды, содержащие, как правило, 2 кластера в составе с САОА 3,2655 и 2,4673 мгRu/дм³. Если для забора вод для объектов теплоэнергетики предпочтение должно отдаваться со значениями САОА - 2,4673 мгRu/дм³, то на сбросе вод в природные водоемы значения должны составлять - 3,2655 мгRu/дм³.

Сложная кластерная структура воды позволила предложить индекс структуры воды, который отражает процентное соотношение кластеров с определенными значениями САОА и степень трофии вод:

$$\text{Исв} = (\text{Чв} \times \text{САОА}) \times \text{Кт} / \text{К},$$

где Чв – частота встречаемости кластера воды (в долях); САОА – значение суммарной антиоксидантной активности (мг Ru/дм³); Кт – коэффициент трофии (0,5 – дистрофные водоемы; 1 – олиготрофные во-

доемы; 2 – мезотрофные водоемы; 3 – эвтрофные водоемы); К – количество выделенных кластеров в анализируемом образце.

Воды, используемые для питья (артезианские, родниковые) характеризуются значениями индекса в диапазоне от 0,8 до 2,5. С повышением трофии значения индекса повышаются, так в мезотрофных водоемах значение индекса лежит в диапазоне от 2,5 до 7, а в эвтрофных выше 7. Максимально встреченное значение индекса принадлежит пруду-копани, используемому в рыбохозяйственных целях (Исв = 16.1097). В случае технического использования может выбираться вода с наименьшими значениями индекса. Отмечается тенденция сокращения числа кластеров воды с увеличением значений индекса структуры воды.

Библиографический список

1. **Гордеева М.Э., Калайда М.Л.** Комплексная оценка состояния экосистемы озер. Урбанизированные территории. Chisinau: Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 237 с.
2. **Лапин А.А.** МВИ-001-44538054-07. Суммарная антиоксидантная активность. Методика выполнения измерений на кулонометрическом анализаторе. Жердевка: ООО Концерн «Отечественные инновационные технологии», 2007. С. 6.
3. ТУ 9369-141–04868244-07. Рутин – стандартный образец. Технические условия.
4. **Строганов Н.С., Бузинова Н.С.** Практическое руководство по гидрохимии. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1980. 196 с.
5. ГОСТ 27065-86. Качество вод. Термины и определения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 8 с.
6. ГОСТ 30813-2002. Вода и водоподготовка. Термины и определения / Сб. ГОСТов. М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2010. 22 с.
7. **Калайда М.Л., Лапин А.А., Гордеева М.Э.** Кластерная характеристика вод по величине их суммарной антиоксидантной активности // Состояние и перспективы научно-технологического развития рыбохозяйственного комплекса: Мат. нац. науч.-практ. конф. Махачкала: ДагГАУ, 2019. С. 242-249. [eLIBRARY ID: [41836079](#)]
8. **Gordeeva M.E.** Integrated use of lake-type basin-coolers for recreational purposes // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 288. P. 012041. DOI: [10.1088/1755-1315/288/1/012041](#). [eLIBRARY ID: [41627786](#)]



CLASSIFICATION OF WATERS, USED BY ENERGY FACILITIES, BY SUMMARY ANTIOXIDANT ACTIVITY VALUE

M.L. Kalayda and M.E. Gordeeva

Kazan state power engineering university, Kazan

Abstract. The paper, using the cluster approach, executes water classification for cooling basins at the energy facilities by the summary of the antioxidant activity value. The index of water structure has been suggested which is defined by the general antioxidant activity and trophic coefficient of water. In case of technical use, it is possible to choose water with the lowest index values. The paper gives recommendations on the summary of the antioxidant activity of water values at the water intakes and outputs of CHP.

Keywords: basins of energy facilities, water quality, composite indicator, antioxidant activity, water clusters, index of water structure.



УДК 62-83+621.941

РАСЧЕТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Д-р техн. наук, доц. **Фролов В.В.**¹Канд. техн. наук, доц. **Приходько О.Ю.**²Ст. преп. **Слипченко С.Е.**³¹Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, г. Харьков²Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород³Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», г. Харьков

Аннотация. Разработана математическая модель оптимизации режимов резания при работе на токарных станках с дискретным изменением частот вращения шпинделя и подачи. Критерием оптимальности для данной модели является минимальный разброс мощностей резания на диаграмме нагружения. Использование этого критерия позволяет повысить эффективность работы асинхронного электродвигателя за счет более равномерной нагрузки при выполнении технологической операции. Решение задачи оптимизации выполняется с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова: мощность резания, эквивалентная мощность, скорость резания, генетический алгоритм, токарный станок, резец, асинхронный электродвигатель.

Введение.

Обеспечение энергоэффективности металлорежущего оборудования по затрачиваемой на формообразование электроэнергии, является важной задачей для машиностроения. Карпов А.В. [1] указывает, что на образование 1 т стружки приходится 400 – 600 кВт·ч электроэнергии. Мрочек Ж.А. [2] выделяет на основе анализа изменения КПД и $\cos \varphi$ область энергосберегающих скоростей резания, что позволяет вычислить оптимальную энергосберегающую скорость резания, которая обеспечивает максимальное значение $\cos \varphi$.

Адаменко В.М. [3] доказал, что при максимальном $\cos \varphi$ удельная энергоемкость резания минимальна. Эффективное использование асинхронных двигателей (АД) приводов металлорежущего оборудования зависит от характера нагрузки на валу. В [4] предлагается произ-



водить выбор АД для станка на основе эквивалентных величин. Замена АД на станке не всегда экономически выгодна, а выбор режимных параметров, таких как подача и частота вращения шпинделя, сильно влияет на вид нагрузочной диаграммы. Шарапов Р.Р. в [5] отмечает, что недогруз АД может быть не более 25%.

Цель работы – выбор энергоэффективных режимных параметров технологической операции в контексте максимального использования возможностей АД металлорежущего оборудования.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: разработать математическую модель дискретной оптимизации; выполнить программную реализацию модели; проверить адекватность результатов расчетов.

Разработка математической модели оптимизации.

Имеем следующую конфигурацию технологической системы:

1. Универсальный токарный станок модели 16К20 с мощностью АД $P_n = 7,5$ кВт (модель 4А132S4У3) и диапазонами частот 12,5 – 1600 об/мин (22 ступени) и подач 0,05 – 2,8 мм/об (22 ступени), КПД коробки скоростей $\eta_m = 0.75$.

2. Обрабатываемая заготовка сталь с $HB = 197$ ед. и $\sigma = 598$ МПа. Партия деталей 60 шт. Параметры технологических переходов приведены на рис. 1.

3. Инструмент – резец токарный: материал режущей части Т15К6, стойкость $T = 45$ мин; радиус при вершине $R = 2$ мм; главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_v = 10^\circ$.

Необходимо подобрать такие сочетания частот вращения и подач по каждому переходу, чтобы загрузка электродвигателя привода главного движения по мощности была максимальная.

Выполним предварительный расчет режимов резания по [6] и построим диаграмму нагружения (см. рис. 1б). Анализ показывает, что обеспечение максимальной загрузки АД по мощности реализуется при минимизации заштрихованной площади на рис. 1б.

Тогда критерий оптимальности выражается в виде (1)

$$f(\vec{n}, \vec{s}) \rightarrow \min, f(\vec{n}, \vec{s}) = \sum_{i=1}^k \left| P_{dv} - P_{rez}(n_i, s_i) \right| \cdot \frac{L r x_i}{n_i \cdot s_i}. \quad (1)$$

Набор технических ограничений (2) формируем по [7].



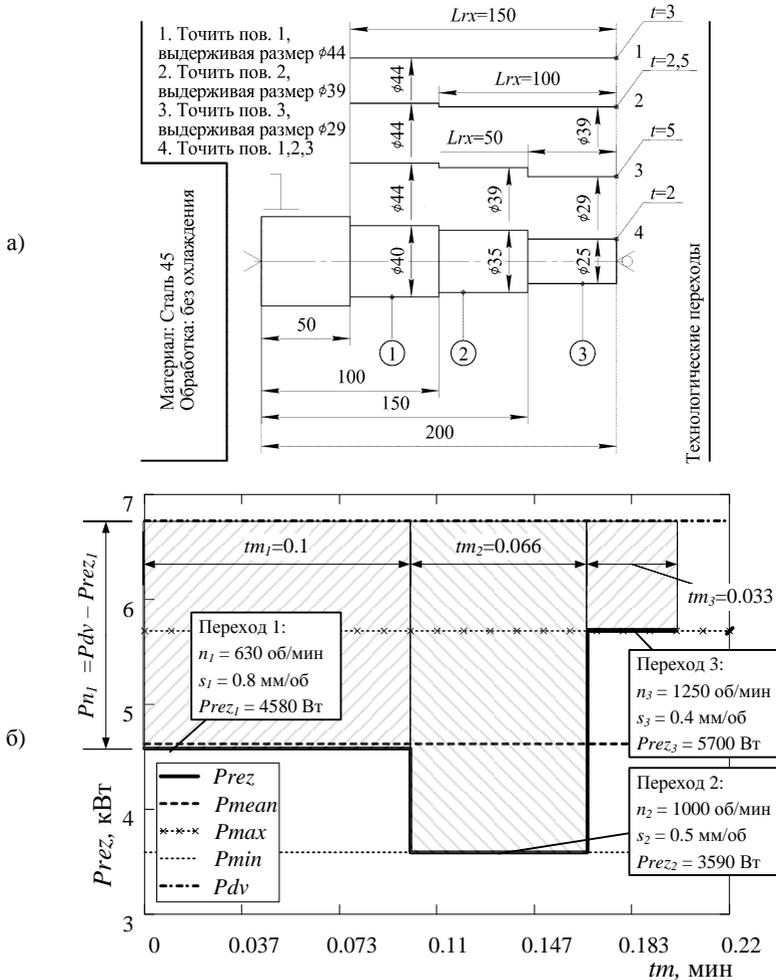


Рис. 1 Параметры технологических переходов:

- а) схемы обработки заготовки: L_{rx} – длина рабочего хода, мм; t – глубина резания, мм; б) режимные параметры и нагрузочная диаграмма: P_{mean} – средняя мощность по переходам, кВт; P_{max} , P_{min} – максимальная и минимальная мощности по переходам, кВт; P_{dv} – мощность АД, приведенная к шпинделю; $Prez_t$ – мощность резания, кВт; n_t – частота вращения, об/мин; s_t – подача, мм/об; tm_t – машинное время перехода, мин; Pn_t – недогруз АД, кВт

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k \frac{Lrx_i}{n_i \cdot s_i} \leq [tm_{sm}], \\ i = 1, k, n_i \in \{np_1, np_j, \dots, np_{22}\}, s_i \in \{sp_1, sp_j, \dots, sp_{22}\} \\ [V_i]_i \leq V(n_i, s_i)_i \leq [V(n_i, s_i)]_i, Prez(n_i, s_i)_i \leq P_n \cdot \eta_n \cdot 1.2 \cdot 1000, \\ Pz(n_i, s_i)_i \leq [P_{pl}], Pz(n_i, s_i)_i \leq [P_{tool}] \end{array} \right. \quad (2)$$

где $[tm_{sm}]$ – предельное суммарное машинное время, согласно сменному заданию, мин; k – количество переходов; np_j, sp_j – значения ступеней частоты вращения и подачи по паспорту станка; $[V_i]_i$ – скорость резания, обусловленная особенностями износа твердосплавной пластины, м/мин; $[V(n_i, s_i)]_i$ – скорость резания, допускаемая парой обрабатываемая заготовка-режущий инструмент, м/мин; $Pz(n_i, s_i)_i$ – сила резания для технологического перехода, Н; $[P_{pl}]$ – сила резания, допускаемая прочностью режущей пластины, Н; $[P_{tool}]$ – сила резания, допускаемая жесткостью режущего инструмента, Н; η_n – КПД двигателя при номинальном режиме.

Модель с учетом (1) и (2) принимает классический вид операционной модели из [8, с. 32].

Реализация модели выполнена в системе Matlab с использованием генетического алгоритма (ГА), позволяющего выполнять целочисленную оптимизацию. Поскольку необходимо обеспечить подбор заданных по паспорту частот вращения и подач из допустимого множества. Процесс определения значения дискретного параметра организован следующим образом: ГА оперирует с целочисленными кодами параметров в диапазоне от 1 до 22; функции расчета значений технических ограничений и критерия оптимальности снабжены декодером целых кодов в конкретные значения по паспорту станка. Хромосома состоит из чередующихся значений частот вращения и подач, при этом частоты значения имеют нечетные локусы, а подачи четные. Тогда, хромосома для нашего случая будет иметь 6 генов, в каждый из которых подставляется одно из 22 значений. Общая область поиска задачи оптимизации составит $22^6 = 113 \times 10^8$, для решения для таких задач по данным [9] эффективно использовать ГА. Значения $[V(n_i, s_i)]_i$ и $Pz(n_i, s_i)_i$ определяются специальным программным модулем расчета режимов резания для точения, разработанным на основе данных из [6] и использующим производственные правила при вычислениях. Этот модуль подключается к программе через OLE автоматизацию.



Выполним несколько серий численных экспериментов исходя из того: насколько возможно улучшить имеющееся решение ручного расчета; возможно ли получить оптимальное решение без задания начального значения параметров.

Первая серия численных экспериментов проводится с заданием граничного количества тактов ГА равного 200 и параметра проверки стабилизации функции – 100 тактов, остальные параметры принимаются по умолчанию в стандартных настройках. Обоснование эффективности работы ГА при изменении параметров основано на данных разных авторов, например из [10]. Данные ручного расчета оформляются в виде хромосомы

[18 17 20 14 21 13],

которую можно декодировать

[630 0,8 1000 0,5 1250 0,4].

Эта хромосома заносится в начальную популяцию ГА, а затем запускается расчет. Результаты расчета показывают, что существует лучшее решение, как по энергоэффективности, так и по производительности:

[630 1 800 1 1000 0,6].

Сравнительный анализ проводим с помощью модели АД построенной в системе MathCAD на основе Г-образной схемы замещения. Фрагмент результатов расчета реактивной мощности для первого перехода представлен на рис. 2.

Расчеты реактивной мощности выполнены в трех вариантах: по параметрам схемы замещения [11, с. 16, табл. 1]; через коэффициент реактивной мощности (КРМ); по данным паспорта АД [11, с. 17, табл. 2]. Для всех вариантов реактивная мощность оформлена как функция $Q_i(s)$ от скольжения s . Тогда для мощности резания 5410 Вт, полученной после оптимизации, с учетом КПД привода главного движения и 20% перегрузки определяем скольжение $s = 0,024$, и по нему рассчитываем реактивную мощность. КРМ в этом случае будет $\text{tg}\phi = 0.619$. При ручном расчете реактивная мощность $Q = 3991$ квар, а $\text{tg}\phi = 0.68$. Следовательно, получаем снижение доли реактивной мощности в активной на 9%. Остальные переходы по доле реактивной мощности будут иметь снижение на 18% и 3,8% соответственно.



Вариант 1:	$Q_I(s) := \frac{3 \cdot U_{In}^2}{X_x} + \frac{(3 \cdot U_{In}^2)}{(X_I + X'_2) \cdot \left[\left(\frac{sk}{s} \right)^2 - 1 \right]}$	$Q_I(0.024) = 4.454 \times 10^3$
Вариант 2:	$Q_2(s) := P_I(s) \cdot \tan(\operatorname{acos}(\cos\phi(s)))$	$Q_2(0.024) = 4.267 \times 10^3$
Вариант 3:	$Q_m := \frac{Dlx1 \cdot P_{2n}}{Dl1(s_n) \cdot \eta(s_n) \cdot \cos\phi(s_n)} = 3.21 \times 10^3$ $Q_{nom} := \frac{P_{2n}}{\eta(s_n)} \cdot \tan(\operatorname{acos}(\cos\phi(s_n))) = 4.867 \times 10^3$	$\beta(s) := \frac{P_2(s)}{P_{2n}}$
	$Q_3(s) := Q_m \cdot (1 - \beta(s)^2) + \beta(s)^2 \cdot Q_{nom}$	$Q_3(0.024) = 4.272 \times 10^3$

Рис. 2 Фрагмент расчета реактивной мощности:

U_{In} – номинальное фазное напряжение, В; X_x – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, Ом; $(X_I + X'_2)$ – индуктивное сопротивление двигателя, Ом; sk – критическое скольжение; s – скольжение под нагрузкой;

P_I – мощность, потребляемая из сети, Вт; $Dlx1$ – ток холостого хода, А; P_{2n} – номинальная мощность, Вт; $Dl1$ – действительное значение фазного тока двигателя, А; β – коэффициент загрузки по мощности; P_2 – полезная мощность, Вт; Q_m – реактивная мощность намагничивания, квар; Q_{nom} – реактивная мощность при номинальном режиме работы, квар.

Удельный часовой расход электроэнергии согласно [12, с. 31] на рис. 3 показывает, что найденное ГА решение обеспечивает экономию электроэнергии по сравнению с ручным расчетом за счет более высокой загрузки привода по мощности. Здесь удельный расход рассчитываем как функцию от скольжения, с учетом того, что загрузка по холостым ходам не изменяется и можно использовать формулу при отсутствии холостых ходов.

КПД машины: $\eta_{mm} := \eta_n \cdot \eta_m = 0.656$		⇒	Удельный расход электроэнергии:	
$\alpha := 0.9$			$\Delta E(s) := \frac{\beta(s) + \alpha \cdot (1 - \eta_{mm})}{\eta_{mm} \cdot \beta(s)}$	
Ручной расчет:	Оптимальный расчет:		Экономия электроэнергии на операцию кВт*ч:	
$sp_r := \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.016 \\ 0.026 \end{pmatrix}$	$sp_{ga} := \begin{pmatrix} 0.024 \\ 0.022 \\ 0.029 \end{pmatrix}$		$\varnothing := \sum_{i=1}^3 \left(\overrightarrow{\Delta E(sp_{r_i})} - \overrightarrow{\Delta E(sp_{ga_i})} \right) = 0.399$	

Рис. 3 Суммарная экономия электроэнергии:

sp_r, sp_{ga} – скольжения для ручного и оптимизационного расчетов



При выполнении второй серии экспериментов получены данные [800 0,7 800 1 1250 0,4],

которые показывают, что наблюдается снижение доли реактивной мощности на 5,5%, 18,1%, 0% соответственно по переходам, а общая экономия составит 0.324 кВт·ч. Здесь во всех случаях наблюдается снижение машинного времени на 25% и 19%.

Выводы по работе. Предложенный подход к повышению загрузки электродвигателя привода главного движения по мощности на основе расчета энергоэффективных режимов резания, позволяет получить повышение производительности обработки и одновременно обеспечивает снижение доли реактивной мощности и экономию электроэнергии при выполнении технологической операции. Такой эффект достигается подбором частот вращения и подач по каждому переходу, на основе предложенного в данной работе критерия оптимизации.

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Библиографический список

1. **Карпов А.В.** К вопросу повышения энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3. С. 43–47. [eLIBRARY ID: [37317717](#)]
2. **Мрочек Ж.А., Адаменко Д.В., Адаменко В.М.** Оценка и выбор критериев оптимальности системы резания по энергопотребляющим показателям технологического оборудования // Вестник БНТУ. 2010. № 5. С. 11–14. [eLIBRARY ID: [25401392](#)]
3. **Адаменко В.М., Мрочек Ж.А.** Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования // Наука и техника. 2012. № 4. С. 3–6. [eLIBRARY ID: [23244575](#)]
4. **Голованов И.Г., Конев В.Ю.** Выбор электродвигателей методом эквивалентных величин с целью оптимизации технологического процесса // Сборник научных трудов ангарского государственного технического университета. 2017. Т. 1. № 1. С. 188–193. [eLIBRARY ID: [29245984](#)]
5. **Шарапов Р.Р., Мамедов А.А., Харламов Е.В.** Энергетический расчет приводов подъемно-транспортных машин на ЭВМ (табличный процессор EXCEL) // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 183–186. [eLIBRARY ID: [24275560](#)]
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение-1. 2001. 944 с. [eLIBRARY ID: [27455474](#)]



7. Оптимизация режимов обработки бандажей на специальном стенде / И.В. Шрубченко, Л.В. Мурыгина, В.Ю. Рыбалко, Н.А. Щетинин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 4. С. 67–73. [eLIBRARY ID: [19109286](#)]

8. Концепция создания системы автоматизированного проектирования процессов резания в технологии машиностроения / С.И. Пестрецов, К.А. Алтунин, М.В. Соколов, В.Г. Однолько. М.: Издательский дом «Спектр». 2012. 212 с. [eLIBRARY ID: [19610089](#)]

9. **Goncharov E.N., Leonov V.V.** Genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. P. 1101–1114. DOI: [10.1134/S0005117917060108](#). [eLIBRARY ID: [31025508](#)]

Оригинальная версия: **Гончаров Е.Н., Леонов В.В.** Генетический алгоритм для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами // Автоматика и телемеханика. 2017. № 6. С. 173–189. [eLIBRARY ID: [29213916](#)]

10. **Сперанский Д.В.** Генетический алгоритм размещения контрольных точек в цифровом устройстве // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2017. № 17, № 3. С. 353–362. DOI: [10.18500/1816-9791-2017-17-3-353-362](#). [eLIBRARY ID: [29897307](#)]

11. **Красник В.В.** Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий / 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. 1983. 136 с.

12. **Копытов Ю.В., Чуланов Б.А.** Экономия электроэнергии в промышленности: Справочник. М.: Энергия. 1978. 120 с.



CALCULATION OF THE ENERGY-EFFICIENT CUTTING MODES IN TURNING OPERATION

Frolov V.V.¹, Prikhodko O.Yu.² and Slipchenko S.E.³

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

³*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv*

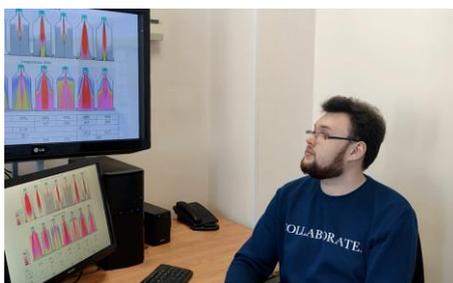
Abstract. The mathematical model has been developed for cutting modes optimization for the operation of lathe machines with the discrete change of spindle rotational speed and feed. The optimality criterion for this model is the minimal cutting power spread on the loading diagram. The use of this criterion allows to increase the operational efficiency of an induction motor by means of more balanced loading during the manufacturing operation. The optimization problem is solved by using the genetic algorithm.

Keywords: cutting power, equivalent power, cutting speed, genetic algorithm, lathe, cutting tool, induction motor.



СЕКЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

YOUNG RESEARCHERS SECTION



УДК 620.311.48

ГИБРИДНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ДЛЯ ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ПОДСТАНЦИЙ

Студент **Васильковский А.Р.**Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Коваленко В.В.***Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов*

Аннотация. В данной статье рассмотрен проект по внедрению комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов, приведены ее преимущества и функциональная схема. Проведен анализ рынка внедрения по внедрению комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов, выявлены конкурентные преимущества, разработана структура и предложен принцип работы комбинированной электростанции.

Ключевые слова: топливные ячейки, топливные элементы, альтернативная энергетика.

В настоящее время современная энергетика основана на традиционных методах генерации электро- и теплоэнергии, которая использует не возобновляемые ресурсы. Однако, подобные методы влекут колоссальные последствия для экологии и окружающего нас мира в целом. Ограниченное количество энергоресурсов приводит к популяризации альтернативной энергетике, и оказанию поддержки тем, кто рассматривает основные вопросы данного направления. Альтернативная энергетика, как отдельное направление, в России развито слабо, причиной этого являются плохие климатические условия, которые отражаются на надежности генерирующих систем, объеме и качестве электроэнергии. Поэтому серьезную конкуренцию составляют маломощные установки, которые малогабаритны и быстро окупаются [1].

Цель данного научного исследования заключается в разработке источника питания для собственных нужд подстанции 35/10(6) кВ.

Для достижения поставленной цели рассмотрены вопросы экономической конкуренции автономных источников электроснабжения и разработать структуру источника питания для нужд подстанции:

1) определение потенциальных покупателей и конкурентных преимуществ заявленного источника питания;



2) структурирование нагрузки, подключаемой к комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов;

3) разработка структурной схемы комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов.

Комбинированная электростанция состоит из солнечных панелей и топливных элементов, и могла бы иметь интерес для таких коммерческих структур, как сетевые распределительные компании, например, ПАО «Россети», ООО «Газпром энерго», ООО «Энерго-нефть» и др.

Проект комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов является инновационным. Аналогов ему не представлено на Российском рынке. Его конкурентными преимуществами являются доступность применения солнечных панелей и топливных элементов, а также режим их работы на единую нагрузку. Финансирование проекта предполагается в виде грантов на научные исследования от государства и привлечения средств от коммерческих структур, заинтересованных в данном источнике питания. При условии, что производство электроэнергии от такого источника питания будет ниже, чем при покупке электроэнергии от представленных на рынке сбытовых компаний [1].

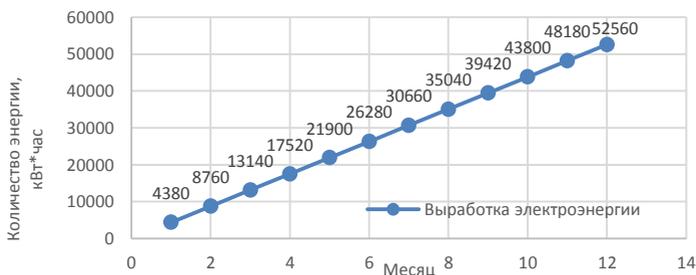


Рис. 1. Объем электроэнергии от комбинированной электростанции

Проект будет реализовываться в умеренном климатическом поясе Саратовского края. Электроснабжение собственных нужд подстанции 35/10 кВ будет осуществляться за счет комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов. Характеристики подстанции 35/10 кВ: структурная схема - 4Н; трансформаторы-2хТМ-3200; выключатели - 4хВТ-35; КРУН - 6 ячеек.



Таблица 1

Нагрузки потребителей собственных нужд подстанции 35/10 кВ

Вид нагрузки	Объем, тыс. кВт·ч/год
Обогрев ОПУ	$12,6 \cdot 1,25 = 15,75$
Вентиляция и освещение ОПУ	1,7
Наружное освещение	0,4
Зарядно-подзарядные устройства	3,3
Вентиляция аккумуляторной	1,5
Обогрев КРУН	$1,2 \cdot 6 = 7,2$
Обогрев выключателей 35 кВ	$0,5 \cdot 4 = 2,0$
Аппаратура связи и телемеханики	1,9
Прочие	2,2
Итого	53,95

Все данные приняты по инструкции по нормированию расхода электроэнергии на собственные нужды подстанции 35-500 кВ [2].

Каждая отдельная система содержит один топливный элемент с величиной выходного напряжения 48 В и полезной мощностью 6 кВт, а также фотоэлектрическую систему с выходным напряжением 24 В и полезной мощностью 6 кВт.

Расчетным путем было определено необходимое число солнечных панелей, при условии, что паспортная мощность одной панели составляет 200 Вт.

Предполагаем, что проект будет реализован на территории города Саратова, тогда зная солнечную активность на данном участке, определим примерное количество электроэнергии, полученное от фотоэлектрической системы. Согласно источнику [3], количество часов светового максимума на территории города Саратова в среднем составляет порядка 5 часов в сутки, а максимальная выработка электроэнергии фотоэлектрической системой приходится на временной интервал с 11:00 до 16:00, с учетом благоприятных метеоклиматических условий. В это время будет происходить питание нагрузки и накопление энергии в аккумуляторах. После 16:00, ожидается уменьшение выходной мощности фотоэлектрической системы, поскольку световой поток уменьшается. В период с 16:00 до 11:00 включается в работу топливный элемент (ТЭ), при недостатке энергии питание будет осуществляться от аккумуляторов. Процесс заряда аккумуляторных батарей от ТЭ менее продолжителен, чем от ФЭС, поскольку выходное напряжение ТЭ составляет 48 В. В период времени с 16:00 до 11:00



нагрузка переводится на ТЭ, который обеспечивает ее электроэнергией.

В комбинированной электростанции на основе ТЭ и ФЭС время автономной работы аккумуляторных батарей закладывается порядка 1 часа. Комбинированная электростанция предусматривает резервирование ФЭС топливным элементом.

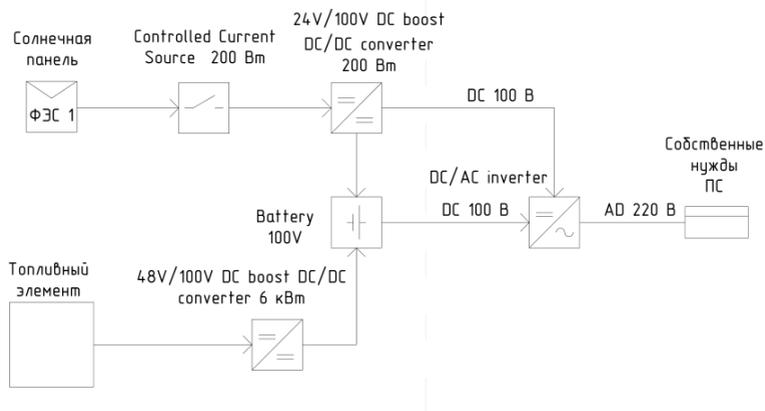


Рис. 2. Функциональная схема комбинированной электростанции

Выводы по работе. В результате исследования был проведен анализ рынка внедрения по внедрению комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов, выявлены конкурентные преимущества, разработана структура и предложен принцип работы комбинированной электростанции.

Библиографический список

1. Коваленко В.В., Васильковский А.Р. Экономически выгодные режимы работы комбинированной электростанции на основе солнечных панелей и топливных элементов // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019). Тольятти: ТГУ, 2019. С. 171-174. [eLIBRARY ID: [41483119](#)]
2. Инструкции по нормированию расхода электроэнергии на собственные нужды подстанции 35-500 кВ. РД 34.09.208.
3. Глиберман А.Я., Зайцева А.К. Кремневые солнечные батареи: учеб. М.: Энергоатомиздат, 1961. 72 с.





A HYBRID POWER PLANT FOR COST-EFFECTIVE ELECTRIC POWER SUPPLY TO SUBSTATIONS FOR THEIR OWN NEEDS

A.R. Vasilkovskii and V.V. Kovalenko

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

Abstract. This article has examined the project for implementation of a hybrid power plant based on solar panels and fuel cells, showed its advantages and functional diagram. The article also has analyzed sales markets for a hybrid power plant based on solar panels and fuel cells, identified competitive advantages, developed structure, and suggested operating principles of the hybrid power plant.

Keywords: fuel cells, alternative energy.



УДК 620.9

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРООРГАНИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ВНУТРЕННЕЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ В ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

Магистрант **Ворогушина Н.И.**

Научный руководитель д-р техн. наук, проф. **Щинников П.А.**

*Новосибирский государственный
технический университет, г. Новосибирск*

Аннотация. В статье рассматривается комбинация пароводяного и органического циклов Ренкина, положительные эффекты такой технологии, влияющие на экологию и срок службы оборудования. Рассмотрена целесообразность и эффективность применения регенератора при разных типах кривой насыщения для группы органических жидкостей.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, органические жидкости, внутренняя регенерация, кривая насыщения.

На сегодняшний момент органические циклы Ренкина (далее – ОЦР) преимущественно применяются в сфере геотермальной энергетики, такие ОЦР-установки в основном реализованы на территории США, при утилизации биомассы и разных тепловых отходов, при использовании солнечной энергии [1]. Есть примеры комбинации двигателя внутреннего сгорания с ОЦР для утилизации энергии выхлопных газов [2]. Примеры серийного освоения данной технологии в производстве энергии на территории РФ отсутствуют.

В данном исследовании работа энергоблоков на сочетании традиционного пароводяного цикла с органическим циклом Ренкина позволяет отказаться от конденсатора водяного охлаждения – нет необходимости строить станции рядом с водоемами, их тепловое загрязнение исключается. Положительный экологический эффект делает мировую энергетику на шаг ближе к технологиям с нулевым выбросом, куда направлено её современное развитие. Тепло водяного пара, расширившегося в контуре классической ТЭС, передаётся в ОЦР-контур. Параметры приняты так, что отработавший пар находится в насыщенном состоянии, таким образом, паровая турбина не подвергается эрозионному износу. Органические жидкости имеют высокую плотность, что приводит к сокращению габаритов турбоагрегата, уменьшению металлоёмкости.



Цель работы: разработка экологичной высокоэффективной паровой органической технологии с подбором R-агентов для неё.

Органический цикл Ренкина

ОЦР – цикл Ренкина, в котором вместо воды используются органические теплоносители (пентаны, хладоны, фторуглероды, силиконовые масла) с низкой температурой кипения. Впервые идея применения фреона в качестве рабочего тела паросиловой установки для выработки электроэнергии была реализована в 1967 году в СССР на Паратунской опытно-промышленной геотермальной электростанции [2].

ОЦР-установки в России

Сейчас на Паужетской ГеоЭС есть ОЦР-энергокомплекс на базе хладона R-134а. ПАО «Газпром» приняло программу по внедрению утилизации тепла отходящих газов компрессорных станций. Тепло уходящих газов газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов утилизируется с помощью «пентановой» технологии или технологии пентановых турбин на основе ОЦР [3]. Также российское предприятие ОАО ТКЗ «Красный котельщик» предлагает экспериментальный образец энергокомплекса ОЦР, где используется пентан и как промежуточное тело применяется – термальное масло, которое позволяет избежать локального перегрева.

Принципиальная технологическая схема

В данной работе исследуется комбинация циклов без промежуточного теплоносителя, а выбор рабочих тел для ОЦР проводился среди хладагентов – R-агентов. Принципиальная схема представлена на рис. 1. Пароводяной контур не имеет привычного конденсатора водяного охлаждения: насыщенный водяной пар после расширения в турбине направляется в теплообменник ТО, где генерируется пар органической жидкости. Далее R-пар, отработав в ОЦР-турбине, охлаждается в воздушном конденсаторе ВК. Для этой простой схемы посчитаны показатели термического к.п.д. (η_t) для 31 R-агента; η_i и расходы R-тел представлены на рис. 2. Для вычислений приняты условия: расход водяного пара: $G=1$ кг/с, $t_{окр}=+30^\circ\text{C}$ – взята как верхняя точка диапазона температур воздуха для сопоставления с традиционными блоками с охлаждающей водой. Для некоторых регионов актуально провести расчет с $t_{окр}$ от -40 до $+40^\circ\text{C}$. Температура жидкого R-агента на входе в теплообменный аппарат равна $t_{окр}$, температура свежего R-пара с учетом потерь в ТО: $t_R = 172^\circ\text{C}$.

Давления для R-тел на входе в турбину варьируется от 30 до 70 бар, имеются как до- так и сверхкритические циклы.



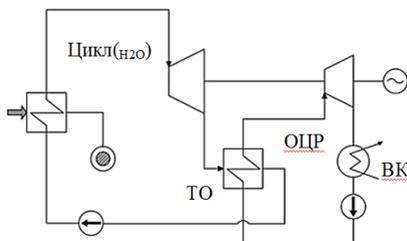


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема сочетания пароводяного и органического циклов Ренкина

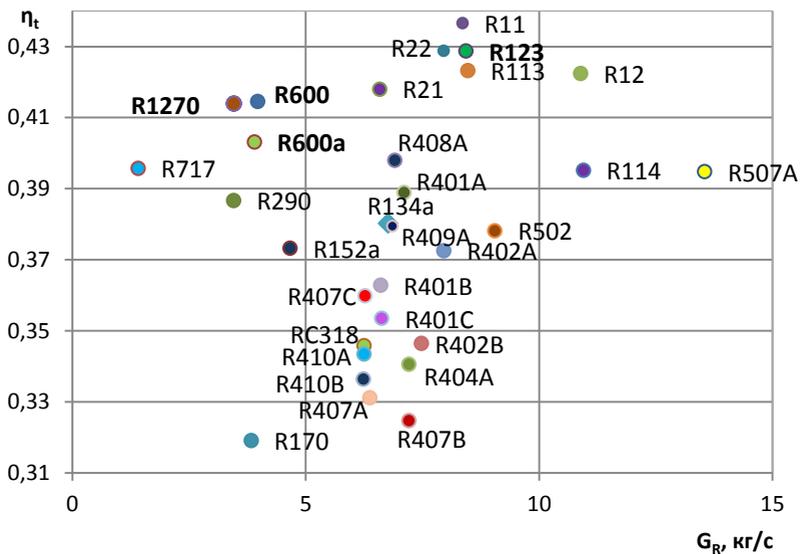


Рис. 2. Диаграмма зависимости термического к.п.д. от расхода R-агента

Приняты начальные и конечные параметры пароводяного блока, последние принимались при условии работы турбины только в зоне сухого пара: температура водяного пара, поступающего в ТО, равна 176°C.

Обратим внимание на результаты для тел R-600, R-600a, R-1270 на рис. 2. На данных хладагентах технология демонстрирует высокие показатели η_t при небольших расходах R-тел. Диаграмма наглядно показывает, что 1 кг водяного пара генерируется почти 14 кг пара органической жидкости при использовании R507A.

R-регенератор

При усложнении установки можно добиться повышения эффективности энергокомплекса. Для первой модернизации схемы добавляем регенератор в контур ОЦР (рис. 3). Расчет термического к.п.д. такого технического решения выполнено при тех же параметрах что и расчет схемы на рис. 1.

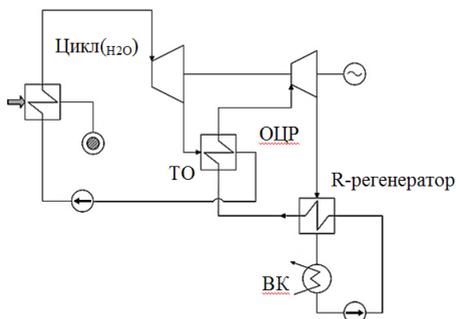


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема сочетания пароводяного и органического циклов с внутренней регенерацией

На рис. 4 представлен результат вычислений для технологии с внутренней регенерацией в ОЦР-контуре. Замечаем, что лидирующими по термической эффективности являются схемы с R-агентами, с которыми эффективность предыдущей схемы была не очень высока.

Кривая насыщения

Эффективность цикла с внутренней регенерацией зависит от конечного состояния, отработавшего в ОЦР, пара, насколько его температура выше температуры воздуха. В общем случае важен угол наклона линии насыщения. В статье [4] по такому принципу органические жидкости разделяются на «сухие», «изоэнтروпные» и «влажные» (рис. 5). Например, линия насыщения для воды имеет отрицательный наклон: полого убывает с ростом энтропии (линия «влажного» типа как на рис. 5). Для многих органических веществ эта кривая практически вертикальна. Поэтому в конце расширения R-пар остается в основном в перегретом состоянии – и тогда целесообразно применение R-регенератора.



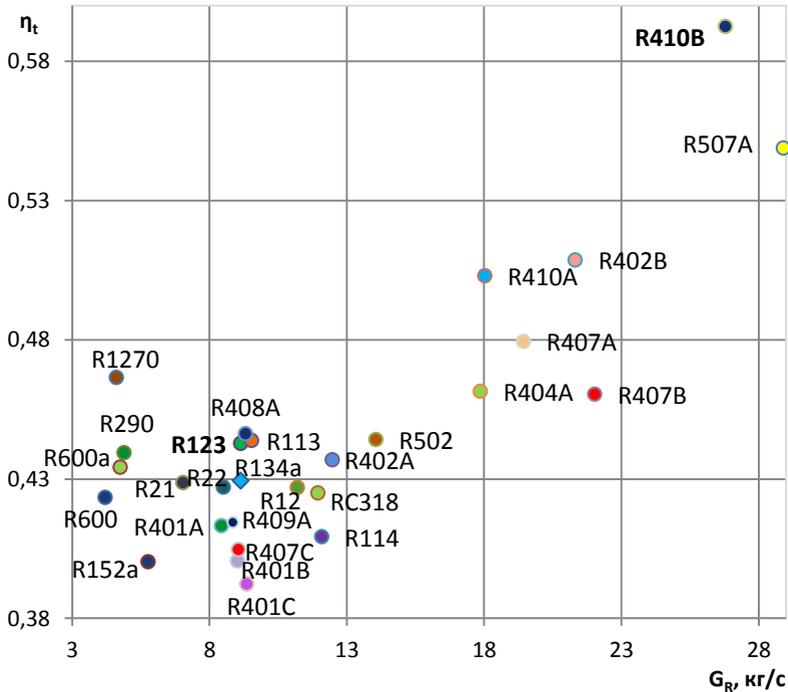


Рис. 4. Диаграмма зависимости η_t от расхода R-агента при внутренней регенерации в ОЦР-контуре

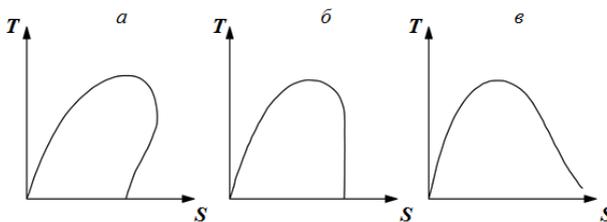


Рис. 5. Форма кривой насыщения органической жидкости для:
a – «сухой»; *б* – «изоэнтронной»; *в* – «влажной»

В работе [5] авторы выделяют колоколообразную и нависающую кривую насыщения, что также соответствует «влажному» и «сухому»/«изоэнтронному» типам на рис. 5, и определяют таким жид-

костям эффективность применения сверхкритических и докритических циклов, с возможностью использования внутреннего теплообменника в ОЦР-контуре и без, с перегревом пара и с его отсутствием.

Например, применение внутренней регенерации в случае с R11 не дает никакого эффекта, потому что при рассмотренных начальных условиях, в конце расширения R-пара получаем его насыщенное состояние. В то время как по схеме без регенерации имеем самый высокий η_t с R11 из всех рассмотренных веществ (рис. 2).

Посмотрим на циклы в ОЦР-контуре на диаграмме h - $\lg p$ для R123 и R410B представленные на рис. 6.

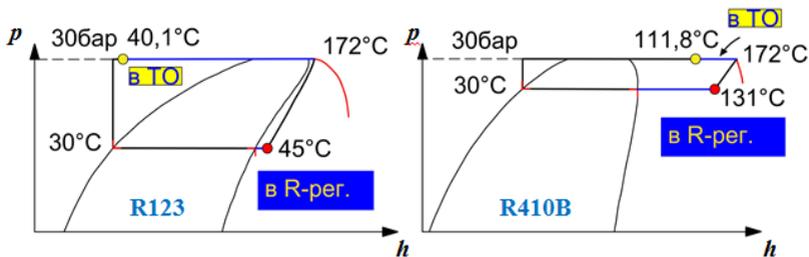


Рис. 6. ОЦР в ph -координатах для R123 и R410B

Эффективность схемы без регенератора на R123 была одной из самых высоких, а на R410B, наоборот, одной из самых низких (рис. 2). Ситуация поменялась с внедрением в схему регенератора (рис. 4). Теперь теплота отработавшего R410B пара не теряется в ВК, а поднимает температуру R410B до входа в ТО почти на 82°C , тогда как состояние расширившегося пара R123 близко к кривой насыщения, и жидкий R123 нагревается в регенераторе только до $40,1^\circ\text{C}$.

Выводы по работе. Рассчитана термическая эффективность для двух схем сочетания пароводяного и органического циклов Ренкина. Показатели эффективности сопоставимы со значениями для современных КЭС. Эффективность применения внутренней регенерации в ОЦР зависит от формы кривой насыщения, конечного состояния R-пара, благодаря её форме процесс в ОЦР не сопровождается конденсацией в дополнение к процессу в «сухой» зоне для водопаровой турбины - эрозия металлических частей и лопаток предотвращается. Технология может быть реализована в широком диапазоне температур окружающей среды, не требуя расположения близ водоемов, исключая их термальное загрязнение.

Библиографический список

1. **Tartière T.** Analysis of the Organic Rankine Cycle market [Электронный ресурс] / RC World Map [2017]. URL: <https://orc-world-map.org/analysis/> (дата обращения: 02.10.2020).

2. **Белов Г.В., Дорохова М.А.** Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 2. С. 99-124. DOI: [10.7463/0214.0699165](https://doi.org/10.7463/0214.0699165). [eLIBRARY ID: [21693099](https://elibrary.ru/21693099)]

3. Повышение энергетической эффективности магистрального транспорта газа ПАО «ГАЗПРОМ» на основе реализации высокоэффективных технологий утилизации тепловой энергии выхлопных газов ГТУ ГПА [Электронный ресурс] / О.Е. Аксютин, А.Г. Ишков, Г.А. Хворов и др. // Газовая промышленность. 2017. Спецвып. 1. С. 64-69. URL: <https://neftegas.info/upload/iblock/7e5/7e57e2cb056c37e15259e316957c4916.pdf> (дата обращения 20.10.2020).

4. **Chen H., Goswami D., Stefanakos E.** A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14(9). P. 3059-3067. DOI: [10.1016/j.rser.2010.07.006](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006).

5. Working fluids for low-temperature Organic Rankine Cycles / B. Saleh, G. Koglbauer, M. Wendland, J. Fischer. // Energy. 2007. Vol. 32(7). P. 1210-1221. DOI: [10.1016/j.energy.2006.07.001](https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.001).



ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF STEAM-ORGANIC TECHNOLOGY WITH INTERNAL REGENERATION IN THE ORGANIC RANKINE CYCLE

N.I. Vorogushina and P.A. Shchinnikov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Annotation. The article discusses the combination of steam-water and organic Rankine cycles, the positive effects of this technology, affecting the ecology and equipment service life. The expediency and efficiency of using the regenerator for different types of saturation curves for a group of organic liquids are considered.

Key words: organic Rankine cycle, organic liquids, internal regeneration, saturation curve.



УДК 621.311.22

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХТОПЛИВНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ РАБОТЫ

Аспирант **Воронкова А.С.**

Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Боруш О.В.**
*Новосибирский государственный технический
университет, г. Новосибирск*

Аннотация. В статье рассматривается эффективность двухтопливных парогазовых установок, работающих при различных начальных параметрах пара. Представлены результаты анализа технико-экономических показателей установки, а также оценка капитальных затрат и возможности применения исследуемой технологии в рамках рассматриваемого региона. Результаты расчетов показали, что применение двухтопливной ПГУ с параллельно схемой работы позволяет увеличить КПД по выработке электрической энергии в среднем на 22% по сравнению с работой в режиме угольной ПТУ. Помимо этого, переход в режим ПГУ позволяет сократить удельный расход условного топлива на 21%. При переходе на сверхкритические параметры пара показателей эффективности энергоблока выросли в среднем на 2%.

Ключевые слова: двухтопливная ПГУ, ПГУ параллельного типа, докритические параметры пара, сверхкритические параметры пара, угольная энергетика.

На сегодняшний день в России значительная часть электрической энергии (~ 65%) вырабатывается на тепловых электрических станциях, работающих на органическом топливе (газ, уголь). Основной проблемой таких станций является низкий КПД по выработке электрической энергии, который составляет ~ 28-34%. Причиной такой низкой эффективности выработки электроэнергии является физический износ оборудования (т.к. расчетный срок службы оборудования неоднократно продлевался), моральное старение оборудования (основная часть станций работает на докритических параметрах пара), а также низкий процент ввода в эксплуатацию блоков с применением перспективных технологий (таких как ПГУ) [1].

Тенденция последних лет показывает, что во многих регионах страны вводятся энергоблоки с парогазовыми установками, использу-



ющие в качестве основного топлива природный газ. Однако для регионов, в которых в территориально-топливном балансе преобладает уголь (например, СФО, УФО, ДВФО), применение ПГУ даже не рассматривается. Одним из вариантов внедрения угля в парогазовые технологии может служить применение двухтопливных ПГУ.

Таким образом, актуальным является исследование двухтопливных парогазовых установок с параллельной схемой работы с разработкой схемы и методики расчета рассматриваемой технологии, анализ работы установки при различных начальных параметрах пара паротурбинной части установки, оценка капитальных затрат.

Принцип работы рассматриваемой технологии заключается в следующем. В камеру сгорания ГТУ подается газ, за счет сжигания которого вырабатывается электрическая энергия в части газотурбинной установки. Газы, отработавшие в ГТУ направляются в котел-утилизатор, где происходит выработка части пара, который в последующем совмещается с основным паровым потоком паротурбинной установки, и два теплообменника (высокого и низкого давления) для подогрева питательной воды. Паротурбинная установка состоит из паровой турбины с электрическим генератором, системы регенерации и парового котла, топливом для которого является уголь. Таким образом, в установке сжигается два вида топлива. Параллельность работы заключается в разделении потока питательной воды, который нагревается и генерируется в пар в части ПГУ и ГТУ и затем совмещается в части паротурбинной установки [2]. Расчетная тепловая схема установки представлена на рис. 1.

Методика расчета двухтопливной ПГУ включает в себя следующие этапы [3]:

1. Расчет газотурбинной установки

Определение параметров в основных точках цикла Брайтона, расчет удельной работы, определение КПД и расхода условного топлива ГТУ:

$$l = (T_0 - T_k) - (T_1 - T_*) \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ГТУ}} = \frac{l}{(T_0 - T_1)\eta_{\text{эм}}} \quad (2)$$

$$b_{\text{ГТУ}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{ГТУ}}} \quad (3)$$

4. Компоновка и расчет тепловой схемы в автономном режиме и в режиме ПГУ

Определение КПД всей установки

$$\eta_{\text{ПГУ}}^{\text{нетто}} = \frac{N_{\text{ГТУ}} \eta_{\text{сн}}^{\text{ГТУ}} + N_{\text{ПТУ}} \eta_{\text{сн}}^{\text{ПТУ}}}{\left(N_{\text{ГТУ}} \frac{0,123}{3,6\eta_{\text{ГТУ}}} + N_{\text{ПТУ}} \frac{0,123}{3,6\eta_{\text{ПТУ}}^{\text{бр}}} \right) 29,3 - Q_{\text{КУ}}} \quad (9)$$

На основании предложенной методики выполнены расчеты с целью анализа технико-экономической эффективности двухтопливных ПГУ с параллельной схемой работы. Были рассмотрены два варианта применения рассматриваемой технологии: на докритические начальные параметры пара ($p_0 = 13$ МПа, $t_0 = 540^\circ\text{C}$) и на сверхкритические ($p_0 = 24$ МПа, $t_0 = 545^\circ\text{C}$).

По результатам расчетов приведенным в табл. 1 видно, что увеличение начальных параметров пара позволяет повысить эффективность выработки электрической энергии в среднем на 2%. При переходе из автономного режима работы в режим ПГУ КПД возрастает на 22%.

Таблица 1

Технико-экономические показатели работы установки

Наименование величины	Ед. изм.	13 МПа, 540°C	24 МПа, 545°C
Тепловой поток, подведенный к ГТУ	МВт	211,34	211,34
Расход острого пара на турбину	кг/с	163,92	163,92
Подведенная теплота при работе ПТУ в составе ПГУ	МВт	362,18	351,99
КПД-нетто ПТУ в автономном режиме	%	39,68	40,59
КПД-нетто парогазовой установки	%	48,65	49,53

Кроме этого, необходимо отметить сокращение удельного расхода условного топлива (рис. 2). При увеличении начальных параметров пара удельный расход топлива сокращается в среднем на 3%, а работа ПТУ в составе ПГУ позволяет добиться сокращения удельного расхода топлива на 21%.

Помимо технико-экономических показателей еще одним немаловажным фактором оценки эффективности применения той или иной технологии являются капитальные затраты и срок окупаемости.



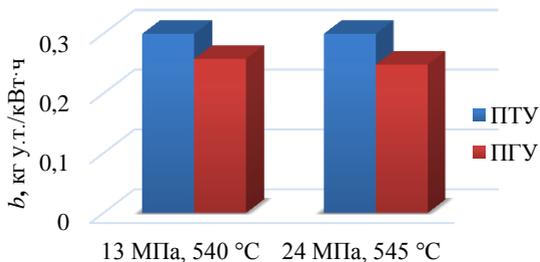


Рис. 2. Изменение удельных расходов условного топлива

В рамках данного исследования оценка стоимости рассматриваемого энергоблока производилась на основании рекомендаций по оценке удельных капитальных затрат и их распределению по оборудованию [4]. В табл. 2 представлены результаты расчета капитальных вложений и издержек при строительстве энергоблока «с нуля».

Таблица 2

Результат расчета капитальных вложений и издержек

Показатель	13 МПа, 540°С	24 МПа, 545°С
Капитальные вложения, млн. руб.		
Паровой котел	7 124,05	8 824 ,68
Турбоагрегат	2 966,04	2 892,96
Газовая турбина	2 955,57	2 955,57
Котел-утилизатор	202,00	202,00
Эл. часть	2 046,24	1 980,72
АСУ ТП	1 713,60	1 668,24
Пароводяной тракт	3 356,64	3 984,12
Монтаж и наладка	1 837,08	1 779,12
Строит. работы	4 427,64	4 205,88
Стоимость проекта	1 333,08	1 401,12
Суммарные кап. вложения	27 961,94	29 894,41
Издержки, млн. руб.		
Издержки на топливо	1 188,75	1 174,65
Постоянные затраты	3 705,02	3 960,10
Суммарные затраты	4 893,77	5 134,76
Себестоимость электроэнергии, руб.	2,67	2,80

Оценку эффективности ввода нового энергоблока предлагается выполнить с помощью чистого дисконтированного дохода:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^{T_{\text{расч}}} \frac{\text{Выр}_t - \text{И}_t}{(1+E)^t} - \sum_{t=0}^{T_{\text{расч}}} \frac{K_t}{(1+E)^t} \quad (10)$$

На рис. 3 представлена графическая интерпретация результатов расчета чистого дисконтированного дохода для установки на докритические параметры.

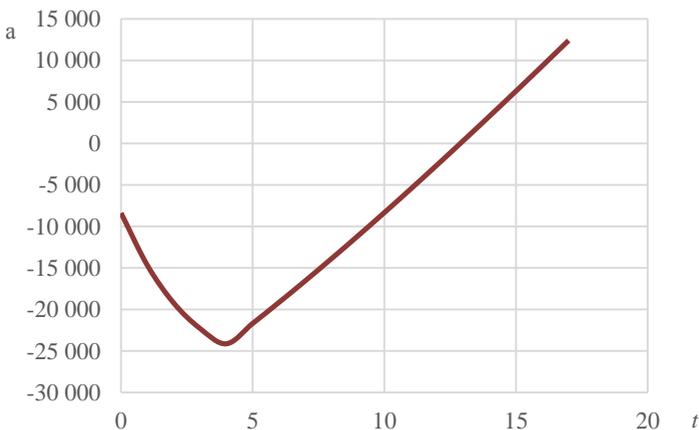


Рис. 3. ЧДД для ПГУ на докритические параметры пара

Таким образом, результаты расчетов показали, что применение двухтопливной ПГУ с параллельно схемой работы позволяет увеличить КПД по выработке электрической энергии в среднем на 22% по сравнению с работой в режиме угольной ПТУ. Помимо этого, переход в режим ПГУ позволяет сократить удельный расход условного топлива на 21%. Также необходимо отметить улучшение показателей эффективности энергоблока при переходе на сверхкритические параметры пара в среднем на 2%. Капитальные затраты при строительстве рассматриваемого энергоблока «с нуля» составляют 29 млрд. руб. при дисконтированном сроке окупаемости – 13 лет с начала строительства.



Библиографический список

1. Стратегическая программа исследований технологической платформы «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности» [Электронный ресурс]. URL: <http://innovation.gov.ru/node/5412> (дата обращения: 20.10.2020).

2. Двухтопливные ПГУ с параллельной схемой на суперсверхкритические параметры. / А.С. Воронкова, О.В. Боруш, П.А. Щинников, А.А. Зуева // Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 5. С. 6-11. [eLIBRARY ID: 37845613]

3. Расчет двухтопливной ПГУ с параллельной схемой работы : учебное пособие / П.А. Щинников, О.В. Боруш, А.А. Францева, А.А. Зуева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. 112 с. [eLIBRARY ID: 39549371]

4. **Ашинянц С.А.** Оценка стоимости строительства и эксплуатации угольных ТЭС: обзор / Под ред. Г.Г. Ольховского. 2-е изд., перераб. и доп. М: ОАО «ВТИ», 2013. 44 с.

5. **Безлепкин В.П.** Парогазовые и паротурбинные установки электростанций. СПб: Изд-во СПбГТУ, 1997. 293 с.



DATA ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DUAL-FUEL COMBINED-CYCLE PLANTS WITH THE PARALLEL SCHEME OF OPERATION

A.S. Voronkova and O.V. Borush

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Abstract. The paper examines the effectiveness of dual-fuel combined-cycle plants that operate with different initial steam parameters. It presents analysis results of the plant's technical and economic parameters, capital expenses evaluation, and the possibility of the examined technology be implemented in the discussed region. The calculation results have shown that the use of a dual-fuel combined-cycle plant with the parallel scheme of operation allows to increase electrical power generation efficiency by an average of 22% in comparison to a coal power plant mode of operation. Besides, the transition to the combined-cycle plant mode allows to cut back on specific equivalent fuel consumption by 21%. Transition to the supercritical steam parameters increases the efficiency parameters of the power generating unit by an average of 2%.

Keywords: dual-fuel combined-cycle plant, parallel type of combined-cycle plant, subcritical parameters of steam, supercritical parameters of steam, coal-fired power generation.



УДК 621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Студент **Дыбова О.А.**Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Андрянов Д.П.***Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир*

***Аннотация.** В статье рассматривается влияние температуры на переходный процесс в электрических цепях. Показано влияние изменения температуры активного сопротивления на характер переходного процесса в электрической цепи. Численное моделирование системы дифференциальных уравнений, описывающих электрическую цепь с учетом увеличения температуры сопротивлений показало появление фазового расхождения колебаний тока-напряжения между сравниваемыми вариантами.*

***Ключевые слова:** Переходный процесс, температурный режим, MathCad.*

Повышение эффективности работы систем электроснабжения требует детального рассмотрения особенностей функционирования элементов электрических цепей. Неблагоприятный температурный режим может привести к повышенным потерям передаваемых мощностей в линиях электропередач [1]. Интерес представляет рассмотрение характера переходного процесса в электрических цепях при изменении температуры активных сопротивлений нагрузки.

Цель работы: повышение эффективности электроснабжения за счет учета температурных режимов электрических цепей.

Постановка задачи

В качестве допущения принимаем, что нагрев активного проводника происходит от постороннего источника, не входящего в состав электрической цепи. Температура нагрева не зависит от режима работы нагрузки.

Влияние нагрева проводника на характер переходного процесса рассмотрим на примере включения типовой электрической цепи, состоящей из источника э.д.с., входной цепи из индуктивности и активного сопротивления, нагрузки из индуктивности, активного сопротивления и емкости (рис. 1). Источник э.д.с. на входе в электрическую



цепь генерирует синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц. Нагрузку представляем, как параллельные ветви с емкостью C_2 и с активным сопротивлением R_2 и индуктивностью L_2 .

Общеизвестно, что удельное сопротивление проводника ρ связано с его температурой через температурный коэффициент α и удельное сопротивление при начальной температуре ρ_0 [2]:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T),$$

где ΔT – изменение температуры относительно начальной, для которой определено значение ρ_0 .

В [3] показано, что нагрев проводника приводит к потерям передаваемой через него электрической мощности.

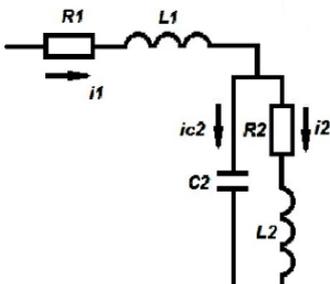


Рис. 1. Схема замещения моделируемой электрической цепи

Методы исследований

Система дифференциальных уравнений в сосредоточенных параметрах, описывающая электрическую цепь, состоит из уравнений баланса [4]:

- падений напряжения в контуре из входной ветви R_1-L_1 и емкости нагрузки C_2 ;
- падений напряжения в ветвях нагрузки R_2-L_2 и C_2 ;
- суммы токов в узле соединения нагрузки и входной ветви.

При моделировании использовался расчетный метод Рунге-Кутты четвертого порядка с переменным шагом, реализованный в математическом пакете MathCad [5]. За начальные условия интегрирования брались нулевые значения переменных. Переходный процесс представлялся как следствие подключения цепи к источнику э.д.с. переменного тока с начальными условиями.

$$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{-R1}{L1} & 0 & \frac{-1}{L1} \\ 0 & \frac{-R2}{L2} & \frac{1}{L2} \\ \frac{1}{C2} & \frac{-1}{C2} & 0 \end{pmatrix} \cdot x + \begin{pmatrix} \frac{U}{L1} \sin(100 \cdot \pi \cdot t + \varphi) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$Z := \text{Rkadapt}(x, 0, 0.16, 800, D)$

Рис. 2. Фрагмент листинга решения задачи расчета

Представление системы уравнений в общепотребительной форме Коши подразумевает выделение в левой части уравнений первой производной от искомого неизвестного. Для рассматриваемой системы уравнений неизвестными являются силы токов i_1 во входной ветви R_1-L_1 и i_2 в ветви нагрузки R_2-L_2 , а также напряжение в ветви емкости нагрузки U_C .

Сравнивались варианты расчетов переходных процессов при включении электрической цепи с разными значениями температуры активного сопротивления нагрузки.

Результаты расчетов

Изменение силы тока по времени для температуры 20°C представлено на рис. 3, для 60°C – на рис. 4. Материал проводника – медь.

На графиках представлено графическое отображение табличной формы результатов расчета, при этом 800 точек оси абсцисс соответствует времени переходного процесса 0,16 с.

При кажущемся совпадении кривых изменения силы тока во времени на рис. 3 и рис. 4 разница между указанными графиками, полученная вычитанием табличных значений, указывает на появление фазового расхождения в колебательном процессе (рис. 5). Принимая во внимание, что схема замещения (рис. 1) соответствует колебательной системе с возможными резонансами, обусловленными сочетанием параметров активного-индуктивного сопротивлений и емкости, при проектировании электрических сетей следует учитывать вероятность изменения характера переходного процесса в зависимости от температурного режима. Следует заметить, что зависимость величин индуктивности и емкости от температуры имеет сложный нелинейный характер и в значительной мере определяется используемыми материалами и конструктивными особенностями.

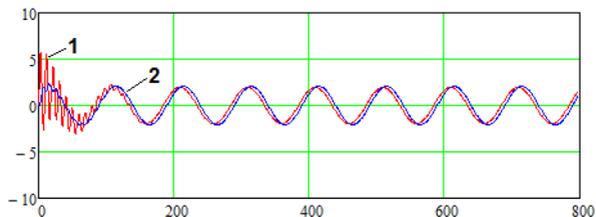


Рис. 3. Переходный процесс при температуре 20 °С

1 – ток во входной цепи, 2 – ток в нагрузке.

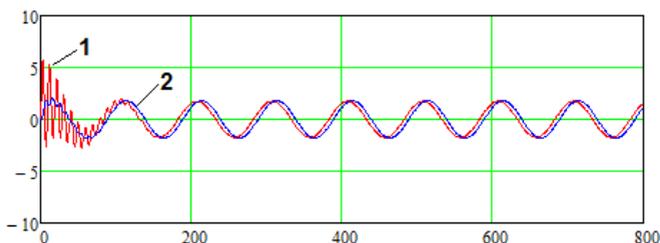


Рис. 4. Переходный процесс при температуре 60 °С:

1 – ток во входной цепи, 2 – ток в нагрузке.

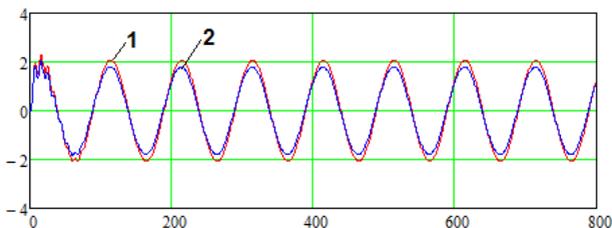


Рис. 5. Расхождение сравниваемых вариантов:

1 – ток во входной цепи, 2 – ток в нагрузке

При векторном представлении комплексных сопротивлений ветвей электрических цепей [2] увеличение длины вектора активного сопротивления (вещественная ось) при неизменной величине индуктивно-емкостного сопротивления (мнимая ось) приводит к деформации треугольника сопротивлений – изменению фазового угла между вектором результирующего сопротивления и вектором активного сопротивления, что хорошо согласуется с результатами численного моделирования.



Выводы

При проектировании систем электроснабжения следует уделять внимание рассмотрению переходных процессов с учетом температурных режимов, что может оказать существенное влияние на выбор параметров электрических цепей в случае необходимости обеспечения энергоэффективности функционирования электроснабжения.

Библиографический список

1. Применение стандарта CIGRE для экспертной оценки программы расчета потерь электрической энергии с учетом температуры проводников / Е.В. Петрова, С.С. Гиршин, Н.В. Кириченко // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 198-202. [eLIBRARY ID: [20800001](#)]
2. **Иванов И.И., Соловьев Г.Н., Фролов В.Я.** Электротехника и основы электроники. СПб: Лань, 2012. 736 с. [eLIBRARY ID: [25483798](#)]
3. **Ионова В.И.** Оценка влияния нагрева проводника на потери мощности в электрической цепи. // Электроэнергетика. Энергия 2019: мат. конф. в 7 т. Том 3. Иваново: ИГЭУ, 2019. С. 5. [eLIBRARY ID: [40872581](#)]
4. **Аронов Л. В.** Расчет переходного процесса при включении электропривода в однофазной электрической цепи переменного тока // Молодой учёный. 2015. № 22 (102). С. 124-126. [eLIBRARY ID: [25093676](#)]
5. **Дьяконов В.П.** MathCad 2001. СПб.: Питер, 2001. 624 с.



TRANSIENT PROCESS MODELING WITH THE CONSIDERATION OF AN ELECTRICAL CIRCUIT TEMPERATURE CHANGE

O.A. Dybova and D.P. Andrianov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir

Abstract. The article examines the influence of temperature on the transient process in the electrical circuits. It has been shown that the temperature change of active resistance can influence the character of the transient process in the electrical circuit. The numerical modeling of the differential equations system, which describes an electrical circuit considering resistance temperature increase, has shown the appearance of the phase difference of current-voltage oscillations between the compared variants.

Keywords: Transient process, temperature regime, MathCad.



УДК 621.31

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: УЧЕБНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Магистрант **Елисеев А.А.**Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Шмелёв В.Е.***Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир*

Аннотация. *Представлена методика учебно-лабораторного исследования широкополосных однофазных разделительных трансформаторов, предназначенных для гальванической развязки цепей и защиты приёмников сигналов от синфазных помех в виде напряжений и применяемых в технике электромагнитной совместимости различных информационно-измерительных электроустановок на объектах электроэнергетики. Методика введена в лабораторный практикум подготовки бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплине «Электромагнитная совместимость».*

Ключевые слова: *электромагнитная совместимость, гальваническая развязка, разделительный трансформатор, паразитная связь, ёмкостная связь.*

В настоящее время в технике релейной защиты объектов электроэнергетики завершается переход от электромеханических к электронным реле [1]. Для вывода из строя или ложного срабатывания первых достаточно 1 мДж энергии, поступающей на вход реле от электромагнитной помехи. Для вывода из строя или ложного срабатывания вторых бывает достаточно 10^{-3} мДж паразитной энергии, а в случае КМОП электроники – даже 10^{-4} мДж [2]. Это обстоятельство привело к обострению проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) на объектах электроэнергетики, в связи с чем в 1995 году в электроэнергетические образовательные стандарты были включены вопросы ЭМС.

Для защиты электрооборудования от синфазных помех (в виде напряжений) применяется гальваническая развязка, позволяющая с минимальными искажениями передавать сигналы между блоками с разными системами опорного потенциала [3]. Один из широко распространённых способов гальванической развязки – применение раздели-



тельных трансформаторов [4]. Качество такой развязки довольно сильно зависит от паразитных ёмкостных параметров и коэффициента электромагнитной связи обмоток, немного в меньшей степени – от качества изоляции [5].

Цель работы – ввести в лабораторный практикум по дисциплине ЭМС методику учебного экспериментального исследования гальванической развязки в широкополосных разделительных трансформаторах с учётом паразитных ёмкостей и несовершенства индуктивной связи при различных способах намотки обмоток на магнитопровод.

Лабораторный макет представляет собой три малогабаритных однофазных трансформатора с обмотками, намотанными на одинаковые тороидальные ферритовые кольца. Токовые обмотки (первичная и вторичная) трансформатора 1 намотаны совместно одной парой проводов (297 витков). Обмотки трансформатора 2 намотаны одна поверх другой (301 виток каждая). Обмотки трансформатора 3 намотаны раздельно каждая на своём полукольце ферритового магнитопровода (291 и 282 витка). Конструктивная несимметрия намотки в проводимых опытах передачи сигналов из первичных цепей во вторичные не является существенной. Начала и концы обмоток выведены на клеммные зажимы для подключения источника и измерительных приборов.

Очевидно, что трансформатор 1 обладает наиболее высоким коэффициентом электромагнитной (индуктивной) связи, паразитная ёмкость связи между его обмотками также имеет наибольшее значение. Наименьшие значения этих параметров имеет трансформатор 3, зато собственные паразитные ёмкости его обмоток имеют наибольшие значения (немного меньше у трансформатора 2, ещё меньше – у трансформатора 1).

К первичным зажимам испытуемых трансформаторов подключается генератор синусоидального напряжения, например, серии ГЗ «Генератор сигналов низкочастотный». В электронных генераторах этой серии предусмотрена плавная регулировка частоты от 17 Гц до 205 кГц (четыре однодекадных поддиапазона) и амплитуды напряжения от 0 до 180 В с максимальной выходной мощностью 6 ВА. Измерительные приборы – два одинаковых электронных цифровых вольтметра с автоматическим переключением пределов измерений. Дополнительно вольтметры оснащены блоками измерительных резисторов для преобразования тока в напряжение.

Главным испытательным режимом передачи сигналов из первичной цепи во вторичную является холостой ход, т.к. именно в этом режиме наиболее заметны паразитные электромагнитные процессы, свя-



занные с протеканием токов смещения (ёмкостных токов) между витками и самими обмотками. Главная задача лабораторного исследования – снятие частотных характеристик качества передачи противофазного напряжения со входа на выход в вышеназванном диапазоне частот. Вторая задача – снятие частотных характеристик импеданса паразитных (не индуктивных) связей между обмотками.

Порядок проведения опыта передачи противофазного напряжения. Перед началом всех опытов составляется сетка частот, достаточно мелкая для графического представления результатов в логарифмическом масштабе в четырёх декадах. Поскольку во всех опытах нужно одновременно включать оба вольтметра, на запланированной сетке частот снимается таблица соответствия показаний вольтметров. Для этого оба вольтметра одновременно параллельно подключаются к источнику, показания вольтметров на всех частотах записываются в массив, состоящий из двух столбцов. Коэффициенты пересчёта от показаний второго вольтметра к первому рассчитываются почленным делением первого столбца на второй. Результат записывается в отдельный столбцовый массив.

Для проведения опыта передачи противофазного напряжения источник и вольтметр 1 параллельно подключаются к зажимам первичной обмотки, а вольтметр 2 – к зажимам вторичной обмотки испытуемого трансформатора. На всей сетке частот снимаются показания вольтметров. Почленным умножением и делением формируется массив передач напряжения из первичной цепи во вторичную, который совместно с сеткой частот представляет табличную амплитудную частотную характеристику (АЧХ). Данной опытной процедуре подвергаются все три испытуемых трансформатора. В одном поле axes строятся все три опытные АЧХ для последующего анализа.

Для снятия частотных характеристик импеданса паразитных связей между обмотками первичные зажимы испытуемого трансформатора подключаются к общему зажиму блока измерительных резисторов, его «сигнальный» зажим подключается к «фазному» зажиму источника. Выходные зажимы блока подключаются к входу вольтметра 2. Таким образом, вольтметр 2 работает в режиме измерения тока. Вторичные зажимы испытуемого трансформатора подключаются к «общему» зажиму источника. Вольтметр 1 подключается параллельно незамкнутым парам зажимов испытуемого трансформатора. Из всех показаний приборов на всех частотах формируется массив (первый столбец – сетка частот, второй – показания вольтметра 1, третий – показания вольт-

метра 2 в единицах тока (мкА)). Почленное отношение второго столбца на третий – АЧХ импеданса паразитной связи, характеризующее качество гальванической развязки. Данной опытной процедуре подвергаются все три испытуемых трансформатора. В одном поле axes строятся все три опытные АЧХ для последующего анализа.

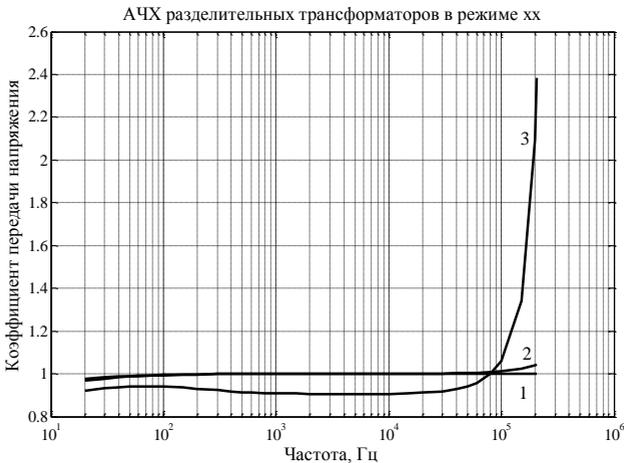


Рис. 1. Экспериментальные АЧХ передачи противофазного напряжения

На рис. 1 показаны экспериментальные АЧХ передачи противофазного напряжения, а на рис. 2 – АЧХ импеданса паразитной связи для испытуемых трансформаторов с разным способом намотки. Номера кривых соответствуют номерам испытуемых трансформаторов.

Кривая 1 на рис. 1 показывает, что первый способ намотки даёт для разделительного трансформатора наиболее широкий частотный диапазон неискажённой передачи противофазного напряжения из первичной цепи во вторичную. Кривая 2 соответствует второму способу намотки, который даёт некоторое ограничение сверху частотного диапазона неискажённой передачи полезного сигнала за счёт проявления паразитного резонансного явления. Третий способ намотки (кривая 3 на рис. 1) даёт наиболее узкий диапазон неискажённой передачи за счёт увеличения собственных межвитковых ёмкостей обмоток несмотря на снижение ёмкости связи между обмотками (кривые на рис. 2).

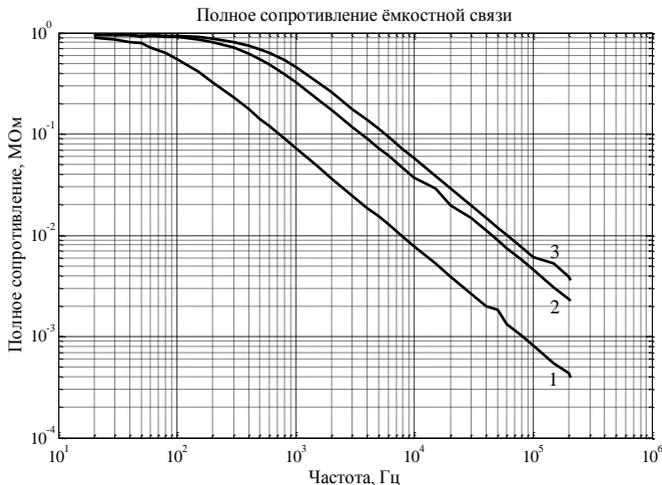


Рис. 2. АЧХ импеданса паразитной (ёмкостной) связи

Сопоставление кривых на рис. 2 показывает, что ёмкость связи между обмотками при втором способе намотки на порядок меньше, чем при первом способе, и примерно в 1,5 раза больше, чем при третьем способе.

Выводы по работе. Анализ частотных характеристик, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что усиление гальванической развязки цепей за счёт пространственного разделения обмоток трансформатора приводит к существенному сужению частотного диапазона неискажённой передачи полезного сигнала. Принятие решения о способе намотки обмоток в связи с этим является компромиссной задачей. Разработанная методика учебно-экспериментального исследования позволяет студентам на лабораторных занятиях по «Электромагнитной совместности» лучше понимать принципы и сущность гальванической развязки для защиты приёмников сигналов от помех в виде синфазных напряжений.

Библиографический список

1. Электромагнитная совместимость и молниезащита в современной электроэнергетике: Учеб. пос. / А.Ф. Дьяков, Р.К. Борисов, Б.К. Максимов и др.; под ред. А.Ф. Дьякова. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 543 с. [eLIBRARY ID: [19578929](#)]
2. Электромагнитные помехи [Электронный ресурс]. URL: <http://dfe.petrsu.ru/koi/posob/electro/part3.htm> (дата обращения 20.10.2020).
3. Шваб А. Электромагнитная совместимость. М.: Энергоатомиздат. 1995. 480 с.
4. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике. М.: Энергоатомиздат. 1995. 304 с.
5. Овсянников А. Г., Борисов Р.К. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник. Новосибирск: НГТУ, 2017. 196 с.



ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN ELECTRIC POWER PRODUCTION INDUSTRY: EDUCATIONAL RESEARCH OF ISOLATION TRANSFORMERS IN THE FREQUENCY DOMAIN

A.A. Eliseev and V.E. Shmelev

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir

Abstract. The methodology is presented for educational research of wideband single-phase isolation transformer which is designed for circuit's galvanic isolation and protection of signal receiver from the common mode in a form of voltage and utilized in the technique of electromagnetic compatibility of different information-measuring electrical equipment at electric power facilities. The methodology has been introduced to the laboratory-based practical for bachelor's program in the area of «Electric power industry and electrical engineering» in the discipline «Electromagnetic compatibility».

Keywords: electromagnetic compatibility, galvanic isolation, isolation transformer, stray coupling, capacitive coupling.



УДК 621.314

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА НА ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЛИНИЯХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Магистрант **Ионова В.И.**Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Андрянов Д.П.**
*Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир*

***Аннотация.** В статье рассматривается моделирование переходных процессов в линиях системы электроснабжения с учетом влияния трансформатора. Показано существенное влияние коэффициента трансформации на характер колебаний тока-напряжения. Моделирование проводилось численными методами в математическом пакете MathCad. Предложенная методика позволяет выбирать оптимальное сочетание параметров, обеспечивающих требуемое качество электроэнергии.*

***Ключевые слова:** Трансформатор, электрическая нагрузка, переходный процесс, коэффициент трансформации, схема замещения.*

Трансформаторы, как устройства, преобразующие уровень напряжения в электрических цепях, нашли самое широкое применение. Однако точное описание работы трансформатора как динамического объекта представляет собой определенные трудности, связанные с представлением электромагнитных полей с учетом конструктивных особенностей самого устройства. В зависимости от степени детализации свойств существует несколько вариантов схем замещения трансформаторов [1].

Искажение колебаний напряжения-тока вследствие магнитного гистерезиса обмоток трансформатора с передаточным отношением равным единице было промоделировано в [2].

Интерес представляет расчет переходных процессов в линиях электроснабжения с учетом электрической нагрузки потребителя и коэффициентом трансформации, соответствующим уровням напряжения систем электроснабжения.

Цель работы: повышение качества электроэнергии в электрических сетях за счет оптимального подбора параметров элементов систем электроснабжения.



Типовая схема замещения линии системы электроснабжения включает в себя: источник ЭДС, активные и индуктивные сопротивления питающей ветви и нагрузки, понижающий трансформатор, а также емкость компенсатора реактивной мощности (рис. 1).

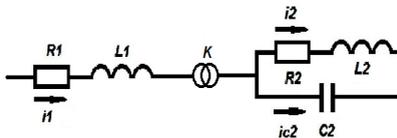


Рис. 1. Схема замещения линии системы электроснабжения

Система дифференциальных уравнений, соответствующая схеме замещения на рис. 1, состоит из уравнений, описывающих ток на входе i_1 , ток нагрузки i_2 и напряжение на ветви емкости U_C . Влияние трансформатора учитывается введением коэффициента трансформации K при условии соблюдения передачи электрической мощности. Для получения системы уравнений в форме Коши необходимо в левой части выделить первые производные искомых параметров.

В сравнении с моделью без учета трансформатора [3] коэффициент трансформации напряжения K вводится в уравнения

– баланса падений напряжения входной ветви-емкости:

$$L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 i_1(t) + K u_C(t) = u_{\text{вх}}(t), \quad (1)$$

– баланса токов в узле соединения входной ветви и нагрузки:

$$K i_1(t) - i_2(t) - C \frac{du_C(t)}{dt} = 0. \quad (2)$$

При составлении модели переходного процесса не учитывался магнитный гистерезис и утечки тока трансформатора, взаимное влияние индуктивностей.

За основу бралась однофазная линейная модель поведения элементов системы электроснабжения с коэффициентом трансформации входного синусоидального напряжения 36/0,4 кВ.

В матричном виде решаемая система уравнений имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_1(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \\ \frac{du_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{K}{L_1} \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{K}{C} & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\text{вх}}(t) \\ L_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

В качестве расчетного метода был выбран алгоритм Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага интегрирования [4].

На рис. 2 приведены графики изменения силы тока во входной ветви (с учетом коэффициента трансформации K) и на нагрузке для времени переходного процесса длительностью 0,08 сек. Фактическая величина силы тока во входной ветви в K раз меньше приведенной на графике.

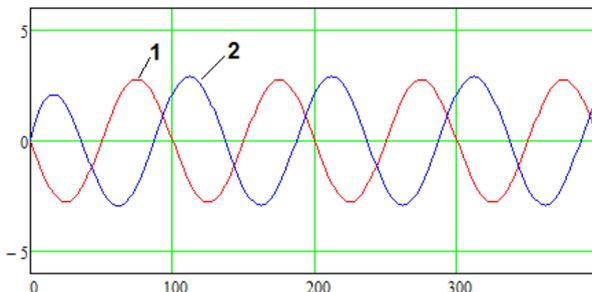


Рис. 2. График изменения токов:
1 – на входной ветви, 2 – на нагрузке

Трансформатор обеспечивает получение на нагрузке переменного напряжения 0,4 кВ (рис. 3).

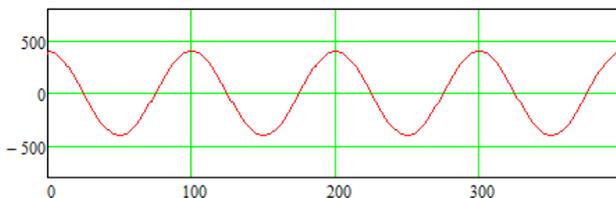


Рис. 3. График изменения напряжения на нагрузке

Изменение мгновенных мощностей на входе и на нагрузке показано на рис. 4. Судя по размаху колебаний имеем полную передачу мощности от источника к потребителю со смещением графика потребляемой мощности по ординате, что связано с влиянием емкости, орга-

низирующей перетечку мощности между параллельными ветвями с сопротивлением-индуктивностью $R_2 - L_2$ и емкостью C_2 .

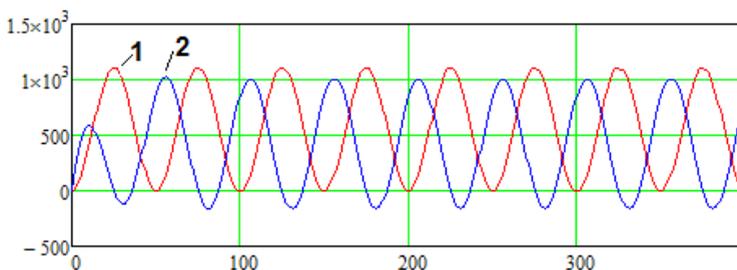


Рис. 4. График изменения мгновенных мощностей:
1 – на входной ветви, 2 – на нагрузке

Выводы по работе

Моделирование переходных процессов систем электроснабжения позволяет получить детальную картину динамических процессов, что, в свою очередь, дает возможность закладывать в проектируемые системы энергоэффективность функционирования объектов.

Библиографический список

1. **Иванов И.И., Соловьев Г.Н., Фролов В.Я.** Электротехника и основы электроники. СПб: Лань, 2012. 736 с. [eLIBRARY ID: [25483798](#)]
2. **Ионова В.И.** Моделирование переходных процессов в электрической цепи с учетом магнитного гистерезиса трансформатора // Наука, образование, теория, практика: новые подходы и актуальные исследования: сб. статей между. науч.-практ. конф.. Самара: Поволжская научная корпорация, 2019. С. 101-103.
3. **Аронов Л. В.** Расчет переходного процесса при включении электропривода в однофазной электрической цепи переменного тока // Молодой учёный. 2015. № 22 (102). С. 124-126. [eLIBRARY ID: [25093676](#)]
4. **Дьяконов В.П.** MathCad 2001. СПб.: Питер, 2001. 624 с.



MODELING OF THE TRANSFORMER INFLUENCE ON A CHARACTER OF THE TRANSIENT PROCESS IN TRANSMISSION LINES OF AN ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEM

V.I. Ionova and D.P. Andrianov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir

Abstract. The article examines the modeling of transient processes in transmission lines of electrical power supply system's considering the influence of the transformer. It has been shown that the transformation ratio significantly influences the character of current and voltage oscillations. The modeling was carried out by numerical methods in math software MathCad. The suggested method allows to choose the optimal combination of parameters that ensure the required electrical energy quality.

Keywords: Transformer, electrical load, transient process, transformation ratio, equivalent circuit.



УДК 621.314

УЧЕТ ВРЕМЕННОЙ ДИАГРАММЫ НАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

магистрант **Ионова В.И.**Научный руководитель канд. техн. наук, доц. **Андрианов Д.П.**
*Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир*

***Аннотация.** В статье рассматривается методика обоснования выбора емкостных батарей, используемых в качестве компенсаторов реактивной мощности с учетом изменяющейся по времени нагрузки при работе оборудования промышленных предприятий. Суточная диаграмма нагрузки представляется как сочетание временных промежутков с равномерной нагрузкой, для которых выбирается емкость батарей, обеспечивающих оптимальную компенсацию реактивной мощности.*

***Ключевые слова:** реактивная мощность, компенсатор, временная диаграмма, нагрузки, оборудование.*

Для современных систем электроснабжения промышленных предприятий нашло широкое применение емкостных батарей в качестве компенсаторов реактивной мощности. Величина мощности компенсаторов рассчитывается исходя из особенностей схем соединения оборудования.

Цель работы повышение энергоэффективности работы оборудования за счет установки компенсаторов реактивной мощности с перенастраиваемой емкостью, величина которой выбирается из учета временной диаграммы нагрузки.

1. Существующая методика выбора компенсаторов реактивной мощности

Существующая практика выбора мощности компенсирующих устройств Q_k основана на минимизации целевой функции, учитывающей активно-реактивную мощность потребителя $P + jQ$, источник питания с напряжением U и линию электропередачи с активным сопротивлением R [1]:

$$\Delta P = (P^2 + (Q - Q_k)^2 R) / U^2 \rightarrow \min.$$



Основное внимание уделяется учету топологии подключения потребителей к сети (радиальная, магистральная и комбинированная схемы). Однако следует отметить, что величины нагрузок потребителей существенно меняют свое значение в зависимости от времени суток. Данный подход не обеспечивает полное гашение мгновенных значений реактивной мощности.

2. Временные диаграммы нагрузок

Для разных типов производства характер изменения нагрузки может сильно отличаться [2]. Пример типового суточного графика потребляемой мощности для автомобильной промышленности приведен на рис. 1, где можно выделить два промежутка времени с некоторыми усредненными значениями мощности, в течение которых отклонения незначительно отличаются.

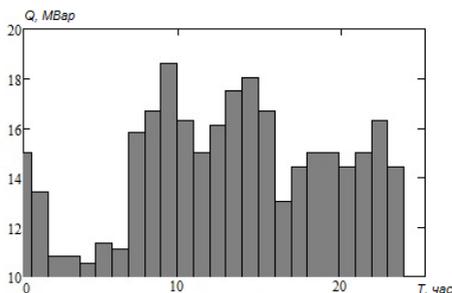


Рис. 1. Суточный график потребляемой мощности для автомобильной промышленности

На примере предприятий машиностроения и металлообработки просматриваются три промежутка времени (рис. 2): с низким, высоким и средним уровнях потребления.

3. Учет временных диаграмм при выборе компенсатора реактивной мощности

Если компенсатор реактивной мощности выбирать исходя из постоянной нагрузки за 24 часа, то с учетом скачков потребляемой мощности имеем существенные потери мощности. При этом компенсатор реактивной мощности в одном случае неспособен полностью поглотить избыток электрической мощности, в другом случае - компенсировать недостаток мощности.

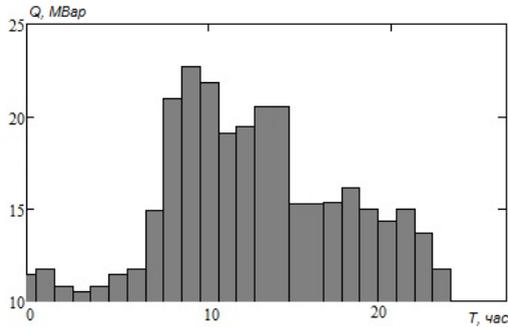


Рис. 2. Суточный график потребляемой мощности для машиностроения

Оптимальным вариантом компенсации реактивной мощности было бы использование адаптивной системы управления мощностью компенсаторных батарей, при котором мощность компенсатора подстраивается под текущее значение потребляемой мощности, отображаемой на приведенных диаграммах.

В реальных производственных условиях эксплуатация адаптивных систем имеет определенные трудности, связанные с культурой производства, наличием электронных средств управления и т.д. На практике подстройка мощности батарей конденсаторов целесообразна не более 4-5 раз за сутки.

Суточную диаграмму нагрузки можно представить, как сочетание временных промежутков с равномерной нагрузкой, для которых выбирается емкость батарей, обеспечивающих оптимальную компенсацию реактивной мощности в пределах промежутка. Величина емкости компенсатора следует выбирать исходя из математического ожидания величины нагрузки, как среднего значения случайной величины [3]. Фактические величины нагрузки рассматриваются как дисперсия, то есть степень разброса случайной величины. При этом количество участков диаграммы (количество настроек емкости компенсаторов) должно обеспечивать минимизацию дисперсии.

С позиции оптимизации целевая функция представляется как сумма дисперсий отклонений мощности в пределах временных диаграмм.

Пример целевой двухпараметрической функции, учитывающей два временных отрезка суточного изменения нагрузки, построенный в MathCad [4], приведен на рис. 3.

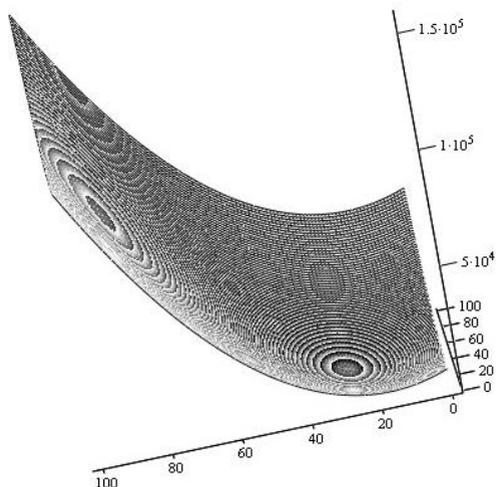


Рис. 3. Объемный график целевой функции

Выводы по работе

Эффективную работу систем электроснабжения следует обеспечивать исходя из принятия во внимание нестабильности параметров электрических сетей, что основывается на применении методов вероятно-статистического анализа. Совместное применение оптимизационных алгоритмов с вероятно-статистическим функционалом дает возможность учитывать временной характер изменения параметров.

Библиографический список

1. **Костин В.Н.** Оптимизационные задачи электроэнергетики. СПб: СЗТУ, 2003. 120 с.
2. **Кабышев А.В., Обухов С.Г.** Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию. Томск: ТПУ, 2005. 168 с.
3. **Монсик В.Б., Скрынников А.А.** Вероятность и статистика: учебн. пос. М.: БИНОМ, 2013. 381 с.
4. **Дьяконов В.П.** MathCad 2001. СПб.: Питер, 2001. 624 с.



CONSIDERATION OF THE TIMING LOAD DIAGRAM OF EQUIPMENT WHEN SELECTING COMPENSATING DEVICES IN ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEMS

V.I. Ionova and D.P. Andrianov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir

Abstract. The article examines the methodology of capacitive battery selection justification which is used as a reactive power compensator with the consideration of time-varying load during industry equipment operation. The daily loading diagram is presented as a combination of time intervals when the load is steady for which the battery capacity is chosen to ensure the optimal reactive power compensation.

Keywords: reactive power, compensator, timing diagram, loads, equipment.



УДК 536.56

МНОГОТОЧЕЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ст. преп. **Русинов В.Л.**¹Ст. преп. **Воловиков А.А.**²Студент **Буровов А.В.**¹¹Амурский государственный университет,
г. Благовещенск²Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород

***Аннотация.** Рассматривается разработка прибора для многоточечного измерения температуры воздуха в зданиях или на открытых площадках. Прибор выполнен на контроллере Arduino Nano с использованием цифровых преобразователей температуры DS18B20, для вывода показаний применены семисегментные индикаторы.*

***Ключевые слова:** многоточечный, микроконтроллер, Arduino, цифровой преобразователь, измерение температур, схемотехническое моделирование, Proteus.*

Многоточечные измерители температуры (МИТ) востребованы на складах, хранилищах и других промышленных объектах, а также при проведении научных исследований. Предлагаемые производителями МИТ представляют собой сложные и дорогостоящие системы, нуждающиеся в предварительной настройке. В большинстве устройств отсутствует автономный режим работы и не производится сохранение данных на сменный накопитель, результаты измерений выводятся только на персональный компьютер [1, 2].

Цель работы. Разработать многоточечный измеритель температуры со следующими возможностями: изменять топологию точек измерения температуры; менять частоту измерений от долей секунды до десятков минут; работать автономно, от сети или USB разъема персонального компьютера (ПК); иметь возможность вывода результатов измерений в реальном времени на индикаторы (на самом приборе), на флеш-накопитель (установленный в прибор) и в порт USB ПК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать электрическую принципиальную схему прибора;



- в программе схемотехнического моделирования исследовать работу схемы прибора, трассировать печатную плату и подготовить выходные файлы для её изготовления;

- разработать проводную сеть и способ подключения к ней цифровых преобразователей температуры;

- составить алгоритм и написать программу микроконтроллера для работы с сетью датчиков, кнопочным интерфейсом, часами реального времени и флеш-накопителем;

- разработать программу сбора показаний температуры от МИТ на персональный компьютер через USB интерфейс в реальном времени.

Описание разработки. Многоточечный измеритель температуры является программно-аппаратной системой, состоящей из трех частей: сети цифровых преобразователей температуры, модульного контроллера управления и программы обработки результатов измерений.

Соединение в сеть цифровых преобразователей выполняется коммутационным кабелем с промежуточными розетками для подключения к ним термодатчиков DS18B20 с использованием разъемов типа RJ-12.

Функционально модульный контроллер состоит из микроконтроллерной (МК) части и модулей расширения:

- микроконтроллерная часть построена на базе МК ATmega 328P. Реализует функции управления сетью преобразователей по сети 1-Wire, передачу данных на ПК по интерфейсу USB, выполняет алгоритмы управления, настройку многоточечного измерителя и обеспечивает работу с модулями расширения;

- модули расширения, подключаемые к микроконтроллерной части устройства, реализующие дополнительные возможности системы, такие как модуль автономного питания, часы реального времени, накопитель на SD карте.

Программа обработки результатов измерений работает на ПК под управлением MS Windows XP и выше. Предназначена для ведения архива и отображения показаний термодатчиков.

На данный момент прибор (рис. 1) состоит из основного модуля (микроконтроллер, индикаторы и кнопки) и сети цифровых термодатчиков [3]. В дальнейшем будут конструироваться дополнительные модули, расширяющие возможности измерителя.

Для непосредственного измерения температуры используется цифровой преобразователь DS18B20 от компании DALLAS, который представляет собой микросхему в корпусе TO-92 [4]. Разрядность



встроенного АЦП составляет от 9 до 12 бит и настраивается программно. Наименьшую погрешность измерений $0,5^{\circ}\text{C}$ микросхема показывает в диапазоне от -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$, полный диапазон измерений находится в пределах от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Напряжение питания – $3,0 \div 5,5$ В. Для отображения информации применены два четырехразрядных семисегментных индикатора, работающих под управлением сдвиговых регистров TM74HC595D [5].

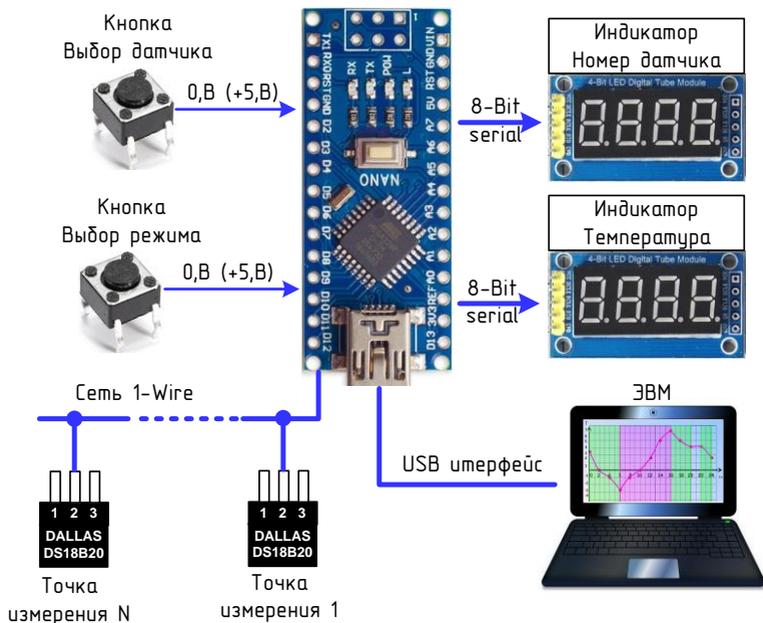


Рис. 1. Структурно-функциональная схема МИТ

Принцип действия прибора. Управление микросхемой DS18B20 и обмен данными производится с использованием протокола 1-Wire по трехпроводной шине. Наличие уникального 64-битного кода каждой микросхемы позволяет привязать её к определенному месторасположению в цифровой сети, т.е. программно присвоить ей порядковый номер. Этот номер выводится на индикатор "Номер датчика" (рис. 1), а на индикаторе температуры выводится считанная с этого датчика температура. Индикация номера датчика и температуры происходит цик-

лически, по каждому датчику в течение 2 секунд. Предусмотрена принудительная индикация показаний конкретного датчика с помощью кнопки "Выбор датчика". Кнопка "Выбор режима" позволяет выбрать режим циклической или постоянной индикации.

Принципиальная электрическая схема МИТ. Центральным элементом схемы (рис. 2) является контроллер D1 – Arduino Nano v3.3 [6]. Приборы D2 и D3 – модули четырехразрядных индикаторов, D4 – модуль цифрового термопреобразователя (микросхема DS18B20 и подтягивающий резистор R1), DN – микросхемы DS18B20, подключаемые к сети 1-Wire, кнопка SB1 – выбор датчика, кнопка SB2 – выбор режима.

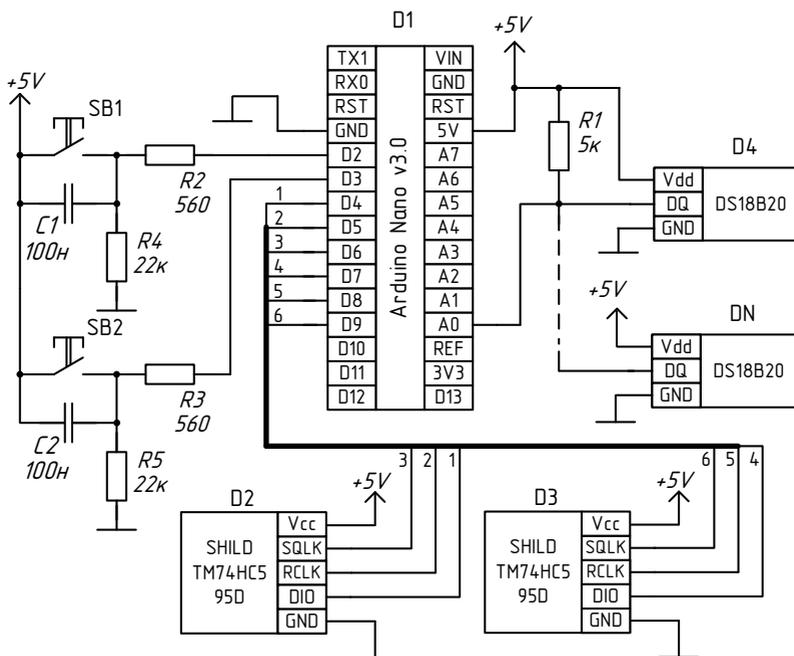


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема МИТ

Программирование микроконтроллера. Программа для микроконтроллера ATmega 328P написана на языке C в виде скетча Ардуино в среде Arduino IDE v1.8.5. Используются библиотеки: OneWire.h – реализация протокола 1-Wire, TM74HC595Display.h – управление четырехразрядным индикатором и др. [7]. Алгоритм программы автома-

тически обнаруживает появление нового датчика и присваивает ему следующий по порядку незанятый номер, обеспечивает вывод номера датчика и значение измеряемой им температуры на индикаторы, а также контролирует состояние кнопок, производит переключение режимов индикации [8].

Выводы по работе. Разработанный многоточечный измеритель температуры позволяет увеличивать число одновременных измерений температуры в различных точках, прост в настройке и подключении новых термодатчиков, имеет модульную конструкцию, которая позволяет выбором модулей обеспечить необходимый функционал прибора и существенно меньшую стоимость. В дальнейшем планируется разработка дополнительных модулей и расширение функциональности системы для решения всех поставленных задач.

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Библиографический список

1. Система многоточечного измерения температуры [Электронный ресурс]. URL: <https://www.terratel.eu/ru/temperature-measurement-system.html> (дата обращения 20.10.2020).
2. Многоточечный мониторинг температуры на складе [Электронный ресурс]. URL: <http://sensor-tools.ru/projects/sklady/mnogotochechnyj-monitoring-temperatury-na-sklade/> (дата обращения 20.10.2020).
3. **Толстошеев В.В.** Цифровой измеритель температуры на ARDUINO // Молодёжь XXI века: шаг в будущее: мат. XXI рег. науч.-практ. конф. Благовещенск: ДальГАУ, 2020. С. 226-227. [eLIBRARY ID: [43806227](#)]
4. Datasheet DS18B20 [Электронный ресурс]. URL: <http://avr.ru/int/Files/Datasheet/ds18b20.pdf> (дата обращения 20.10.2020).
5. Datasheet TM74HC595 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/12198/ONSEMI/74HC595.html> (дата обращения 20.10.2020).
6. Pinout Diagram [Электронный ресурс]. URL: <https://store.arduino.cc/usa/nano-every> (дата обращения 20.10.2020).
7. Arduino: Библиотеки/OneWire [Электронный ресурс]. URL: http://wikihandbk.com/wiki/Arduino_OneWire (дата обращения 20.10.2020).
8. Св-во о гос. рег. прогн. для ЭВМ № [2020610618](#). Программа для измерения температуры с применением цифровых преобразователей DS18B20 и микроконтроллерной платы Arduino Nano / В.Л. Русинов, А.В. Горковенко, А.А. Ильин; Амур. гос. ун-т., 17.01.2020. [eLIBRARY ID: [42497411](#)]



MULTIPOINTED TEMPERATURE METER

V.L. Rusinov¹, A.A. Volovikov² and A.V. Burovov¹

¹*Amur State University, Blagoveshchensk*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

Abstract. The paper examines the device development for multipointed air temperature measurement inside a building and open areas. The device is built on an Arduino Nano controller using digital temperature converters DS18B20, for measurements indication the seven-segment displays were used.

Keywords: multipointed, microcontroller, Arduino, digital converter, temperature measurement, circuit simulation, Proteus.



УДК 620.9

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ И БЕЗОПАСНОСТИ МЕГАПОЛИСА ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Аспирант **Чехранова О.А.**Научный руководитель д-р техн. наук, доц. **Гашо Е.Г.***Национальный исследовательский
университет «МЭИ», г. Москва*

***Аннотация** В данной статье приведен анализ текущей ситуации теплоэнергетического комплекса города Красноярск. Разработаны мероприятия по совершенствованию источников теплоснабжения, определения перспективных источников и расчет их теоретического и практического теплового потенциала с учетом экономической целесообразности. Проведен комплексный расчет и анализ увязок нужд теплоснабжения Красноярска и источников, использующих вторичное и низкопотенциальное тепло.*

***Ключевые слова:** энергетическая эффективность, теплоснабжение города, вторичные энергоресурсы, теплонаносные установки, низкопотенциальные источники энергии.*

Для полноценного развития страны необходимо обеспечивать урбанизацию городов, которая характеризуется расширением и улучшением социальной сферы, строительных, наукоемких и промышленных отраслей, а также стратегически важным является развитие энергетики как регионов, так страны в целом. Теплоэнергетические системы России самые масштабные в мире, их доля в мире близится к половине. Один из основных приоритетов в развитии страны до 2035, является, в том числе, и развитие энергопромышленного и теплоэнергетического комплекса.

Цель работы проведение комплексного подхода, оценки совершенствований теплоснабжения города Красноярска, осуществление технико-экономического обоснования планируемых мероприятий

Общие сведения о городе Красноярск.

В городе Красноярск функционирует множество промышленных предприятий, которые в свою очередь на своем производстве теряют до 60% тепловой энергии, наиболее крупным является Красноярский алюминиевый завод. Несмотря на то, что теплоснабжение города осу-



ществляется преимущественно от ТЭЦ, в городе присутствует большое количество котельных.

Общая площадь жилого фонда составляет 26 тыс. м⁰, оценивая это показать в м² на человека, получаем, что в среднем на одного жителя Красноярска приходится 20 м², что соответствует норме.

Экологическая обстановка Красноярска крайне тяжелая, ежемесячно фиксируются превышения ПДК атмосферного воздуха, порядка на 20%.

Основными источниками выбросов являются предприятия промышленного комплекса, теплоэнергетические предприятия и автотранспорт.

Из-за географического расположения Красноярск имеет перспективный низкопотенциальный источник - реку Енисей. Оценка Енисея будет проведена в последующих разделах.

Источники низкопотенциального тепла.

Основными источниками низкопотенциального тепла является крупная река Енисей, которая не замерзает весь год. Теоретический потенциал Енисея составляет 60-100 млн Гкал. Крупными источниками сбросного тепла являются Красноярские ТЭЦ. Ежегодно на ТЭЦ-1 и на ТЭЦ-2 сбрасывается порядка 4 млн Гкал, а на ТЭЦ-3 порядка 1 млн Гкал. В городе расположено крупное промышленное предприятие - Красноярский алюминиевый завод, его ежегодное потребление составляет 13 млн Гкал, из них 8 млн Гкал сбрасывается в атмосферу.

Как мы видим, тепловые электростанции имеет большой запас низкопотенциального тепла в системе водооборотного охлаждения. На сегодняшний день технически возможно утилизировать до 50% низкопотенциального тепла, что составляет порядка 10% от количества отпущаемой теплоты. Для утилизации применяют теплонаносные установки.

В данной работе рассмотрено три варианта использования низкопотенциального тепла, представленные в табл. 1. В качестве низкопотенциального источника была выбрана охлаждающая вода технического водоснабжения. Выбор такого источника низкопотенциального тепла даст следующие преимущества:

- сокращения сбросного тепла;
- снижение температуры воды на входе в паровую турбину (ТП);
- повышение экологической эффективности.



Таблица 1

Варианты использования ТНУ на ТЭЦ.

Вариант	Пояснение
1. Использование ТНУ для дополнительного производства электрической энергии	Достигается за счет снижении нагрузок теплофикационных отборов паровых турбин. Отпуск теплоты от ТЭЦ и расход топлива остается без изменения
2. Увеличение отпуска теплоты от ТЭЦ	Суммарная электрическая нагрузка на ТЭЦ и суммарный расход топлива не меняется
3. Снижение расхода топлива	Суммарная выработка электроэнергии и отпуск тепла от ТЭЦ остается неизменным

Стоит подчеркнуть, что необходимым условием для нормальной работы теплового насоса является температурный режим. Разница между температурой испарения $t_{и}$ и температурой воды после конденсатора турбины должна быть не менее 5°C ($\Delta = 5^{\circ}\text{C}$), $t_{и}$ должна быть ниже на Δ . А разница между температурой конденсации рабочего вещества $t_{к}$ и нагреваемой сетевой водой должна быть также не менее 5°C , $t_{к}$ должна быть выше на Δ .

Температурный уровень подпиточной воды на Красноярских ТЭЦ усреднено составляет 35°C , перед деаэратором и расход пропиточной воды в среднем составляет 2200 т/ч, что позволяет установить ТН большого диапазона по мощности от 1 до 100 МВт. Таким образом, учитывая все выше сказанное, предполагается место включения ТНУ в тепловую схему ТЭЦ после пучков конденсаторов турбин.

Результаты расчета экономии топлива, относительно трех вариантов, показали, что наибольшую экономию даст второй вариант. Также внедрение ТНУ дает значительное сокращение УРУТ (удельный расход удельного топлива) на станциях. Но при внедрении ТНУ увеличиваются затраты на собственные нужды на электроэнергию. От тарифа на электроэнергию зависит срок окупаемости данного мероприятия, в среднем он составляет от 3-6 лет.

Самым мощным источником энергии является Енисей, и в условиях города наиболее эффективным источником могут стать теплонаносные установки, использующие теплоту речной воды. Тепловые насосы большой мощности распространены в Швеции и в Финляндии. В настоящее время производство отечественных парокомпрессионных ТНУ большой мощности осуществляется в г. Новосибирске, тепловая мощность достигает 3 МВт. Производство ТНУ с центробежными компрессорами мощность 11,5 МВт организовано в г. Казань.



Для подогрева речной воды используется подогреватель, в котором греющим теплоносителем является обратная сетевая вода. При снижении температуры реки, расход сетевой воды будет возрастать. Таким образом, теплопроизводительность теплонаносной установки будет зависеть от температуры реки. Так, например, охлаждение воды от 15 до 2 градусов, приводит к снижению на 68%.

Для снижения нагрузки в первой ступени компрессоров используется промежуточный сосуд, который осуществляет сепарацию. Во вторую ступень компрессора фреон поступает из сепаратора. Коэффициент трансформации зависит от температуры речной воды линейно. Чем выше температура, тем выше эффективность. Для исключения такой зависимости предусматривают схемы с предварительным подогревом воды, однако такой вариант решения имеет свой недостаток - увеличивается расход электроэнергии. Помимо представленного варианта возможно рассматривать комбинированную выработку тепла и холода. Охлаждаемая вода подается в испаритель в летний период и ТН производит холод для системы кондиционирования. Холодопроизводительность будет от 9,5 до 10,1 МВт.

Срок окупаемости сильно зависит от коэффициента трансформации и тарифов на тепловую и электрическую энергию, поэтому варьируется от 6 до 15 лет.

Экологическая эффективность теплового насоса определяется тем, что применяемый в расчете фреон не влияет на озоновый слой, но воздействует на парниковый эффект с GWP = 1340 по сравнению с CO₂ [4].

Еще одним, крупным источником является КрАз. Завод ежегодно производит более 1 млн тонн алюминия, производство которого высокоэнергоёмкое. Основным источником энергии является Красноярская ГЭС. Потребление энергии на производство 1 тонны алюминия составляет примерно 13,5 млн Гкал. Для минимизации потери тепла и дальнейшего его использования, предполагается в процессе электролиза устанавливать воздушные теплообменные аппараты. Энергетическим эффектом от данных мероприятий после модернизации процессов является то, что выбросы сократились более чем в 1,5 раза, и составляют уже не 60%, а 40%.

Увязка источников с теплоснабжением города

Для повышения эффективности теплоснабжения необходимо модернизировать оборудование и использовать более эффективные методы получения энергии, например, получение тепла от низкопотенциальных источников. По классификации представлений в работе



Е.Г. Гашо [1], Красноярск относится по удельному энергопотреблению к 3 категории, выше средних показателей 12 туг/чел. И по параметрам модели выделения приоритетов в энергоэффективного развития региональных ТЭС, Красноярск будет относиться к третьей группе, где модельное представление должно выглядеть следующим образом:

$$\sum V_i < V \quad (1)$$

Перспективный объем V_i потребление ресурсов должен быть ниже текущего V . В приоритете группы должна быть комплексная модернизация всех энергоемких производств, применение всех ресурсов и использование энергоресурсов более высокого качества.

Проанализировав состояние котельных города, были определены котельные с самым высоким УРУТом, их планируется заменить на ТНУ-ТЭЦ, это приведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду, снижению удельной себестоимости производства тепловой энергии.

Также за счет ТНУ-Енисей и КрАЗ планируется обеспечение тепловой энергии новой застройки. Данное мероприятия снизит негативное воздействие на окружающую среду.

Выводы по работе

В работе был проведен анализ города Красноярск с точки зрения теплоснабжения и экологической обстановки. Красноярск - крупный промышленный город, с множествами предприятий промышленного типа В теплоснабжении преобладает доля ТЭЦ. В городе большое количество неэффективных котельных, работающих с УРУТ больше 240. Ежегодно в Красноярске фиксирует множество превышений ПДК, что является показателем неблагоприятной экологической обстановки для города. Поскольку город Красноярск по удельному энергопотреблению относятся к категории выше среднего, энергопотребление составляет 10 туг/чел, стратегия развитие теплосистемы была выбрана из того, что будущий объем потребления ресурсов должен быть ниже существующего, это можно достичь, применяя более совершенные технологии и методы.

В работе были рассмотрены мероприятия с использованием низкопотенциального и вторичного тепла. Выявлены наиболее энергоэффективные объекты — это крупнейший источник низкопотенциального тепла река Енисей, теоретически рассчитанная мощность составляет 100 млн Гкал, ТЭЦ и Красноярский алюминиевый завод, который также является источником низкопотенциального и вторичного тепла.



Были поведены расчеты увязки новых более совершенных источников с городской системой теплоснабжения. Они показали, что на первом этапе наиболее перспективным будет замена неэффективных котельных и перевод их на ТЭЦ, с применением ТНУ, это приведет к снижению выбросов от котельных, срок окупаемости такого мероприятия составляет 6 лет.

Вместе с этим был проведен расчет обеспечения нового строительства за счет новых источников: ТНУ, использующие низкопотенциальное тепло от Енисея и КрАз, использующего вторичное тепло. Расчеты показали, что использование ВЭР может закрыть потребность города на 3 млн Гкал, вместе с этим сократить выбросы КрАз на 60%. Использование низкопотенциального тепла от Енисея является наиболее перспективным и выгодным как с точки зрения энергоэффективности, так с точки зрения улучшения экологической безопасности. Но существует ряд ограничений для полного внедрения таких технологий:

- в настоящее время в России нет производства ТНУ большой мощности;

- возникает потребность в строительстве хранилища для обеспечения бесперебойной работы;

- зависимость от тарифов на электроэнергию.

Расчеты показали, что срок окупаемости ТС сильно зависит от тарифов на электроэнергию. Так при использовании электроэнергии от ТЭЦ срок окупаемости составляет 9 лет с учетом реконструкции теплосетей.

Таким образом, выбирая интеграцию источников в схему города, необходимо ориентироваться на полученные эффекты от них. В табл. 2 представлены результаты экономии топлива, экологическая эффективность от ТЭЦ-ТНУ, от использования ВЭР на КрАз и использование теплоты Енисея.

Таблица 2

Эффекты от внедрения

Объект	ΔB – сокращение сжигания топлива тыс. т/год	ΔW – сокращение выбросов, %
ТЭЦ-ТНУ	145	4
КрАз	829	Выбросы от производства 20%, сокращение выбросов от ТЭЦ 25%
Енисей	400 зависимости от мощности и количества ТНУ	68



Сокращение расхода топлива по Енисею определялось относительно угольной котельной, сокращение расхода топлива на КрАз определялось сокращением расхода топлива от ТЭЦ на величину тепловой мощности КрАз.

Библиографический список

1. **Гашо Е.Г.** Разработка методологии совершенствования промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем [Рукопись]: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04 / Евгений Геннадьевич Гашо. М., 2018. 39 с.
2. **Султангузин И.А., Потапова А.А.,** Высокотемпературные тепловые насосы большой мощности для теплоснабжения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. 2010. № 10. URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2363 (дата обращения 20.10.2020).
3. Энергетическая стратегия России на период до 2035 [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 25.10.2020).
4. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2019 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf> (Дата обращения: 1.04.2020).



IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND SAFETY OF A METROPOLITAN CITY BY ENERGY INDUSTRIAL COMPLEX MODERNIZATION

O.A. Chekhranova and E.G. Gasho

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Abstract This article analyses the current state of the heat and power complex in Krasnoyarsk city. It presents the developed measures for heat supply sources improvement, finding advanced sources, and calculation of their theoretical and practical thermal potential considering economic feasibility. There has been conducted the complex calculation and analysis of coordination between Krasnoyarsk heat supply and sources that use the secondary and low-grade heat.

Keywords: energy efficiency, city's heat supply, secondary energy resources, heat pump plant, low-grade sources of energy.



Научное издание
«Энергетические системы»
№ 1, 2020 г.

Научный журнал



Учредитель журнала
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Главный редактор
Трубаев Павел Алексеевич

Подписано в печать 30.11.2020 г.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, УК2, оф. 306.