

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 60, № 4
2017

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь,
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базы данных:
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Новаш И. В., Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю.** Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink 291
- Сергей И. И., Пономаренко Е. Г., Потачиц Я. В.** Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании 309
- Александров О. И.** Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе 320
- Ласый П. Г., Мелешко И. Н.** Приближенное решение одной задачи об электрических колебаниях в проводах с помощью полилогарифмов 334
- Халилов Э. Д.** О моделировании режимов электроэнергетических систем с устройствами FACTS 341

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С.** Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха 352
- Rymasheuskaya K. D.** The Improvement of Low-Waste Technologies of Working Body of Water Preparation at Thermal and Nuclear Power Plants
(**Римашевская Е. Д.** Совершенствование малоотходных технологий подготовки водного рабочего тела на тепловых и атомных электрических станциях) 367

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Обухов Е. В.** Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепродзержинского водохранилища в условиях изменения климата 380

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

- С. Н. АСАМБАЕВ (Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан),
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИЙ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)*

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257**

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 19.07.2017. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 4,64. Тираж 150 экз.
Дата выхода в свет 25.07.2017. Заказ 555.

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2017

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 60, No 4
2017

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus,
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in the following databases:
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. MatLab-Simulink Based Information Support for Digital Overcurrent Protection Test Sets	291
Sergey I. I., Panamarenka E. G., Potachits Ya. V. Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit	309
Alexandrov O. I. Sampling of the Plan of Repairs of the Main Equipment in the Electrical Power System.	320
Lasy P. G., Meleshko I. N. Approximate Solution of One Problem on Electrical Oscillations in Wires with the Use of Polylogarithms.	334
Halilov E. D. On the Simulation of Modes of Electric Power Systems with FACTS Devices	341

HEAT POWER ENGINEERING

Sukhotskii A. B., Sidorik G. S. Experimental Study of Heat Transfer of a Single-Row Bundle of Finned Tubes in Mixed Convection of Air	352
Rymasheuskaya K. D. The Improvement of Low-Waste Technologies of Working Body of Water Preparation at Thermal and Nuclear Power Plants	367

HYDRAULIC POWER ENGINEERING

Obukhov E. V. A Study of the Influence of the Yearlong Water Content on the External Water Exchange in Dneprodzerzhinsk Reservoir under Conditions of Climate Change	380
---	-----

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- S. N. ASAMBAEV (*Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan*),
W. T. WÓJCIK (*Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland*),
V. V. GALAKTIONOV (*Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation*),
M. DADO (*Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic*),
V. A. JANGIROV (*RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation*),
K. V. DOBREGO (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*Deputy Editor-in-Chief*),
I. V. ZHEZHELENKO (*Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine*),
P. W. ZHUKOWSKI (*Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland*),
A. S. KALINICHENKO (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*First Deputy Editor-in-Chief*),
A. I. KIRILLOV (*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation*),
A. KONNOV (*Lund University, Sweden*),
B. K. MAKSIMOV (*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation*),
K. MAHKAMOV (*Northumbria University, United Kingdom*),
A. A. MIKHALEVICH (*The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),
E. S. MISHUK (*The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation*),
NGO TUAN KIET (*Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam*),
O. G. PENYAZKOV (*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*),
E. N. PISMENNYI (*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine*),
E. N. SABUROV (*Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation*),
A.-S. S. SAUHATAS (*Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia*),
V. S. SEVERYANIN (*Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus*),
I. I. SERGEY (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*) (*Deputy Editor-in-Chief*),
B. S. SOROKA (*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine*),
V. A. STROEV (*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation*),
V. I. TIMOSHPOLSKY (*LLC, Kiev, Ukraine*),
E. V. TOROPOV (*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*),
E. UŠPURAS (*Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania*),
B. M. KHROUSTALEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
L. V. SHENETS (*The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation*)

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th Reg. No 1257

Typesetting and makeup are made in editorial office
of Journals "Energetika" and "Science and Technique"

Passed for printing 19.07.2017. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet . . .
An edition of 150 copies. Date of publishing 2017. Order list . . .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308

УДК 621.316.925

Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink

И. В. Новаш¹⁾, Ф. А. Романюк¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Рассмотрена реализация информационного обеспечения для компьютерных и аппаратно-программных испытательных комплексов для проверки работоспособности цифровых токовых защит электроустановок и их моделей в системе динамического моделирования MatLab-Simulink. Показано, что математическое моделирование части электроэнергетической системы – обобщенного электроэнергетического объекта – может строиться на основе жестких и гибких моделей. Жесткие модели, реализуемые на основе математического описания электрических и магнитных контуров элементов энергосистемы, могут рассматриваться как эталон, с которым можно сравнивать результаты моделирования таких же электроэнергетических объектов, но полученных в других системах моделирования. Гибкие модели обобщенного электроэнергетического объекта предлагается реализовывать в системе динамического моделирования MatLab-Simulink, в состав которой входит пакет расширения SimPowerSystems, ориентированный на имитационное моделирование электротехнических устройств. Рассмотрены особенности расчета параметров основных библиотечных блоков SimPowerSystems, из которых формируется модель энергосистемы. Из стандартных блоков Simulink составлены модели трехфазной группы трансформаторов тока с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом» и модель цифровой токовой защиты, отсутствующие в базовой библиотеке. Проведено сопоставление результатов моделирования одного и того же обобщенного электроэнергетического объекта, реализованного в различных компьютерных программных комплексах. Расхождение результатов моделирования составило не более 3 %, что позволяет рекомендовать систему динамического моделирования MatLab-Simulink для создания программного обеспечения аппаратно-программных испытательных комплексов. Предложена структура аппаратно-программных испытательных комплексов на основе проверочной установки Omicron CMC 356. Произведено сравнение времени срабатывания реального цифрового реле типа MP 801 и модели, параметры которой в точности повторяют параметры устройства прототипа при идентичных входных воздействиях. В результате проведенных испытаний выявлено близкое совпадение результатов (расхождение не более 8 %), что подтверждает возможность использования предложенных испытательных комплексов при разработке и отладке новых цифровых устройств релейной защиты.

Ключевые слова: цифровая токовая защита, программное обеспечение, аппаратное обеспечение, математическая модель, трансформатор тока, MatLab, Simulink, SimPowerSystems, RTDS, проверочная установка, Omicron CMC 356, NetSim, цифровой фильтр

Для цитирования: Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / И. В. Новаш [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 291–308. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308

Адрес для переписки

Романюк Федор Алексеевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Fiodar A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by

MatLab-Simulink Based Information Support for Digital Overcurrent Protection Test Sets

I. V. Novash¹⁾, F. A. Romaniuk¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The implementation of information support for PC-based and hardware-software based sets for digital overcurrent protection devices and their models testing using MatLab-Simulink environment is considered. It is demonstrated that the mathematical modeling of a part of the power system – viz. of the generalized electric power object – could be based on rigid and flexible models. Rigid models implemented on the basis of mathematical description of electrical and magnetic circuits of a power system can be considered as a reference model for the simulation results that have been obtained with the aid of another simulation system to be compared with. It is proposed to implement flexible models for generalized electric power object in the MatLab-Simulink environment that includes the SimPowerSystems component library targeted to power system modeling. The features of the parameters calculation of the SimPowerSystems component library blocks that the power system model is formed of are considered. Out of the Simulink standard blocks the models of a wye-connected current transformers were composed as well as the digital overcurrent protection, missing in the component library. A comparison of simulation results of one and the same generalized electric power object implemented in various PC-based software packages was undertaken. The divergence of simulation results did not exceed 3 %; the latter allows us to recommend the MatLab-Simulink environment for information support creation for hardware-software based sets for digital overcurrent protection devices testing. The structure of the hardware-software based set for digital overcurrent protection device testing using the Omicron CMC 356 has been suggested. Time to trip comparison between the real digital protection device MP 801 and the model with the parameters which are exactly match the parameters of the prototype device was carried out using the identical test inputs. The results of the tests demonstrated a close coincidence of results (the divergence of not more than 8 %), that confirms the possibility of using the suggested hardware-software based test set during the development and debugging of new digital relay protection devices.

Keywords: digital overcurrent protection, software, hardware, mathematical model, current transformer, MatLab, Simulink, SimPowerSystems, RTDS, test set, Omicron CMC 356, NetSim, digital filter

For citation: Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2017) MatLab-Simulink Based Information Support for Digital Overcurrent Protection Test Sets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 291–308. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308 (in Russian)

Введение

Внедрение новых технологий в энергетической отрасли, постоянный рост генерирующих мощностей, усложнение топологии сети передачи и распределения электрической энергии являются причиной возникновения новых, ранее не характерных режимов работы энергетической системы. Данное обстоятельство требует от производителей цифровых устройств релейной защиты (ЦУРЗ) предварительного испытания планируемых к выпуску защит в условиях, максимально приближенных к реальным. Наиболее рациональный и эффективный способ данных испытаний – моделирование, позволяющее получить первичный опыт эксплуатации внедряемых решений [1].

Известны электродинамические (физические) и аналоговые виды моделей электроэнергетической системы (ЭС). Преимущества таких моделей

заканчиваются в масштабной точности моделируемых объектов, однако дороговизна, занимаемое пространство, сложность настройки и перестроения моделей ограничивают их широкое использование.

Наиболее распространенным в настоящее время является метод математического моделирования ЭС и ЦУРЗ. Современные испытательные комплексы (ИК) используют этот метод для получения входных информационных сигналов, представляющих собой подводимые к ЦУРЗ или к его модели токи и напряжения, равные по величине и форме входным сигналам, соответствующим реальным условиям эксплуатации. ИК для ЦУРЗ развиваются и совершенствуются по двум основным направлениям.

Первое направление – применение комплексного математического моделирования ЭС совместно с ЦУРЗ, открывающее возможность отрабатывать новые принципы построения цифровых защит и проверять их работоспособность при аварийных режимах, которые невозможно искусственно повторить на реальных энергетических объектах.

Второе направление – использование комплексных математических моделей ЭС для получения информационных сигналов ЦУРЗ в рабочих и аварийных режимах защищаемого объекта. Для этой цели создаются ИК, состоящие из аппаратной и программной частей. Программная часть, реализующая комплексные математические модели ЭС и измерительных трансформаторов, воспроизводится на персональном компьютере (ПК), где формируются временные последовательности мгновенных значений вторичных токов и напряжений для всех режимов, на которые должна реагировать испытываемая защита. В аппаратной части, содержащей проверочную установку (ПУ), эти коды преобразуются в аналоговые сигналы, усиливаются и в реальном масштабе времени подаются на испытываемое ЦУРЗ.

В настоящей статье обосновывается возможность реализации в системе динамического моделирования (СДМ) MatLab-Simulink программно-информационного обеспечения испытательных комплексов для проверки работоспособности как серийно выпускаемых цифровых токовых защит электроустановок, так и их моделей.

Основная часть

Основным требованием, предъявляемым к ИК, является достоверность результатов моделирования режимов работы ЭС, достигаемая в первую очередь правильным выбором структуры и полнотой математического описания всех элементов, входящих в ЭС. Поскольку полную математическую модель всей ЭС, по которой рассчитывались бы входные сигналы релейной защиты, составить невозможно, то из ЭС выделяется фрагмент в виде так называемого обобщенного электроэнергетического объекта (ОЭО). Расчетная схема ОЭО должна содержать все элементы, оказывающие заметное количественное и качественное влияние на входные сигналы (вторичные токи трансформаторов тока), подводимые к устройству защиты.

Совокупность модели ОЭО и модели трехфазной группы трансформаторов тока (ТТ) составляет компьютерный программный комплекс (КПК)

выработки входных сигналов защиты (рис. 1), а КПК и модель ЦУРЗ образуют компьютерный испытательный комплекс (КИК).

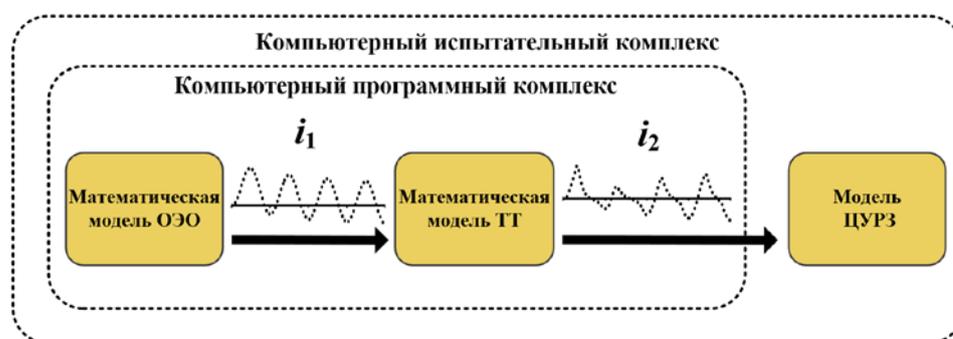


Рис. 1. Компьютерный испытательный комплекс

Fig. 1. PC-based test set

Структура математической модели ОЭО может быть жесткой или гибкой. Жесткая модель характеризуется неизменным набором элементов с возможностью изменения их параметров. Она реализуется на основе детального математического описания электрических и магнитных контуров моделируемых элементов путем решения десятков дифференциальных и алгебраических уравнений.

На кафедре «Электрические станции» БНТУ на протяжении более 40 лет ведутся работы по математическому моделированию электроэнергетических объектов и разработке компьютерных программ для исследования поведения устройств релейных защит методом вычислительного эксперимента [2]. Большинство созданных компьютерных программ разрабатывалось в период массового внедрения первых ПК, работающих под управлением операционной системы MS DOS. В настоящее время в связи с использованием в ПК новых типов микропроцессоров и современных многооконных операционных систем типа Windows с развитым графическим и мультимедийным интерфейсом применение подобных расчетных программ становится затруднительным, а зачастую и невозможным. Обеспечить функционирование таких программ в современных операционных системах возможно при создании КПК на объектно-ориентированных языках программирования с использованием разработанного ранее вычислительного ядра фортран-программы [3].

Многолетний опыт использования подобных программ для проведения научных исследований, а также сопоставление результатов моделирования с натурными испытаниями, при которых погрешность по току не превышала 11 % [4, 5], позволяют утверждать, что результаты комплексного математического моделирования с высокой степенью точности и достоверности воспроизводят процессы в реальных энергетических объектах. Поэтому КПК с жесткой структурой ОЭО можно рассматривать как эталон, с которым можно сравнивать результаты моделирования таких же электроэнергетических объектов, но выполненных в других системах моделирования, например в MatLab-Simulink.

Для гибкой модели ОЭО набор элементов неограничен. Она реализуется в СДМ MatLab-Simulink, в состав которой входит пакет расширения SimPowerSystems (SPS), ориентированный на имитационное моделирование электротехнических устройств. В более поздних версиях СДМ MatLab-Simulink данный пакет называется Simscape Power Systems.

В СДМ MatLab-Simulink принципиально изменен характер требований к математическому обеспечению и управлению всем ходом вычислительного процесса. Математическая модель представляется в виде структурной схемы и не требует написания кода программы из-за наличия библиотеки готовых программ, используемых для решения отдельных прикладных задач [6]. Это особенно важно для задач инженерной направленности, когда требуется самостоятельно смоделировать фрагмент энергосистемы, не углубляясь в тонкости математического описания самих элементов. При этом тщательно подобранные демонстрационные примеры пакета SPS создают ощущение простоты использования библиотечных блоков, однако отклонение параметров от заданных «по умолчанию» часто приводит к неправильному функционированию модели. Поэтому очень важен этап подготовки исходных данных для моделей элементов ОЭО и исследуемого режима.

Кроме того, в стандартных библиотеках SPS присутствуют не все необходимые модели электрооборудования. Например, отсутствует модель ТТ, а для модели силового трансформатора и некоторых других блоков не указаны методики расчета их параметров. При этом именно моделированию трансформаторов тока, как элементов, сигналы которых непосредственно воздействуют на входные цепи защиты, следует уделять особое внимание.

Неточное задание параметров в любом блоке структурной схемы приводит к снижению достоверности результатов моделирования, несмотря на то, что все модели, входящие в данный пакет, проверены в лабораториях канадского производителя электроэнергии – компании Hydro-Québec, где подтверждена адекватность их реализации и математического описания [7]. Поэтому результаты, получаемые от КПК, реализованных в СДМ MatLab-Simulink с использованием блоков SPS, необходимо сопоставить с результатами от других КПК, принятых за эталонные, а также с натурными испытаниями. Если достигается высокое совпадение результатов от разных источников, это свидетельствует о том, что модели, разработанные в Simulink-SimPowerSystems, адекватно функционируют и могут быть использованы для построения других аналогичных систем, структура которых отличается от эталонной. В качестве примера рассмотрим реализацию испытательных комплексов с жесткой и гибкой структурами ОЭО для проверки работоспособности цифровых токовых защит линий.

**Компьютерный программный комплекс
с жесткой структурой обобщенного электроэнергетического объекта
для исследования работоспособности
токовых цифровых защит линий электропередачи**

Обобщенный электроэнергетический объект содержит математическое описание защищаемой линии, ее источников питания и измерительных

трансформаторов, а также смежных элементов, оказывающих заметное количественное и качественное влияние на характер протекания аварийных и послеаварийных режимов [8]. Математическое описание стационарных элементов расчетной схемы включает в общем случае две группы уравнений:

- дифференциальные уравнения – это уравнения равновесия ЭДС и уравнения баланса токов в узлах расчетной схемы с емкостями;
- алгебраические уравнения – это уравнения баланса токов в узлах без емкостей, а также уравнения баланса МДС в контурах магнитопроводов и характеристики намагничивания.

Основными результатами работы КПК являются мгновенные значения вторичных токов ТТ в цепи защищаемой линии, т. е. входные сигналы испытываемой защиты. Рассматриваемый КПК разработан в системе объектно-ориентированного программирования Delphi. Для него была создана программа-оболочка (рис. 2) с использованием расчетного модифицированного фортрановского модуля, которая с помощью интерактивного графического интерфейса позволяет активизировать окна ввода и редактирования исходных данных отдельных элементов расчетной схемы, осуществлять выбор линии, места и вида замыкания, изменять параметры расчетного режима и выполнять расчет заданного режима линии. Результаты расчета КПК в виде числовых последовательностей значений вторичных токов ТТ записываются во внешний файл результатов и могут быть считаны внешним программным обеспечением.

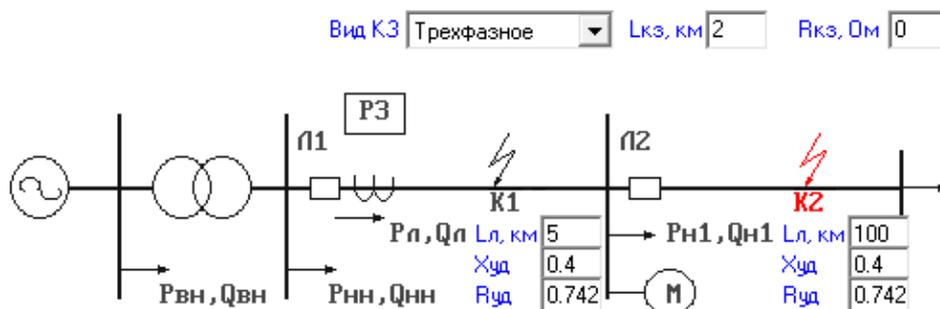


Рис. 2. Интерактивный графический интерфейс компьютерного программного комплекса

Fig. 2. PC-based software package interactive graphical interface

Компьютерный испытательный комплекс с гибкой структурой обобщенного электроэнергетического объекта для исследования работоспособности токовых цифровых защит линий электропередачи

В соответствии с рис. 2 в СДМ MatLab из блоков пакетов Simulink и SPS созданы модель ОЭО и модель цифровой токовой защиты линии Л1 (рис. 3) [8]. Несомненным достоинством Simulink-SimPowerSystems является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования.

Например, первичную часть энергосистемы можно выполнить с использованием имитационных блоков SPS, а ЦУРЗ – с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм работы, а не его электрическую схему.

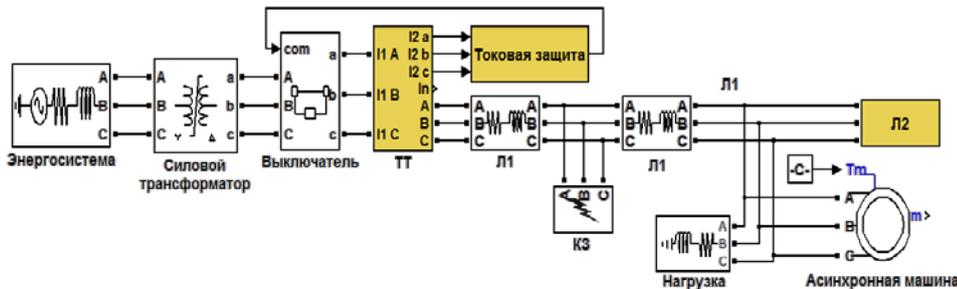


Рис. 3. Компьютерный испытательный комплекс в системе динамического моделирования MatLab-Simulink-SimPowerSystems

Рис. 3. PC-based test set implementation using MatLab-Simulink-SimPowerSystems environment

Математические модели электроэнергетических объектов представляются библиотечными блоками пакета SPS, определение большинства параметров которых обычно не вызывает затруднений. Однако практически в каждом библиотечном блоке присутствует несколько ключевых параметров, требующих дополнительных расчетов для правильного функционирования модели. Далее в статье приведены основные блоки, из которых формируется модель распределительной сети с указанием особенностей расчета их параметров.

Энергосистема моделируется блоком 3-Phase Source (трехфазный источник напряжения) из библиотеки SPS. К основным параметрам, требующим дополнительного расчета, относятся: собственное сопротивление источника R_s (source resistance), Ом, и собственная индуктивность источника L_s (source inductance), Гн. Индуктивность питающей системы L_s может быть определена по заданному току короткого замыкания $I_k^{(3)}$ на шинах узла нагрузки напряжением $U_{ном}$, на котором производятся испытания:

$$L_s = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}I_k^{(3)}\omega_0},$$

где ω_0 – номинальная угловая частота.

Если задана мощность системы S_s , ее относительное сопротивление X_* и напряжение U_s , то индуктивность системы

$$L_s = X_* \frac{U_s^2}{S_s \omega_0}.$$

Активное сопротивление можно определить, исходя из среднего значения постоянной времени затухания аperiodической составляющей ($T_s = 0,05$) токов короткого замыкания (КЗ): $R_s \cong 20L_s$.

Силовой трансформатор. Стандартная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора Three-Phase Transformer (Two Windings) из библиотеки SPS построена на основе трех однофазных трансформаторов. Методика расчета модели подробно рассмотрена в [9]. В табл. 1 приведены выражения для расчета в относительных единицах (о. е.) параметров модели силового трансформатора со схемой соединения обмоток $Y/\Delta-11$, в которой используются только каталожные данные силового трансформатора: $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность силового трансформатора (ВА); $P_{\text{к}}$ – мощность потерь короткого замыкания (Вт); $U_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания (%); P_0 – мощность потерь холостого хода (Вт); I_0 – ток холостого хода (%).

Таблица 1

Формулы для расчета параметров модели трансформатора
Formulas for transformer model parameters calculation

Параметр	Значение, о. е.
Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора	$R_{1(\text{oe})} = R_{2(\text{oe})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{\text{к}}}{S_{\text{ном}}}$
Индуктивность первичной и вторичной обмоток трансформатора	$L_{1(\text{oe})} = L_{2(\text{oe})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{к}}}{100}$
Активное сопротивление ветви намагничивания	$R_{m(\text{oe})} = \frac{S_{\text{ном}}}{P_0}$
Индуктивность ветви намагничивания	$L_{m(\text{oe})} \approx \frac{100}{I_0}$

Линии электропередачи Л1 и Л2 (блок 3-Phase Series RLC Branch – трехфазная последовательная RLC-цепь). Защищаемая линия характеризуется длиной $L_{\text{л}}$, удельными активным $r_{\text{уд}}$ и реактивным $x_{\text{уд}}$ сопротивлениями:

$$R_{\text{л}} = r_{\text{уд}} L_{\text{л}}; \quad L_{\text{л}} = x_{\text{уд}} L_{\text{л}} / \omega_0.$$

Нагрузка (блок 3-Phase Series RLC Load). Стационарные нагрузки задаются активными (Three-Phase Active Power) и реактивными (Three-Phase Inductive Reactive Power) мощностями.

Асинхронная машина (блок Asynchronous Machine SI Units). Подробный расчет параметров асинхронной машины изложен в [10]. Кроме того, в окне задания параметров можно выбрать готовую модель (Preset Model) машины из каталога, в котором указаны следующие параметры: мощность в л. с. (HP), напряжение, частота сети и частота вращения в об/мин (PRM). Для того чтобы начать расчет схемы, содержащей электрические машины, с установившегося режима, предварительно необходимо инициализировать схему с помощью графического интерфейса пользователя Powergui.

Выключатель (блок 3-Phase Breaker). Управление им может производиться внешним входным сигналом (1/0 – включить/отключить).

КЗ (блок 3-Phase Fault). Моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю.

Трехфазная группа ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом». Поскольку библиотечный блок ТТ в библиотеке SPS отсутствует, то из стандартных блоков Simulink на основании тех же уравнений, что и для жесткой модели, была создана и отлажена упрощенная модель ТТ со вторичным номинальным током 5 А, вторичной обмоткой класса точности 10Р и усредненной характеристикой намагничивания стали магнитопровода. Все геометрические параметры, необходимые для моделирования ТТ, рассчитываются по его паспортным данным [11]. Система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, в общем случае принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dB_{mj}}{dt} = \frac{83,34 \cdot [(0,0004I_{\text{НОМ}} + R_{\text{H}j})i_{2j} + R_0i_0]}{K_{\text{НОМ}}(0,0004I_{\text{НОМ}} + R_{\text{НОМ}j})}, & j = A, B, C; \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{\text{НОМ}}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{\text{НОМ}}H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}, \end{cases}$$

где $I_{\text{НОМ}}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{\text{НОМ}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{\text{НОМ}}$ – номинальное активное сопротивление вторичной нагрузки ТТ; R_{H} – действительное активное сопротивление вторичной нагрузки ТТ; R_0 – активное сопротивление нулевого провода; i_0 – мгновенное значение тока, протекающего в нулевом проводе ТТ; $B_m = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; i_1, i_2 – мгновенные значения первичного и вторичного токов ТТ.

При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, рекомендуется использовать следующие методы решения дифференциальных уравнений: ode23t (метод трапеций с интерполяцией) и ode23tb (неявный метод Рунге – Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем), которые дают наилучшие результаты по быстродействию [6, 10].

Для сопоставления результатов моделирования ОЭО с жесткой и гибкой структурами было смоделировано трехфазное КЗ в начале линии ЛП, причем параметры моделей, изображенных на рис. 2 и 3, задавались идентичными.

Осциллограммы вторичного тока ТТ фазы А приведены на рис. 4, из которого видно, что имеет место близкое совпадение (расхождение результатов моделирования не более 1–3 %). Это подтверждает возможность использования СДМ MatLab-Simulink для реализации КПК, формирующих входные воздействия для ЦУРЗ.

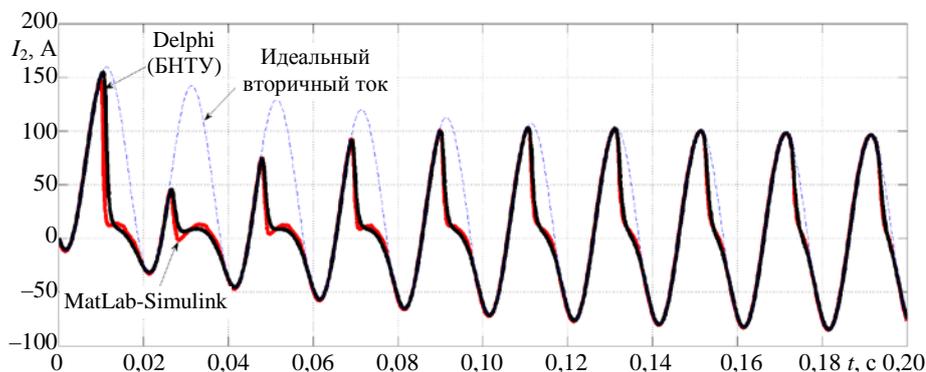


Рис. 4. Осциллограммы вторичного тока фазы А для двух моделей трансформаторов тока: красная линия – в системе динамического моделирования MatLab-Simulink; черная линия – в компьютерном программном комплексе, представленном на рис. 2

Fig. 4. A-phase secondary current waveforms from the different current transformers (CT) models: red – CT model in MatLab-Simulink; black – CT model in PC-based software package represented in fig. 2

Моделирование цифровой токовой защиты

По степени достоверности модели ЦУРЗ можно классифицировать на:

- детализированную модель, включающую в себя подробное математическое описание всех узлов ЦУРЗ. Такая модель может быть построена только производителем устройства;
- обобщенную модель, действующую подобно реальному устройству, но с учетом принятых допущений.

В основу построения обобщенной модели токовой защиты (рис. 3, блок **Токовая защита**) положена модель цифрового измерительного органа тока (ИОТ), реализация которого для фазы А библиотечными блоками Simulink представлена на рис. 5.

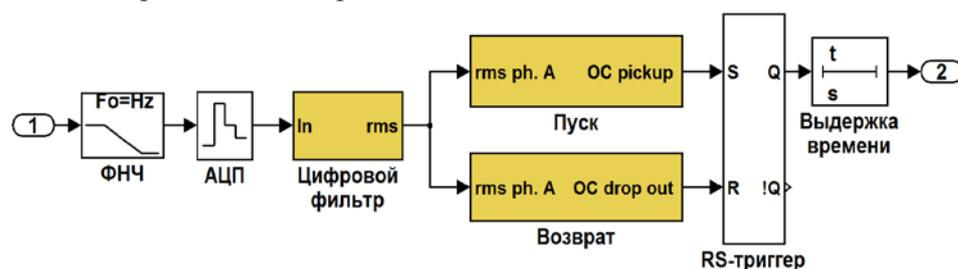


Рис. 5. Структура модели цифрового измерительного органа тока для фазы А

Fig. 5. The structure of the model of a digital current measuring element for A-phase

Фильтр нижних частот (ФНЧ) 2-го порядка представляется блоком 2nd-Order Filter. Назначение данного аналогового фильтра заключается в подавлении спектральных компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации $f_d = f_0 N$, где N – число выборок за период основной частоты $f_0 = 50$ Гц. Таким образом, для основной гармоники граничная частота $f_g = 25N$ должна быть подавлена как минимум на порядок,

т. е. коэффициент передачи K на этой частоте должен быть меньше 0,1. Данное условие позволяет из выражения для амплитудно-частотной характеристики звена 2-го порядка выбрать частоту среза f_c ФНЧ

$$f_c = f_g \sqrt{K} = 25N\sqrt{K}.$$

При аппроксимации частотной характеристики ФНЧ по Баттерворту с параметром затухания $\zeta = 0,5\sqrt{2}$ длительность переходного процесса составляет $t_n \approx \frac{3}{f_c \zeta}$.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (блок Zero-Order Hold) осуществляет преобразование выходного непрерывного сигнала блока ФНЧ в цифровую последовательность дискретных значений. В качестве параметров блока указывается число выборок N сигнала за период промышленной частоты.

Цифровой фильтр 1-й гармоники содержит цифровой фильтр (ЦФ), предназначенный для вычисления действующего значения основной гармоники сигнала, содержащего аperiodическую составляющую и высшие гармоники. Реализация ЦФ основана на использовании дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и может быть представлена:

- библиотечным блоком Discrete Fourier (в качестве параметров указываются частота основной гармоники, номер выделяемой гармоники и период дискретизации сигнала);
- библиотечным блоком Digital Filter, параметрами которого являются предварительно рассчитанные коэффициенты для синусной и косинусной ортогональных составляющих сигнала основной частоты [12].

В практике построения алгоритмов функционирования современных цифровых токовых защит наиболее широко используется косинусный фильтр [13], коэффициенты которого A_{cn} определяются по действительной (косинусной) части ДПФ

$$A_{cn} = \frac{2}{N} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right),$$

где $n = 1 \dots N$ – целое число, соответствующее номеру выборки; k – номер выделяемой гармоники.

Тогда косинусная ортогональная составляющая сигнала y_n , являющаяся выходным сигналом блока Digital Filter, рассчитывается из выражения

$$u_n = \sum_{n=0}^{N-1} y_n A_{cn}.$$

Наследуя все преимущества ДПФ, косинусный фильтр практически нечувствителен к аperiodической составляющей в контролируемом сигнале.

Для вычисления второй (синусной) ортогональной составляющей по известной первой можно использовать две выборки – текущую u_n и предыдущую u_{n-1} , зафиксированные через период дискретизации. Тогда амплитуду сигнала можно определить по выражению

$$U_{\max, kn} = \frac{\sqrt{u_n^2 + u_{n-1}^2 - 2u_n u_{n-1} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}}{\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}. \quad (1)$$

Однако при отклонении частоты f контролируемого сигнала от номинальной f_0 определение его амплитуды по (1) сопровождается погрешностью, не превышающей величины:

$$E_{\max} \approx |150 - 3f|, \%$$

Для надежного функционирования ИОТ необходимо, чтобы условие его срабатывания (возврата) выполнялось в течение времени, равного трем-пяти последовательным выборкам контролируемого сигнала. Эти условия проверяются в составных блоках **Пуск** и **Возврат**, реализованных с помощью блоков Simulink. Если условия пуска (возврата) выполняются (не выполняются), то на выходе соответствующего блока формируются логические сигналы 1 (0). Сигнал с выхода блока **Пуск** поступает на S -вход (установить), а сигнал с выхода блока **Возврат** – на R -вход (сбросить) **RS-триггера** (библиотечный блок S-R Flip-Flop). Прямой выход триггера Q подключается к органу блока **Выдержка времени** (библиотечный блок Discrete On/Off Delay), который начинает отсчет выдержки времени (при условии ее задания), если на его входе присутствует логическая 1. Такое условие возникает тогда, когда контролируемый сигнал превышает уставку срабатывания. Если это условие будет выполняться в течение всей выдержки времени, то на выходе блока **Выдержка времени** установится логическая 1, являющаяся признаком срабатывания токовой защиты в контролируемой фазе. Если за время отсчета выдержки времени сигнал станет меньше уставки срабатывания, то ИОТ вернется в исходное состояние, на выходе триггера установится логический 0 и срабатывание защиты не произойдет.

Тестирование цифровых защит с помощью аппаратно-программных испытательных комплексов

Если сигналы, смоделированные КПК, предназначены для проверки работоспособности реального ЦУРЗ, то такой комплекс будем называть аппаратно-программным испытательным комплексом (АПИК). Испытание ЦУРЗ с помощью АПИК может проводиться одним из двух способов: в режиме замкнутого контура (closed-loop) или в режиме разомкнутого контура (open-loop).

Тестирование в режиме замкнутого контура подразумевает наличие обратной связи между функционирующей в режиме реального времени моделью ОЭО и испытуемым ЦУРЗ. Модель ОЭО воспроизводится в режиме реального времени на программно-аппаратном моделирующем комплексе. Аппаратная часть данных комплексов обычно содержит многопроцессорную вычислительную систему и различные платы ввода-вывода аналоговой и дискретной информации, управляемые программной частью. В качестве последней используется специализированное программное обеспечение (ПО), реализующее человеко-машинный интерфейс и редактор модели ОЭО. Аппаратная часть данных комплексов генерирует низковольтные аналоговые сигналы, которые усиливаются и подаются на соответствующие входы ЦУРЗ. Выходные реле испытываемого ЦУРЗ запрограммированы на замыкание по факту срабатывания тестируемой защитной функции. Они подключаются к соответствующим платам ввода дискретной информации моделирующего комплекса, чем обеспечивается воздействие на изменение топологии модели ЭС при работе защиты. Таким образом формируется замкнутый контур тестирования, когда каждый объект, включенный в контур, может воздействовать на другой объект, причем все это осуществляется в режиме реального времени, т. е. максимально приближено к тому, как это происходит в действительности [1].

Наиболее известные моделирующие комплексы в режиме реального времени – RTDS [14] и eMEGAsim [15]. Их основными недостатками являются чрезмерно высокая стоимость, занимаемое пространство и, как следствие, малая мобильность.

Тестирование в режиме разомкнутого контура – это физическое воспроизведение заранее полученных цифровых осциллограмм с помощью проверочной установки, к аналоговым выходам которой подключены аналоговые входы тока и (или) напряжения испытуемого ЦУРЗ. Управление ПУ обычно осуществляется при помощи ПК с установленным на нем специализированным ПО производителя проверочной установки. Программное обеспечение отвечает за запуск или останов тестирования, конфигурирование проверочной установки, выбор программы тестирования, просмотр, анализ, а также выбор аварийных осциллограмм для дальнейшего их воспроизведения. Таким образом, ПУ в течение времени воспроизведения аварийной осциллограммы отображает ОЭО и протекающие в нем переходные процессы в режиме реального времени. Тестирование в режиме разомкнутого контура является эффективным методом проверки устройств защиты в случае, если не требуется проверка взаимодействия устройств релейной защиты (РЗ) между собой.

Как следует из приведенного описания, тестирование в режиме разомкнутого контура предъявляет существенно меньшие требования к составу АПИК. Для его реализации необходима проверочная установка, управляемая ПК, к которой подключается испытуемое ЦУРЗ. Персональный компьютер подключается к ПУ и используется как управляющий компьютер, с помощью которого осуществляются следующие функции: моделиро-

вание ОЭО, преобразование результатов моделирования исследуемых аварийных режимов ОЭО в унифицированный формат цифровых осциллограмм COMTRADE [16] и загрузка информации из COMTRADE-файла в проверочную установку для дальнейшего ее физического воспроизведения.

В качестве ПУ широко используются устройства австрийского производителя Omicron. Неотъемлемой частью проверочной установки типа Omicron CMC 356 является ПО, которое обеспечивает ее управление и настройку, визуализацию полученных результатов, автоматизацию процессов тестирования и прочие полезные функции. В состав ПО также входят специализированные программы, обеспечивающие выбор, воспроизведение и просмотр заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE – TransPlay и TransView соответственно.

В набор ПО для ПУ Omicron CMC 356 также входят специализированные модули моделирования ОЭО – NetSim, RelaySimTest и RelayLabTest. Все они обладают схожими возможностями и графическими интерфейсами пользователя и напрямую осуществляют контроль ПУ. Основным недостатком данных программ является ограниченный и малодокументированный набор математических моделей силового оборудования, что не позволяет судить об адекватности их реализации и математического описания и в полной мере моделировать сложные режимы и топологии ЭС. Также не предусмотрена возможность создания пользовательских моделей силового оборудования.

Предлагаемый АПИК, представленный на рис. 6, позволяет избежать указанных недостатков и ограничений, присущих тестированию в режиме разомкнутого контура. Моделирование ОЭО проводится с помощью рассмотренного выше КПК с гибкой структурой, реализованного в MatLab-Simulink-SimPowerSystems.

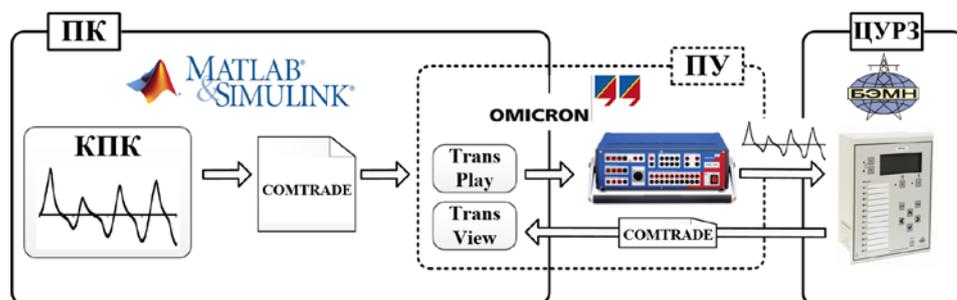


Рис. 6. Аппаратно-программный испытательный комплекс

Рис. 6. A hardware-software based test set

В качестве объекта исследования выбрана максимальная токовая защита (МТЗ) мгновенного действия, входящая в состав цифрового устройства защиты типа МР 801. Подача тестовых воздействий к ЦУРЗ осуществлялась в режиме разомкнутого контура.

Микропроцессорное устройство МР 801 производства ОАО «Бел-электромонтажналадка» является современным цифровым устройством релейной защиты и предназначено для защиты двух- и трехмоточных силовых трансформаторов. В нем реализованы основные токовые защиты трансформаторов: дифференциальная токовая отсечка без торможения, дифференциальная токовая защита с торможением, а также направленная/ненаправленная МТЗ и др.

В качестве входных воздействий использовались сигналы вторичного тока ТТ. Полученные в результате моделирования сигналы вторичного тока ТТ преобразовывались в формат COMTRADE и далее воспроизводились с помощью ПУ типа Omicron CMC 356, к

аналоговым выходам которой подключены аналоговые входы тока испытуемого ЦУРЗ (рис. 7). Управление проверочной установкой осуществлялось при помощи ПК с установленным на нем специализированным ПО TransPlay, обеспечивающим выбор и воспроизведение заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE.

После подачи в устройство МР 801 каждого тестового воздействия осуществлялось сохранение записей его аварийного регистратора, в которых зафиксированы время срабатывания испытуемой токовой защиты и форма подводимых тестовых воздействий. Анализ записей аварийного регистратора осуществлялся при помощи специализированного ПО TransView (рис. 8). Было сформировано 18 тестовых воздействий, которые отражали наиболее характерные формы вторичного тока ТТ при КЗ в ЭС.

Проведенные эксперименты позволили обнаружить некоторые особенности функционирования МТЗ в составе реле МР 801, которые не проявлялись при гармонических тестовых воздействиях. Так, при наличии в токе повреждения аperiodической составляющей, когда ТТ входит в глубокое насыщение, кривая вторичного тока в первые несколько периодов после короткого замыкания оказывается значительно искаженной, ее амплитуда, а следовательно, и вычисляемое цифровым фильтром действующее значение – существенно занижены по сравнению с истинным значением, что приводит к затягиванию срабатывания реле. Нужно отметить, что данная особенность характерна не только для реле МР 801, но и для реле других производителей.



Рис. 7. Аппаратно-программный испытательный комплекс для проверки работоспособности цифрового реле МР 801

Fig. 7. The hardware-software based set for the MP 801 digital relay protection device testing

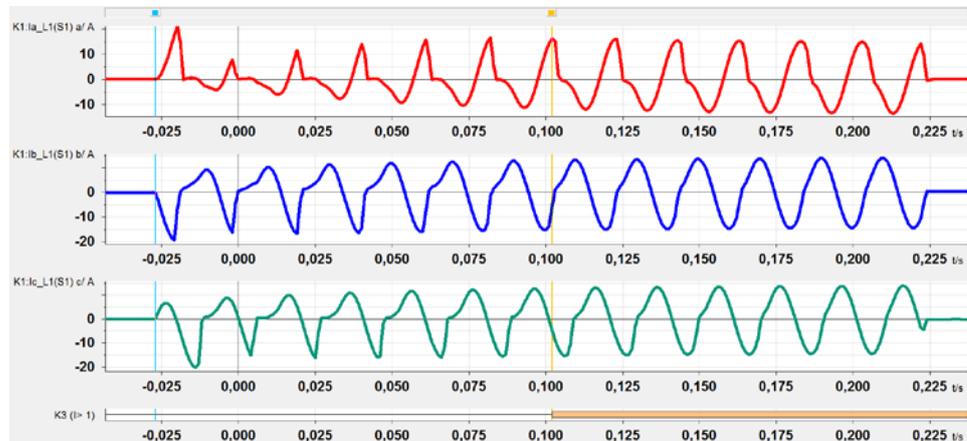


Рис. 8. Визуальная интерпретация COMTRADE-файла аварийной осциллограммы цифрового устройства релейной защиты MP 801 (программное обеспечение для просмотра – TransView)

Fig. 8. Visual interpretation of the emergency waveform COMTRADE-file from the MP 801 digital relay protection device (TransView software being used for visualization)

Параллельно с испытанием МТЗ в составе реального устройства MP 801 была испытана модель МТЗ мгновенного действия, реализованная на основе модели рассмотренного выше цифрового ИОТ (рис. 5), для чего значение параметра блока **Выдержка времени** было установлено равным 0. Параметры модели – такие как частота дискретизации, тип используемого ЦФ, частота среза и порядок аналогового ФНЧ, длительность программного цикла – в точности повторяли параметры МТЗ реле MP 801. Подача тестовых воздействий в модель ЦУРЗ и регистрация времени его срабатывания осуществлялись непосредственно в КИК, реализованном в СДМ MatLab-Simulink-SimPowerSystems.

В результате проведенных испытаний установлено, что модель МТЗ срабатывает в среднем на 8 % быстрее своего реального прототипа. Данное расхождение объясняется невозможностью полноценного учета в модели всех особенностей реализации конкретного устройства. Следует отметить, что при синусоидальных тестовых воздействиях, в отличие от использованных, процентное расхождение по времени срабатывания значительно уменьшается.

Указанные незначительные отличия в функционировании обобщенной модели цифрового реле и реального устройства позволяют рекомендовать на начальной стадии разработки новых ЦУРЗ отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов, а применять более дешевые и безопасные компьютерные испытательные комплексы.

ВЫВОДЫ

1. Система динамического моделирования MatLab-Simulink позволяет создавать с минимальными затратами времени компьютерные програм-

мные комплексы для испытания моделей цифровых защит электроустановок, а также формировать для проверяемых устройств защиты электрооборудования тестовые воздействия, отличающиеся от реальных сигналов на приемлемую для инженерных расчетов величину.

2. Разработаны компьютерный программный комплекс и аппаратно-программный испытательный комплекс с использованием проверочной установки типа СМС 356 фирмы Omicron, предназначенные для проверки работоспособности цифровых токовых защит и их моделей в рабочих и аварийных режимах.

3. Сопоставление результатов испытаний модели токовой защиты с помощью компьютерного программного комплекса и реального устройства защиты посредством аппаратно-программного испытательного комплекса показывает, что они отличаются не более чем на 8 %.

4. На стадии разработки новых цифровых устройств защиты можно отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов и проводить испытания методом вычислительного эксперимента с помощью компьютерных программных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нудельман, Г. С. Применение технологий моделирования в развитии инновационных направлений электроэнергетики / Г. С. Нудельман, А. А. Наволочный, О. А. Онисова // Релейщик. 2014. № 2. С. 16–19.
2. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
3. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. Минск: БНТУ, 2013. 226 с. ISBN 978-985-550-236-5.
4. Validation of Mathematical Model of Differential Protection / F. Romanyuk [et al.] // Przegląd Electrotechniczny. 2014. Vol. 90, No 3. P. 187–190.
5. Ломан, М. С. Микропроцессорная защита силовых понижающих трансформаторов / М. С. Ломан. Минск: Беларус. нац. техн. ун-т, 2015. 25 с.
6. Дэбни, Дж. Б. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
7. SimPowerSystems. User's Guide. The MathWorks, Inc. 2012. 411 p.
8. Совершенствование математических моделей элементов распределительных сетей для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 11-05) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. Минск, 2013. 116 с. № ГР 20110999.
9. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 1. С. 12–24.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
11. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 23–38.
12. Comparative Assessment of Digital Filters for Microprocessor-Based Relay Protection / F. Romaniuk [et al.] // Przegląd Electrotechniczny. 2016. Vol. 92, No 7. P. 128–131.
13. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.

14. A Real Time Digital Simulator for Testing Relays / P. G. McLaren [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 1992. Vol. 7, No 1. P. 207–213.
15. Development of Dynamic Test Cases in OPAL-RT Real-Time Power System Simulator / S. K. Singh [et al.] // Power Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National. 2014. P. 1–6.
16. IEEE Standard. Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems: IEEE Std C37.111–1999. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999. 55 p.

Поступила 02.02.2017 Подписана в печать 05.04.2017 Опубликована онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Nudel'man G. S., Navolochnyi A. A., Onisova O. A. (2014) Application of Modeling Technologies to the Innovative Development of Electric Power Engineering. *Relishchik* [Protection Engineer], (2), 16–19 (in Russian).
2. Romaniuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YuNITI Publ. 174 (in Russian).
3. Novash V. I., Romaniuk F. A. (2013) *Mathematical Modeling of Switching Modes in Electrical Systems with Transformers*. Minsk, Belarusian National Technical University. 226 (in Russian).
4. Romanyuk F., Novash I., Loman M., Węgierek P., Szrot M. (2014) Validation of Mathematical Model of Differential Protection. *Przeegląd Electrotechniczny*, 90 (3), 187–190. DOI: 10.12915/pe.2014.03.42.
5. Loman M. S. (2015) *Microprocessor Protection of Power-Down Transformers*. Minsk, Belarusian National Technical University. 25. (in Russian).
6. Dabney J. B., Harman T. L. (2003) *Mastering Simulink 4*. New Jersey, Prentice Hall (Rus. ed.: *Simulink 4. Sekrety Masterstva*. Moscow, BINOM: Laboratory of Knowledge. 403).
7. *SimPowerSystems. User's Guide*. The MathWorks, Inc. 2012. 411.
8. Novash I. V. head (2013) *Improvement of Mathematical Models of the Elements of the Distribution Network to Explore New Principles of Implementation of Microprocessor-Based Protection*. Research Work Report (a final one, according to SB 11-05). Minsk, BNTU. 116. SR No 20110999 (in Russian, unpublished).
9. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) Three-Phase Transformer Parameters Calculation Considering the Core Saturation for the MatLab-Simulink Transformer Model. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 12–24 (in Russian).
10. Chernykh I. V. (2008) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press; St.-Petersburg, Piter. 288 (in Russian).
11. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).
12. Romaniuk F., Rumiantsev V., Novash I., Rumiantsev Yu., Boiko O. (2016) Comparative Assessment of Digital Filters for Microprocessor-Based Relay Protection. *Przeegląd Electrotechniczny*, 92 (7), 128–131. DOI: 10.15199/48.2016.07.28.
13. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 59 (5), 397–417 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
14. McLaren P. G., Kuffel R., Wierckx R., Giesbrecht J., Arendt L. (1992) A Real Time Digital Simulator for Testing Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7 (1), 207–213. DOI: 10.1109/61.108909.
15. Singh S. K., Padhy B. P., Chakrabarti S., Singh S. N., Kolwalkar A., Kelapure S. M. (2014) Development of Dynamic Test Cases in OPAL-RT Real-Time Power System Simulator. *Power Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National*, 1–6. DOI: 10.1109/NPSC.2014.7103856.
16. IEEE Std C37.111–1999. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems. New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1999. 55.

Received: 2 February 2017

Accepted: 5 April 2017

Published online: 28 July 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319

УДК 621.316.37.064.1

Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании

И. И. Сергей¹⁾, Е. Г. Пономаренко¹⁾, Я. В. Потачиц¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Интенсивность электродинамического действия токов короткого замыкания (КЗ) на гибкие проводники воздушных линий зависит от величины токов КЗ. Ввод новых мощностей неизбежно сопровождается ростом токов КЗ в узлах энергосистемы, поэтому необходимость ограничения пиков тяжений, возникающих при КЗ, на определенном этапе развития энергосистемы может приобрести особую актуальность. При токах КЗ более 40 кА механические усилия и смещения проводов могут оказывать решающее влияние на конструктивное выполнение гибкой ошиновки как с одиночными проводами, так и с расщепленными фазами. В связи с этим возникла необходимость разработки и использования новых конструктивных элементов, повышающих электродинамическую стойкость гибких шин открытых распределительных устройств. Одним из таких элементов является демпфер тяжения. Демпфер устанавливается между порталом и гирляндой изоляторов и ограничивает передачу нежелательных усилий на порталы при коротких замыканиях. Разработан численный метод расчета динамики гибких проводников распределительных устройств и воздушных линий при коротком замыкании с учетом влияния демпферов тяжения. Данный метод был использован для модификации компьютерной программы расчета электродинамической стойкости. С помощью компьютерной программы показано, что установка демпфера тяжения позволяет срезать пики тяжений провода при коротком замыкании в начальной стадии движения проводников. Однако в пролетах большой длины после срабатывания демпфера возможно появление новых всплесков тяжения, обусловленных резкой остановкой провода.

Ключевые слова: энергетика, электродинамическая стойкость, демпфер тяжения

Для цитирования: Сергей, И. И. Оценка эффективности устройства ограничения тяжений проводов при коротком замыкании / И. И. Сергей, Е. Г. Пономаренко, Я. В. Потачиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 309–319
DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319

Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit

I. I. Sergey¹⁾, E. G. Panamarenka¹⁾, Ya. V. Potachits¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The intensity of the electrodynamic action of currents of a short circuit on the flexible conductors of overhead lines depends on the magnitude of currents of short-circuit. The commis-

Адрес для переписки

Пономаренко Евгений Геннадьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-63
ponomarenkoeg@bntu.by

Address for correspondence

Panamarenka Evgeniy G.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-63
ponomarenkoeg@bntu.by

sioning of new capacities is inevitably accompanied by an increase in short circuit currents in the nodes of the grid, so the need to limit peaks of tension arising in a short-circuit can acquire a special relevance at a certain stage of development of the power system. At short circuit currents over 40 kA the mechanical force and displacement of the wires can have a decisive influence on the structural performance of flexible bus as of single wires as well as of split phases. In this regard there is a need for the development and use of new structural elements enhancing electrodynamic stability of flexible busbars of outdoor switchgear. One such element is a tension damper. The damper is installed between the portal and the insulator string and limits the transmission of undesirable forces on the portals in a short circuit. The numerical method of calculation of dynamics of flexible wires of switchgear and overhead lines in a short-circuit taking into account influence of a tension damper has been developed. This method was used for modification of the computer program of calculation of electrodynamic stability. With the aid of the computer program it was demonstrated that the installation of the tension damper makes it possible to cut off peaks of the tension of wire in a short circuit at the initial stage of movement of the conductors. However, in spans of a great length after the actuation of the damper the occurrence of new bursts of tension is possible due to the sudden stop of the wire.

Keywords: power engineering, electrodynamic stability, damper of tension

For citation: Sergey I. I., Panamarenka E. G., Potachits Ya. V. (2017) Evaluation of the Efficiency of the Device for Limiting Tension of the Wire in a Short Circuit. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 309–319. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-309-319 (in Russian)

Введение

Электродинамическое действие больших токов короткого замыкания вызывает колебания гибких проводников со значительной амплитудой, что приводит к возрастанию тяжения проводников и сопровождается ударными динамическими нагрузками, действующими на провода, изоляционные и опорные конструкции воздушных линий (ВЛ) и распределительных устройств (РУ). Такие нагрузки могут вызвать нарушение механической прочности элементов ВЛ и РУ. По условию электродинамической стойкости максимальные тяжения проводов при КЗ не должны превышать их допустимых значений [1]. Допустимые тяжения определяются пределом механической прочности проводов, изоляционных и опорных конструкций.

Интенсивность электродинамического действия токов КЗ на гибкие проводники ВЛ зависит от величины токов КЗ. Ввод новых мощностей неизбежно сопровождается ростом токов КЗ в узлах энергосистемы, поэтому необходимость ограничения пиков тяжений, возникающих при КЗ, на определенном этапе развития энергосистемы может приобрести особую актуальность. Необходимость ограничения максимальных тяжений проводов при КЗ подтверждается уже появившимися публикациями патентов на ограничители тяжения [2] и предложениями фирм – производителей этих устройств [3].

Основная часть

В материалах фирмы Israel Electric Corporation [1] описан патент на ограничитель тяжений (демпфер), который, по утверждению авторов, эффективно ограничивает (на 20 % и более) пики тяжений проводов при КЗ.

Демпфер тяжений устанавливается между траверсой опоры (портала) и гирляндой изоляторов и ограничивает передачу нежелательных усилий на опорные конструкции при КЗ. Конструкция демпфера и принципиаль-

ная схема стадий его работы представлены на рис. 1 [2]. Существуют и другие модификации демпферов тяжения. Например, в [3] описано устройство контроля натяжения провода, которое отличается от конструкции на рис. 1 наличием ограничителя хода.

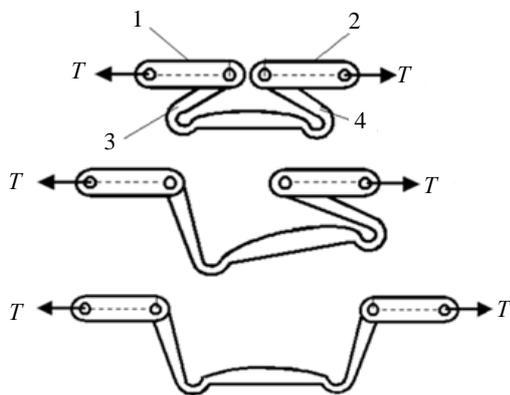


Рис. 1. Принципиальная схема работы демпфера тяжения

Fig. 1. The schematic diagram of operation of the damper of tension

Как видно из рис. 1, под действием натяжения провода за счет пластической деформации происходят разгибание демпфера в месте соединения звена 3 с основанием демпфера и поворот звена 3 относительно оси шарнирного крепления к звену 1. Звенья 2 и 4 при этом находятся в исходном положении за счет их большей жесткости. После достижения предельного положения звеном 3 угол между ним и звеном 1 фиксируется и в дальнейшем не меняется. На заключительном этапе работы демпфера происходит поворот звеньев 2 и 4 аналогично звеньям 1 и 3.

Производители устройств для контроля натяжения провода (демпферов) рекомендуют также использование этих устройств для снижения статических нагрузок от гололеда, налипания снега, поваленных деревьев [3]. В данном случае снижение нагрузки при срабатывании демпфера происходит плавно и не сопряжено с колебаниями проводников. Устройства зарекомендовали себя как простые и надежные в эксплуатации средства защиты линий от повышенных механических напряжений.

В случае же КЗ увеличение нагрузки на опоры происходит из-за колебаний проводников с большой амплитудой. Работа демпфера в таких условиях еще не изучена, и эффективность его применения при КЗ требует дополнительной оценки. Поэтому задачей исследования являлась оценка возможности применения демпферов для ограничения максимальных тяжений гибких проводов при КЗ. Для решения указанной задачи была составлена упрощенная расчетная схема ограничителя тяжений, в которой он представлен пружиной с жесткостью C_x , соответствующей жесткости демпфера (рис. 2).

Расчетная схема фрагмента пролета с гибкими проводниками, в котором установлен демпфер тяжения, представлена на рис. 3.

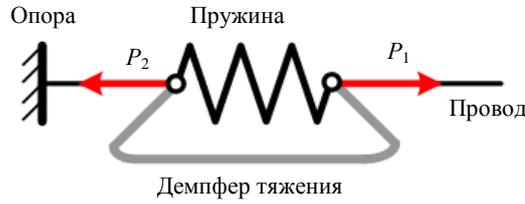


Рис. 2. Расчетная схема для математического моделирования динамики демпфера (P_1, P_2 – силы, действующие на демпфер тяжения)

Fig. 2. The settlement scheme for mathematical modelling of dynamics of the damper (P_1, P_2 – forces operating on the damper of tension)

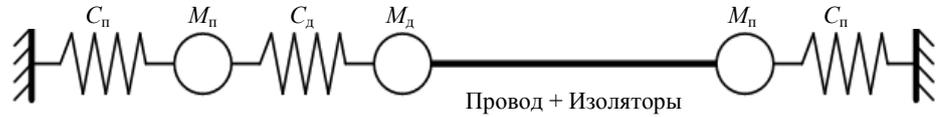


Рис. 3. Расчетная схема фрагмента пролета с гибкими проводниками и демпфером:
 $C_{п}$ – упругая жесткость портала; $C_{д}$ – упругая жесткость демпфера;
 $M_{п}$ – приведенная масса портала; $M_{д}$ – масса демпфера

Fig. 3. The settlement scheme of a fragment of a span with flexible conductors and the damper:
 $C_{п}$ – elastic stiffness of the portal; $C_{д}$ – elastic stiffness of the damper;
 $M_{п}$ – the specified mass of the portal; $M_{д}$ – mass of the damper

На основе схемы, представленной на рис. 3, составлена математическая модель расчета. В ней проводники и натяжные гирлянды изоляторов (при их наличии) представляются гибкими упругими нитями, для которых уравнения их движения при КЗ записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(T \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} \right) + \bar{P} = \rho \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t^2} \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где S – дуговая координата по длине провода, м; t – время, с; \bar{R} – радиус-вектор, определяющий пространственное положение проводов, м; T – модуль тяжения, Н; \bar{P} – вектор суммарного усилия, действующего на единицу длины провода, Н; ρ – масса единицы длины провода (или гирлянд изоляторов), кг/м.

Математическое описание динамики порталов и демпфера тяжения при КЗ производится обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями первого порядка

$$M_{д} \frac{d^2 x}{dt^2} + C_x x + f_{д} \frac{dx}{dt} = T_{дин}, \quad (2)$$

где C_x – линейная упругая жесткость демпфера, Н/м; x – координата вдоль пролета, м; $f_{д}$ – линейная вязкостная жесткость демпфера, кг/с; $T_{дин}$ – мгновенное значение тяжения провода, Н.

Как показано в [4], демпфирующие свойства элементов токоведущих конструкций в целом позволяют заметно снизить максимальные тяжения проводов. Однако упругие деформации элементов пролета могут приводить к увеличению его длины, а соответственно к увеличению провеса проводов и недопустимому сближению или даже схлестыванию фазных проводников между собой. Поэтому выбор оптимальных параметров демпферов тяжений является задачей исследования. Жесткость демпфера C_x должна быть меньше по величине, чем упругая жесткость провода или портала, которые служат верхней границей искомой жесткости ограничителя тяжений.

Совместное решение (1) и (2) позволяет оценить влияние упругой податливости демпфера на величину тяжений и возможное уменьшение междуфазных расстояний в процессе колебаний проводников. С помощью разработанной математической модели проведена оценка возможности применения демпфера для уменьшения пиков тяжений.

Система уравнений (1) и (2) решается численным методом, использование которого применительно к гибким токоведущим конструкциям обособовано в [4] и [5]. Разработанный численный алгоритм расчета динамики проводников с учетом демпфера тяжений был применен для модификации компьютерной программы LINEDYS+ [6]. С ее помощью для подтверждения эффективности использования демпфера тяжений проведены расчеты при КЗ для типового пролета открытого распределительного устройства (ОРУ) 110 кВ длиной 27 м, результаты которых представлены на рис. 4, 5.

Как видно из рис. 4, установка демпферов позволяет уменьшить пик тяжения при отклонении проводников $T_{2\max}$ на 13 % и пик при падении $T_{3\max}$ на 24 %.

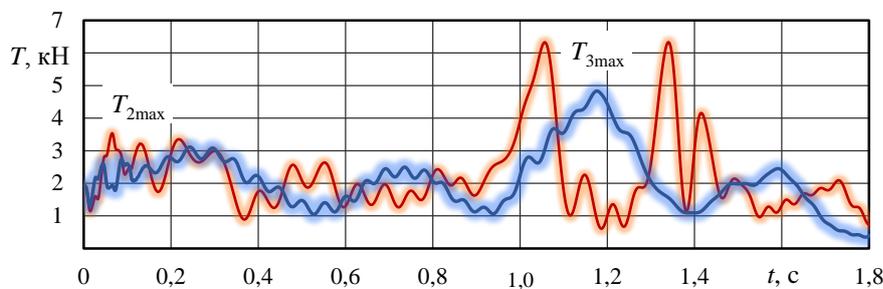


Рис. 4. Тяжения в проводниках при коротких замыканиях:

— жесткое крепление проводов; — с демпфером

Fig. 4. Tension in the conductors in a short-circuit:

— rigid attachment of wires; — with the damper

В то же время срабатывание демпфера тяжений сопровождается увеличением размаха горизонтальных колебаний проводников в обе стороны от их начального положения $y_{1\max} + y_{2\max}$, что может привести к недопустимому сближению проводников соседних фаз. В расчетном случае (рис. 5) увеличение размаха колебаний составило 7 % и сближение соседних проводников не превысило допустимых значений.

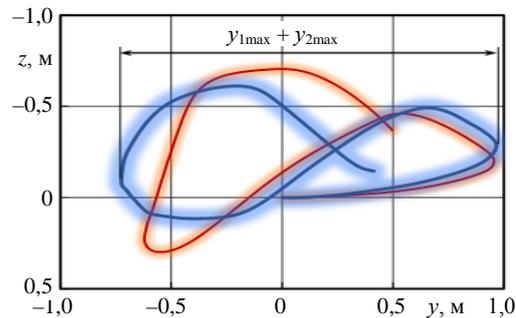


Рис. 5. Траектория движения проводов:

— жесткое крепление проводов; — с демпфером

Fig. 5. Trajectories of the movement of wires:

— rigid attachment of wires; — with the damper

Подобные результаты имеют место для других классов напряжения, длины и марки провода. Тяжения в проводах и размах их колебаний в итоге будут определяться жесткостью установленного демпфера C_x . Жесткость демпфера, таким образом, должна иметь некоторое оптимальное значение, при котором существенно уменьшаются динамические тяжения и в то же время отклонения не превысят допустимых значений. Для определения оптимума C_x был проведен ряд расчетов для типовых пролетов РУ 110–220 кВ в различных режимах КЗ с учетом начальных условий. Расчеты выполнены при продолжительности КЗ, равной 0,1 с, в расчете на срабатывание основной быстродействующей защиты без выдержки времени.

Расчетную жесткость демпфера тяжения принимали в диапазоне $(1-100) \cdot 10^3$ даН/м. За ориентир брали измеренную жесткость portalной конструкции в габаритах ОРУ 110 кВ в опыте LABORELEC, равную $64 \cdot 10^3$ даН/м [7]. В указанном диапазоне произвели расчет максимальных тяжений проводников при КЗ на стадии их отталкивания T_{2max} и падения T_{3max} , результаты которого представлены на рис. 6. Из графика видно, что с повышением жесткости демпфера увеличиваются и максимальные тяжения. Уровень тяжений на стадии падения провода несколько выше, чем на стадии отталкивания.

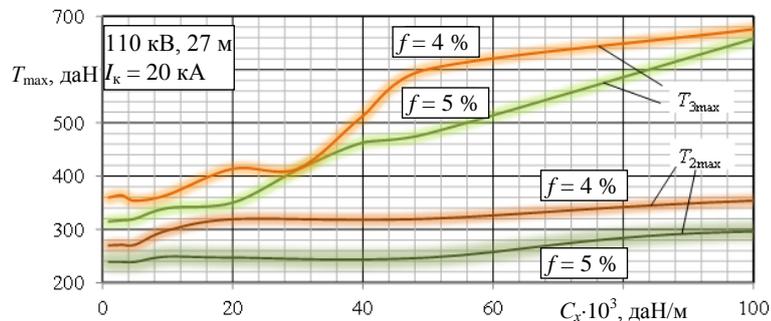


Рис. 6. Тяжения T_{2max} при коротком замыкании

Fig. 6. Tension T_{2max} in a short-circuit

Анализ расчетных диаграмм тяжений показывает, что с уменьшением жесткости демпфера усиливается эффект среза пиков тяжений. Однако, если говорить об электродинамической стойкости в целом, необходимо учесть еще один показатель – минимальные междуфазные расстояния a_{\min} при колебаниях проводников [8].

В выбранном диапазоне изменения C_x произвели расчет сближений проводников при КЗ. Зависимости максимальных сближений на стадии свободного движения от параметра C_x представлены на рис. 7. Из графиков видно, что зависимость $a_{\min} = f(C_x)$ имеет максимум при изменении C_x в диапазоне $(15-35) \cdot 10^3$ даН/м. Эти значения могут служить ориентиром для выбора рабочей жесткости демпфера, так как максимальные тяжения в данном диапазоне еще не достигли своих пиков и составляют только 50–75 % от аналогичных величин при жестком креплении проводников (без демпфера).

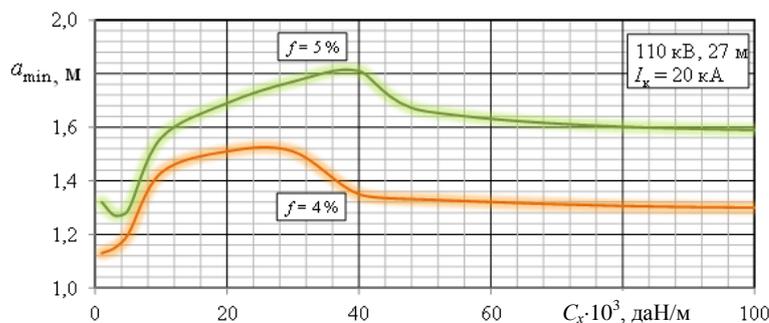


Рис. 7. Минимальные междуфазные расстояния a_{\min} при коротком замыкании
Fig. 7. The minimum interphase distances a_{\min} in a short-circuit

На основе проведенного вычислительного эксперимента можно сделать вывод, что при выборе параметров демпфера необходимо учитывать его влияние как на срез тяжений, так и на сближение проводников. Выбор демпфера с минимальной жесткостью не обеспечивает автоматически электродинамическую стойкость пролета [9].

В процессе исследований модель демпфера была усовершенствована с учетом реальных характеристик его срабатывания. Использовали модель пружины, которая в нормальном режиме работы (до КЗ) имеет большую жесткость и практически не деформируется. После возникновения КЗ проводники начинают двигаться под воздействием электродинамических усилий, при этом возрастают тяжения и нагрузки на опоры и демпферы. При достижении нагрузки в $(1,6-2,1)f$ [3] (f – номинальная нагрузка демпфера по справочным данным) происходит срабатывание демпфера. В алгоритме программы этот момент учитывается резким уменьшением жесткости пружины, что позволяет демпферу начать удлинение. Если в процессе КЗ удлинение D достигает конечной величины, обусловленной конструкцией устройства, то пружина снова приобретает большую жесткость и процесс деформации практически прекращается.

К компьютерной программе LINEDYS+ создана база данных с параметрами устройств контроля натяжения, что позволяет путем проведения серий расчетов подобрать оптимальное решение по выбору параметров демпфера. Выполнено исследование эффективности применения демпферов для ограничения пиков тяжений при коротком замыкании. Для этого в экспериментальном пролете 330 кВ проведены расчеты динамики гибких проводников при КЗ с демпфером и без него. Результаты расчета представлены на рис. 8, 9.

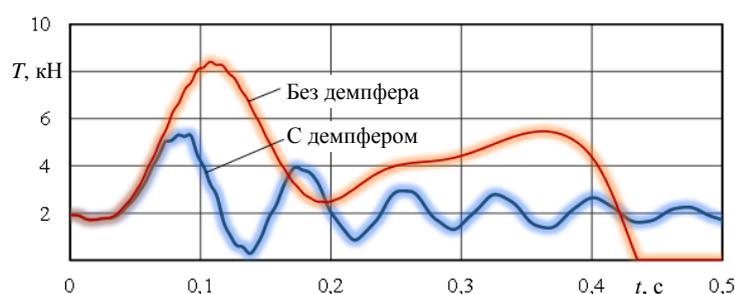


Рис. 8. Расчет тяжения в пролете с установкой демпфера и без него: пролет 330 кВ; длина пролета 48 м; ток короткого замыкания 30 кА

Fig. 8. Calculation of a tension in a span with installation of the damper and without the damper: the span is of 330 kV; the span length is 48 m; the current of a short-circuit is 30 kA

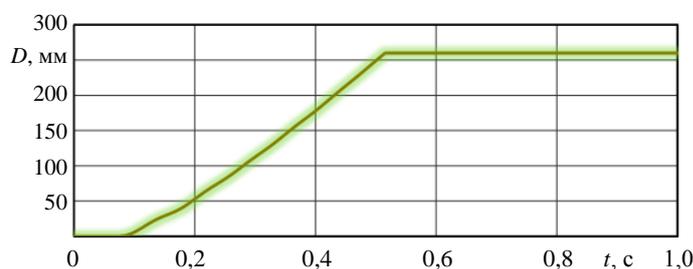


Рис. 9. Удлинение демпфера при коротком замыкании

Fig. 9. Lengthening of the damper in a short-circuit

На рис. 8 представлена диаграмма тяжений в пролете с установленным демпфером и без него. Результаты эксперимента показали, что пик тяжений при установке демпфера уменьшился на 40 % для данного пролета при токе КЗ, равном 30 кА. Процесс удлинения демпфера до своей предельной величины $D = 260$ мм отражен на рис. 9. Демпфер сработал при достижении тяжения в 5 кН, что близко к величине $2f$ для выбранного устройства, и дальнейший рост тяжения практически прекратился (рис. 9).

Анализируя приведенные диаграммы, можно сделать вывод об эффективности демпфера при КЗ и возможности снижения с его помощью первого пика тяжения, а соответственно и нагрузок на опорные конструкции. Также для типового пролета ОРУ 330 кВ длиной 48 м были выполнены исследования влияния параметра D на величину среза первого пика тяжения.

В расчетах использовали демпферы с удлинением D , равным 260, 390 и 520 мм [3]. Ток КЗ изменяли в пределах 20–50 кА. Во всех расчетных случаях срез тяжений был одинаков, что объясняется достижением пика тяжения еще до момента удлинения демпфера до предельной величины. Как видно из рис. 10, пик тяжения (около 5 кН) достигается за 0,09 с, а максимальное удлинение демпфера – через 0,50 с. Это характерно для сравнительно коротких пролетов. Следовательно, в таких случаях достаточно установки демпфера с наименьшим удлинением D .

Расчеты в пролете длиной 150 м (характерно для линий электропередачи) с установкой более мощного демпфера при $D = 260$ (390; 520) мм показали аналогичные результаты, как и для короткого пролета. Однако в длинных пролетах после достижения максимальной вытяжки демпфера возникает дополнительный пик тяжения $T_{\text{ост}}$ от резкой остановки движения провода (рис. 10). Момент возникновения $T_{\text{ост}}$ соответствует моменту максимального удлинения демпфера. Чем более массивным будет провод и чем больше ток КЗ, тем дополнительный пик тяжения больше.

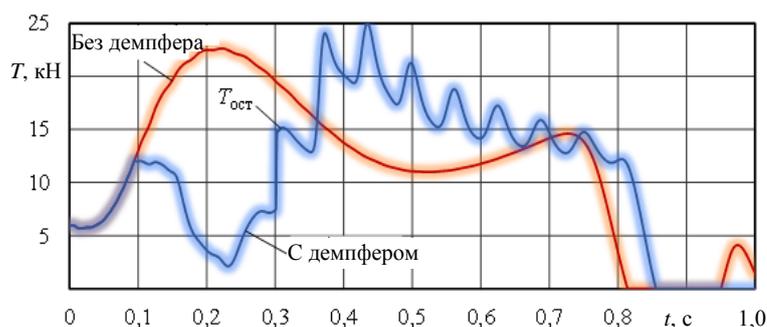


Рис. 10. Дополнительный пик тяжения $T_{\text{ост}}$ после срабатывания демпфера в пролете длиной 150 м

Fig. 10. Additional peak of a tension $T_{\text{ост}}$ after the operation of the damper in a span of 150 m long

Из рис. 10 видно, что пик тяжения от резкой остановки $T_{\text{ост}}$ провода приводит к появлению колебаний провода с повышенной частотой и в итоге вызывает всплески тяжения, которых при отсутствии демпфера не наблюдалось. Для анализа влияния рабочей длины демпфера D на величину дополнительного пика $T_{\text{ост}}$ и последующих пиков тяжений провели расчеты в пролете длиной 150 м при $D = 260$ (390; 520) мм (рис. 11). Из диаграммы на рис. 11 видно, что изменение длины D практически не влияет на величину максимумов тяжения T_{max} , а лишь изменяет момент их наступления.

Как отмечалось выше, при использовании демпфера будет изменяться не только тяжение, но и провес провода в пролете из-за удлинения демпфера, что предположительно должно привести к уменьшению междуфазных расстояний $a_{\text{ф-ф}}$ при движении гибких проводников.

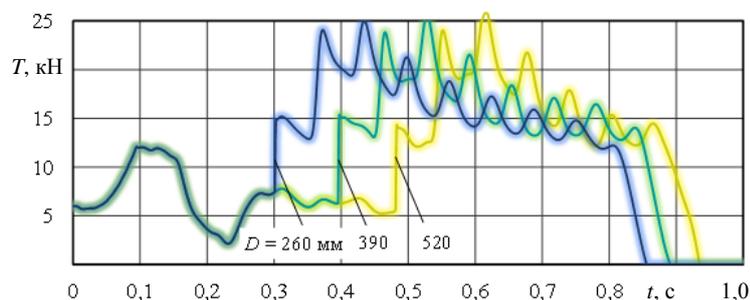


Рис. 11. Зависимость тяжения от удлинения демпфера

Fig. 11. Dependence of a tension on lengthening of the damper

Для оценки влияния удлинения демпфера D на величину $a_{\phi-\phi\min}$ провели расчеты для пролета длиной 48 м при токе КЗ 30 кА, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость междуфазных расстояний $a_{\phi-\phi\min}$ от удлинения демпфера D
Dependence of the interphase distances $a_{\phi-\phi\min}$ on lengthening of the damper D

D , мм	0	260	390	520
$a_{\phi-\phi\min}$, м	1,65	1,26	0	0
T_{\max} , кН	17,2	12,0	10,3	10,3

По информации производителей, установка устройств контроля натяжения (демпферов) в пролетах ОРУ или ЛЭП эффективна как средство снижения статических нагрузок. Однако, анализируя приведенные выше диаграммы и табл. 1, можно сделать вывод, что применение их в качестве демпферов при КЗ не всегда эффективно из-за возможности увеличения тяжений и риска недопустимого сближения проводников [10].

ВЫВОДЫ

1. Разработан численный метод расчета динамики гибких проводников распределительных устройств и воздушных линий при коротком замыкании с учетом влияния демпферов тяжения. Данный метод был применен для модификации компьютерной программы расчета электродинамической стойкости.

2. С помощью компьютерной программы показано, что установка демпфера тяжения позволяет срезать пики тяжений провода при коротком замыкании в начальной стадии движения проводников. Однако в пролетах большой длины после срабатывания демпфера возможно появление новых всплесков тяжения, обусловленных резкой остановкой провода.

3. Согласно расчетам, срабатывание демпфера при коротком замыкании приводит к увеличению провеса проводов и тем самым повышает риск недопустимого сближения проводников соседних фаз.

4. Анализ проведенных исследований показал, что устройства ограничения тяжения не всегда эффективны при коротком замыкании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания: ГОСТ 30323–95. Введ. 01.03.1999. Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 57 с.
2. Flexible Conductor with a Mechanical Device for Short-Circuit Overloading Prevention [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.niivn.dn.ua/prmi.htm>. Дата доступа: 17.02.2015.
3. Защита воздушных распределительных линий от механических перегрузок [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sicame.com.ua/pdf/DAC_OMEGA_2011.pdf. Дата доступа: 02.02.2017.
4. Сергей, И. И. Динамика проводов электроустановок энергосистем при коротких замыканиях: теория и вычислительный эксперимент / И. И. Сергей, М. И. Стрелюк. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 252 с.
5. Пономаренко, Е. Г. Методы расчета и анализ электродинамической стойкости токоведущих конструкций с гибкими проводниками / Е. Г. Пономаренко. Минск, 2010. 151 с.
6. Разработка компьютерной программы расчета и проведение оценки электродинамической стойкости воздушных линий ОАО «МОЭСК» при росте уровней токов КЗ: отчет о НИР (закл.) / БНТУ, рук. И. И. Сергей. Минск, 2013. 73 с. Э-13-01 (962/13 кр).
7. The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open-Air Substations (Rigid or Flexible Bus-Bars). Paris, 1996. 90 p. (Preprint / CIGRE; Brochure No 105. Working Group 23–11, SC 23).
8. Игнатов, В. В. К вопросу о методах ограничений токов короткого замыкания в энергосистеме / В. В. Игнатов, М. Ш. Миерихаймов, А. В. Шунтов // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 5. С. 94–103.
9. Horowitz, S. H. Power System Relaying / S. H. Horowitz, A. G. Phadke, J. K. Niemira. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc., 2014. 400 с.
10. Александров, Г. Н. Движение проводов расщепленной фазы воздушной линии при коротких замыканиях / Г. Н. Александров, И. П. Щеглов, И. Ф. Половой // Электричество. 1980. № 6. С. 12–18.

Поступила 05.04.2017 Подписана в печать 08.06.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. State Standard 30323–95. Short-Circuits in Electroinstallations: Methods of Calculation of Electrodynamical and Thermal Action of Currents of a Short-Circuit. Minsk. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1999. 57 (in Russian).
2. Flexible Conductor with a Mechanical Device for Short-Circuit Overloading Prevention. Available at: <http://www.niivn.dn.ua/prmi.htm> (Accessed 17 February 2015).
3. Protection of Air Overhead Distributive Lines against Mechanical Overloads. Available at: http://sicame.com.ua/pdf/DAC_OMEGA_2011.pdf (Accessed 2 February 2015) (in Russian).
4. Sergey I. I., Strelyuk M. I. (1999) *Dynamics of Wires of Electroinstallations of Power Supply Systems in a Short Circuit: Theory and Computing Experiment*. Minsk, VUZ-Yuniti. 252 (in Russian).
5. Panamarenka E. G. (2010) *Methods of Calculation and the Analysis of Electrodynamical Stability of Current-Carrying Constructions with Flexible Conductors*. Minsk, 151 (in Russian).
6. Sergey I. I. (2013) *Development of the Computer Program of Calculation and Evaluating Electrodynamical Stability of Overhead Lines of the "MOESK" JSC under the Growth of Levels of Short Circuit Currents* (Э-13-01 (962/13 кр)). Minsk, BNTU. 73 (in Russian).
7. CIGRE Study Committee 23 (Substations), Working Group 23–11 (1996). *The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open-Air Substations (Rigid or Flexible Bus-Bars)*. Paris, CIGRE, (105), 90.
8. Ignatov V. V., Mierikhaimov M. Sh., Shuntov A. B. (2009). Towards a Problem of Methods of Restrictions of Currents of a Short-Circuit in a Power Supply System. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering, (5), 94–103 (in Russian).
9. Horowitz S. H., Phadke A. G., Niemira J. K. (2014) *Power System Relaying*. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc. 400. DOI: 10.1002/9780470758786.
10. Alexandrov G. N., Shcheglov I. P., Polovoi I. F. (1980) The Movement of the Split Phase Wires of an Overhead Lines in a Short Circuit. *Elektrichestvo* = Electricity, (6), 12–18 (in Russian).

Received: 5 April 2017

Accepted: 8 June 2017

Published online: 28 July 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333

УДК 621.311.016.1

Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе

Канд. техн. наук, доц. О. И. Александров¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. В статье рассмотрены основные аспекты построения формально-функциональных математических моделей, обеспечивающих систему оперативного разрешения ремонтных заявок в сложной электроэнергетической системе. В соответствии с нормативами ремонтной кампании, ревизии, замены элементов основного оборудования или устройств системной автоматики, включения резервных мощностей, различных переключений и с принятой на практике периодичностью отключений, процесс принятия решения формализуется и автоматизируется в виде задачи составления оптимальных суточных графиков отключений, функционирующей в составе автоматизированной системы диспетчерского управления электроэнергетической системы. Основными проблемами, затрудняющими математическое моделирование процесса принятия решений по оперативным заявкам на ремонт основного электросетевого оборудования электроэнергетической системы, являются необходимость согласованного учета большого количества ограничивающих факторов и показателей эффективности решений; необходимость информационной и алгоритмической взаимосвязи с задачами смежных уровней пространственной, временной и функциональной иерархии; отсутствие разработок по стандартизации информационных структур, позволяющих адекватно отображать процесс поиска решений; вычислительная сложность ряда ограничений задачи оптимизации, подлежащих обязательному учету.

Ключевые слова: энергосистема, ремонтная кампания, коммутационные вариации, суточный график нагрузки, математическая модель, краткосрочное планирование отключений

Для цитирования: Александров, О. И. Дискретизация плана ремонтов основного оборудования в электроэнергетической системе / О. И. Александров // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 320–333. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333

Sampling of the Plan of Repairs of the Main Equipment in the Electrical Power System

O. I. Alexandrov¹⁾

¹⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The main aspects of creation of the formal-and-functional mathematical models supporting a system for prompt resolution of repair requires in a complex electric power system are

Адрес для переписки
Александров Олег Игоревич
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-23-97
sanoleg@mail.ru

Address for correspondence
Alexandrov Oleg I.
Belarusian State
Technological University
13a Sverdlova str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-23-97
sanoleg@mail.ru

considered in the article. In accordance with the standards of repairs, inspections, replacement of elements of the main equipment or devices of a system of automation, inclusion of spare capacity, various switches, as well as with the frequency of outages adopted in practice, the decision-making process is formalized and automated as the problem of scheduling optimal daily schedules of blackouts, functioning as a part of automated system of dispatching management of electric power system. The main problems that hinder mathematical modeling of decision-making concerning operational applications for the repair of the main power equipment of power system are: the need for a coherent account of a large number of limiting factors and indicators of effectiveness of the solutions; the need of information and algorithmic trade-offs with the objectives of adjacent levels of spatial, temporal and functional hierarchy; the lack of developments in the standardization of information structures that adequately reflect the process of finding solutions; the computational complexity of several restrictions of the optimization problem subject to mandatory registration.

Keywords: power supply system, repair campaign, switching variations, daily load schedule, mathematical model, short-term scheduling of shutdowns

For citation: Alexandrov O. I. (2017) Sampling of the Plan of Repairs of the Main Equipment in the Electrical Power System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 320–333. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-320-333 (in Russian)

Введение

Обработка поступающих заявок на проводимые ремонтные отключения основного оборудования энергосистемы относится к наиболее трудоемким, трудно формализуемым задачам диспетчерского управления энергосистемами. Здесь рассматриваются принципы построения математической модели в процессе разрешения оперативных заявок на коммутационные вариации (включение/отключение) основного оборудования энергосистемы [1, 3–5]. В соответствии с нормативами ремонтной кампании, ревизии, замены элементов основного оборудования [2, 6] или устройств системной автоматики, включения резервных мощностей, различных переключений и с принятой на практике периодичностью отключений, процесс принятия указанных решений формализуется и автоматизируется в виде задачи составления оптимальных суточных графиков отключений, функционирующей в составе автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) электроэнергетической системы (ЭЭС). Включение этой задачи в состав АСДУ повышает эффективность суточного планирования режима работы энергосистемы путем принятия оптимальных решений относительно моментов отключений в ремонт оборудования, исходя из требований оптимизации основных показателей экономичности и надежности режимов, а также качества электроэнергии с учетом запрашиваемых сроков ремонтов и основных технологических, режимных и организационно-технологических ограничений.

Постановка задачи

Краткосрочное планирование отключений основного оборудования на первоначальном этапе формирует сбор и обработку информации, содержащейся в заявках нижестоящих подразделений. Каждая заявка имеет определенный ранг (характеристику), в соответствии с которым она рас-

сма­тривается и разрешается лицом, принимающим решение (ЛПР). Ранг зависит от разновидности объекта (воздушная линия (ВЛ), трансформатор, система сборных шин или средства управления) и определяется такими факторами (например, для ВЛ), как: r_1 – заявка аварийная или плановая; r_2 – номинальное напряжение; r_3 – сечение; r_4 – протяженность; r_5 – среднегодовая нагрузка; r_6 – объем трудозатрат; r_7 – продолжительность отключения; r_8 – количество цепей; r_9 – то же сетевых предприятий, обслуживающих данную ВЛ (ремонтируемый участок ВЛ); r_{10} – обеспеченность резервированием; r_{11} – то же трудоресурсами.

Таким образом, приоритет каждой заявки j -го объекта определяется суммарным рангом n параметров

$$R_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} / n,$$

где n – количество параметров, учитываемых для соответствующей разновидности объекта.

Формализация задачи оперативного рассмотрения заявок на ремонт основного оборудования ЭЭС может быть выполнена с помощью двух принципиально различных подходов: сведения к последовательности задач математического программирования (кардинальная оптимизация) либо использования диалога между диспетчером системы и ЛПР при наличии у них непротиворечивой системы предпочтений (ординальная оптимизация).

Подлежащие разрешению заявки классифицируются на две группы:

- 1) заявки, удовлетворение которых практически не влияет на вероятность возникновения недоотпуска электроэнергии потребителям;
- 2) заявки, связанные с увеличением вероятности возникновения недоотпуска электроэнергии [7].

К первой группе относятся заявки на вывод в ремонт: нормально обесточенных резервных систем и секций сборных шин, обходных систем шин; обходных выключателей; нормально отключенных шиносоединительных выключателей, на которых нет АВР; основных систем или секций сборных шин при наличии нормально обесточенных резервных; выключателей присоединений при наличии обходной системы. Ко второй – все остальные заявки на вывод в ремонт основного электросетевого оборудования и ВЛ. Заявки первой группы размещаются в базовой части графика отключений в соответствии с запрашиваемыми сроками.

Поступившие заявки подвергаются ранжированию по доступным периодам ремонта. Для каждой из них в порядке убывания важности определяются доступные периоды ремонта, не имеющие признаков нежелательности с учетом продолжительности: менее суток – доступный период I ранга – предвыходной день; более суток – то же II ранга – связанная двухдневка.

Затем отбирается период, наиболее близкий к просимому времени. После размещения данной заявки соответствующему периоду присваивается одиночный признак нежелательности последующих заявок. Если для оче-

редной заявки среди доступных периодов не окажется ни одного, не отмеченного признаком нежелательности, то среди отмеченных признаком отыскивается период, занятый наименее важной заявкой.

Проверяется, относится ли соответствующая заявка к тем же РЭУ (ПЭС), что и рассматриваемая. Если относится, то данный период считается условно недоступным, если нет – заявка размещается в нем. Этот период отмечается двукратным признаком нежелательности для последующих заявок. Если для очередной заявки все доступные периоды отмечены двукратным признаком нежелательности или доступного периода вообще нет, то доступным считается ближайший к просимому послевыходной день (т. е. доступным периодом III ранга). Задействованный доступный период III ранга снабжается признаком запрета для последующих заявок. Если для очередной заявки все доступные периоды I или II ранга имеют более чем однократный признак нежелательности, а все доступные периоды III ранга – признак запрета, то среди доступных периодов I или II ранга с наименьшей кратностью признака нежелательности отыскиваются периоды, имеющие наименьшее значение ранга r_i . Затем проверяется, не относится ли соответствующая заявка к тому же ТЭО, ПЭС, что и рассматриваемая. При положительном решении берется следующее меньшее значение ранга при той же кратности признака. Если ни один из периодов с той же кратностью не подходит, то по тому же принципу рассматриваются временные интервалы с большей кратностью, и так далее до тех пор, пока заявка не будет размещена. После этого кратность нежелательности соответствующего периода увеличивается на единицу.

Сроки начала ремонтов, заявленных на планируемые сутки, по заявкам второй группы оптимизируются по векторному критерию, включающему в себя следующие скалярные:

1) максимум минимального по участкам сети резерва пропускной способности ремонтных схем основной электрической сети энергосистемы для наиболее неблагоприятного по данному критерию часа суток;

2) минимум максимального по узлам сети отклонения величины напряжения от соответствующего желаемого для данного узла значения в наиболее неблагоприятный по данному критерию час суток;

3) минимум потерь энергии в основной сети за сутки;

4) минимум суммарного ожидаемого недоотпуска электроэнергии в узлах основной сети от аварийных перерывов электроснабжения за сутки;

5) минимум отклонения разрешенного момента начала ремонта от запрашиваемого по заявке с первым в порядке убывания приоритетом;

6) минимум длительности ремонта по заявке с первым приоритетом;

7) критерии 5, 6 для остальных заявок в порядке убывания их приоритетов.

Оптимизация по указанному векторному критерию производится при учете следующих ограничений, которые должны выполняться в каждый час периода планирования, обычно выходящего за пределы планируемых суток при отсутствии случайных аварийных отключений элементов сети:

связности ремонтных схем основной сети; наличия двустороннего питания у заданного множества узлов; отсутствия недоотпуска электроэнергии потребителям; обеспечения требуемого уровня надежности планируемых ремонтных схем; сохранения активных параметров сети, обеспечивающих устойчивый режим ремонтных схем; возможности вывода в ремонт в течение одного часа единиц основного электросетевого оборудования и ВЛ, находящихся в оперативном управлении диспетчера, в количестве не больше заранее заданного допустимого; условий одновременного ремонта единиц основного электросетевого оборудования и ВЛ, находящихся в административно-хозяйственной принадлежности каждого из подразделений энергосистемы, в количестве не больше заранее заданного допустимого для данного подразделения; возможности вмешательства ЛППР в процесс расчета и коррекции составленного графика с учетом изменившихся условий или поступления внеплановой аварийной заявки.

Началу работы алгоритма для оптимизации графика отключений предшествует выполнение таких алгоритмов, как: прогнозирование графиков нагрузок всех узлов основной сети на период планирования; совмещение по запрашиваемым срокам начала и длительности ремонтов заявок на вывод в ремонт участков ВЛ, находящихся в административно-хозяйственной принадлежности двух или более смежных подразделений нижестоящего по отношению к ТЭО уровня.

Общий алгоритм [8, 9] оптимизации представляет собой вычислительный метод целенаправленного поиска оптимальных вариантов решений, обеспечивающий максимально возможное сокращение перебора промежуточных вариантов, не являющихся допустимыми или наиболее предпочтительными [6]. Частные подзадачи, решаемые в процессе поиска оптимальных решений, состоят в вычислении показателей, необходимых для оценки эффективности рассматриваемого варианта решения и в проверке ограничений задачи.

К числу служебных относятся: алгоритмы формирования начального состояния управляемого объекта на момент, предшествующий началу периода планирования; алгоритмы проверки допустимости ранее принятых, но еще не осуществленных решений, влияющих на планируемый суточный режим; алгоритмы организации взаимодействия рассматриваемой задачи с базой данных (БД) и пользователями задачи и т. д.

Формализация задачи принятия решений

Пусть имеется множество заявок на вывод в ремонт основного электросетевого оборудования энергосистемы, принятых к моменту решения задачи составления оптимального суточного графика отключений. Тогда каждая заявка характеризуется следующей информацией:

1) кортежем

$$\alpha_j = (a_j, \bar{t}_j, \bar{\theta}_j, \bar{\beta}_j, \rho_j, \vartheta_j, \chi_j),$$

где a_j – идентификатор элемента; $\bar{t}_j, \bar{\theta}_j$ – запрашиваемые момент и длительность отключения (здесь и в дальнейшем предполагается, что все рас-

смаатриваемые моменты времени отсчитываются от некоторого фиксированного для данной задачи момента начала отсчета); $\beta_j, \rho_j, \vartheta_j, \chi_j$ – булевы переменные, принимающие ненулевые значения при наличии специфических для данного элемента особенностей организации ремонтных работ ($\beta_j = 1$, если допустимо производить ремонтные работы в ночное время суток, на которые приходится момент начала или конца ремонта; $\rho_j = 1$, если допустимо временное включение элемента в работу в ночное время суток; $\vartheta_j = 1$, если недопустимо проведение ремонтных работ в выходные дни; $\chi_j = 1$, если элемент находится в ведении ЦДС;

2) множеством S_j ремонтных схем объектов основной электрической сети (электростанций, подстанций, ВЛ с отпайками), вступающих в силу при выводе в ремонт элемента оборудования a_j , которые либо разрабатываются заранее и утверждаются на длительный период времени, либо действительны только для предстоящего ремонта по данной заявке [10, 11]. При очередном решении задачи суточного планирования отключений из числа всех принятых отбирается множество подлежащих рассмотрению заявок, запрашиваемые моменты открытия которых приходятся на допустимый интервал открытия:

$$A = \left\{ \alpha_j \mid \beta_j \neq 1 \rightarrow \bar{t}_j \in [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta], \beta_j = 1 \rightarrow \bar{t}_j \in [t^{(0)}, t^{(0)} + 24] \right\},$$

где $t^{(0)}$ – принятый на практике момент начала отсчета светлого времени суток, относящийся к планируемому суткам; δ – продолжительность светлого времени суток.

Заявки $a_j \in A$ классифицируются на две группы:

$$A = A' \cup A''; \quad A' \cap A'' = \emptyset,$$

где $A'' = \{ \alpha_j \mid \alpha_j \in A, S_j = \emptyset \}$ – множество заявок на вывод в ремонт нормально отключенных элементов.

Для заявок $\alpha_j \in A''$ в качестве оптимального решения принимается запрашиваемое время

$$t_j^{\text{опт}} = \bar{t}_j.$$

Заявки $\alpha_j \in A'$ распознаются по факту отсутствия соответствующих им ремонтных схем в определенном отношении БД.

Для формирования математической модели принятия решений по заявкам $\alpha_j \in A'$ используется метод согласования общих и иерархически упорядоченных скалярных критериев оптимальности. Для каждой заявки $\alpha_j \in A'$ устанавливается приоритет, причем возможны два режима его задания:

1) для всех $a_j \in A$ при приеме заявки задается степень приоритетности $v \in [0, 1]$, которую можно интерпретировать как значение истинности в непрерывной логике утверждения «заявка a_j является наиболее важной из

принятых». В этом случае для определения приоритетов заявок $\alpha_j \in A'$ проводится их упорядочение

$$\alpha_{j_1}, \alpha_{j_2}, \dots, \alpha_{j_\omega}, \quad \omega = |A'|, \quad (1)$$

такое, что

$$v_{j_k} > v_{j_{k+1}}, \quad k = \overline{1, \omega - 1},$$

после чего приоритеты находятся как

$$\rho(\alpha_{j_k}) = k, \quad k = \overline{1, \omega};$$

2) приоритеты устанавливаются стандартным способом, учитывающим разную степень мобильности элементов по отношению к изменению сроков ремонтов в сравнении с запрашиваемыми. В этом случае упорядочение вида (1) выполняется исходя из условия

$$\bar{\theta}_{j_k} \geq \bar{\theta}_{j_{k+1}}, \quad k = \overline{1, \omega - 1}.$$

Множество U допустимых решений $t = (t_1, t_2, \dots, t_\omega)$ задачи оптимального суточного планирования отключений определяется совокупностью учитываемых ограничений, схемой основной сети ЭЭС на момент $t^{(0)}$ начала планируемых суток, множеством ранее разрешенных заявок, работы по которым к указанному моменту еще не закончены (или даже не начаты), и прогнозируемыми графиками активных и реактивных нагрузок в узлах сети. Исходя из предположения о возможности начала наиболее длительного ремонта среди запрашиваемых в последний момент планируемых суток, можно определить расчетный период планирования

$$T = \left[t^{(0)}, t^{(0)} + \max \left(\delta + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j \neq 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + \delta), 24 + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j = 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + 24) \right) \right], \quad (2)$$

где $\bar{\theta}_j(t_j)$, $\alpha_j \in A'$ – длительность работы по заявке при открытии ее в момент t_j .

Множество U можно представить как объединение двух множеств:

$$U = U' \cup U''; \quad U' = U \setminus U'';$$

$$U'' = \{t \mid \beta_{j_k} \neq 1 \rightarrow t_k \notin [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta);$$

$$\beta_{j_k} = 1 \rightarrow t_k \notin [t^{(0)}, t^{(0)} + 24), \quad k = \overline{1, \omega}\},$$

где U' – множество решений, при которых хотя бы для одной заявки разрешено отключение на ремонт в планируемые сутки; U'' – то же всех тривиальных решений, при которых открытие всех заявок $\alpha_{j_k} \in A'$ в планируемые сутки запрещено.

Перечисленные выше общие критерии оптимальности можно записать в стандартной форме условий оптимальности при $t \in U$

$$F_i(t) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1,4}, \quad (3)$$

где функции $F_i(t)$ вычисляются по исходным целевым функциям $\Phi_i(t)$ указанных критериев:

$$F_1(t) = \Phi_1(t); \quad F_i(t) = 1/\Phi_i(t), \quad i = \overline{2,4}.$$

Важной особенностью задачи, из которой вытекает способ сворачивания всех общих критериев (3) в один скалярный критерий, является то, что каждый из них имеет оптимальное значение при любом тривиальном решении $t \in U$

$$\max_{t \in U} F_i(t) = \max_{t \in U} F_i(t) = F_{i\max}, \quad i = \overline{1,4}.$$

Если принять ради простоты изложения, что дискретизация расчетного периода планирования проведена в целочисленных точках, соответствующих часам суток, то вместо интервала (2) имеем конечную последовательность

$$\overline{T} = (t^{(0)}, t^{(0)} + 1, \dots, t^{(0)} + \lfloor \underline{L} \rfloor) = \overline{t^{(0)}, t^{(0)} + \lfloor \underline{L} \rfloor}, \quad (4)$$

где

$$L = \max \left(\delta + \max_{\alpha_j \in A''} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + \delta), 24 + \max_{\substack{\alpha_j \in A' \\ \beta_j = 1}} \bar{\theta}_j(t^{(0)} + 24) \right).$$

Теперь величины $F_{i\max}$, $i = \overline{1,4}$, могут быть определены простым перебором точек указанной последовательности, а общие критерии оптимальности ставятся в равные условия путем использования скалярного критерия

$$\Phi_0(T) = \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$t \in U, \quad U \subset \overline{T}^{(0)}. \quad (6)$$

Индивидуальные критерии упорядочиваются лексикографически в соответствии с приоритетами заявок и относительной важностью критериев, относящихся к одной заявке:

$$|t_k(t) - \bar{t}_k| \rightarrow \min; \quad \theta_k(t) \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$\Delta W_k(t) \rightarrow \min, \quad k = \overline{1, \omega},$$

где $t_k(t)$, $\theta_k(t)$, $\Delta W_k(t)$ – момент начала ремонта, длительность ремонта и недоотпуск, связанные с решением по заявке, имеющей k -й приоритет.

В дальнейшем $t_k(t)$ будем называть текущим моментом начала заявки $\alpha_{jk} \in A'$, а $\tau_k(t) = t_k(t) + \theta_k(t)$ – текущим моментом конца заявки $\alpha_{jk} \in A'$.

Согласование свернутого общего критерия (3) с индивидуальными критериями (5) проводится на основе метода последовательных уступок, применение которого сводится к тому, что (7) заменяется ограничением

$$\min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq \max_{t \in U} \Phi_0(t) - \frac{\varepsilon}{100}, \quad (8)$$

где ε – максимальный проигрыш, %, допустимый по каждому из скалярных критериев (3) при решении задачи лексикографической оптимизации (8).

Поскольку

$$\max_{t \in U} \Phi_0(t) = \max_{t \in U} \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} = \max_{t \in U} \min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} = 1,$$

то ограничение (8) упрощается к виду

$$\min_{i=1,4} \frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq 1 - \frac{\varepsilon}{100}.$$

Альтернативный подход к учету критериев (3) состоит в их лексикографическом упорядочении и задании индивидуальной уступки по каждому критерию. Тогда составление оптимального суточного графика отключений сводится к решению задачи лексикографической оптимизации, где множество U определяется не только исходными ограничениями задачи, но и дополнительными ограничениями вида

$$\frac{F_i(t)}{F_{i\max}} \geq 1 - \frac{\varepsilon}{100}, \quad i = \overline{1,4}. \quad (9)$$

Дискретизация пространства решений задачи

Если бы не было ограничений и не требовалось учитывать неточности реализации запланированного графика отключений, то задача лексикографической оптимизации (8) решалась бы тривиально

$$t_k = \overline{t}_k, \quad k = \overline{1, \omega}. \quad (10)$$

Поскольку в действительности должны быть учтены ограничения (6), то (9) можно рассматривать лишь как начальное приближение к искомому решению. Кроме того, для надежного исключения при выполнении ремонтных работ случаев совпадения таких отключений, которые в сочетании друг с другом приводят к нарушению ограничений и в оптимальном графике запланированы как не совпадающие во времени, необходимо при решении задачи оптимизации рассматривать как совпадающие те моменты времени, которые разделены промежутком, меньшим, чем некоторая

величина Δt (например, $\Delta t = 1/4$ ч). Поэтому в качестве начальных приближений к искомым оптимальным моментам начала работ по заявкам должны быть приняты интервалы времени

$$t_k = \left\lfloor \overline{t}_k / \Delta t \right\rfloor \Delta t, \quad k = \overline{1, \omega}.$$

Тем самым определяется начальный вид конечной последовательности моментов времени, соответствующих различным дискретным состояниям на протяжении периода планирования. Она представляет собой хронологически упорядоченное множество вида

$$\tilde{T} = \overline{T} \cup \left\{ t_k \mid k = \overline{1, \omega}, t_k \neq \Lambda \right\} \cup \left\{ \tau_k \mid k = \overline{1, \omega}, \tau_k \neq \Lambda \right\} \cup (T_0 \cap T),$$

где T_0 – множество моментов начала и конца заявок на ремонт основного оборудования ЭЭС, разрешенных ранее до составления оптимального суточного графика отключений на планируемые сутки; τ_k – расчетные моменты подлежащих разрешению заявок, соответствующих моментам начала t_k ,

$$\tau_k = t_k + \left\lceil \overline{\theta}_k / \Delta t \right\rceil \Delta t, \quad k = \overline{1, \omega}.$$

В процессе использования алгоритма оптимизации в соответствии с определенными правилами должны вводиться новые различные состояния ЭЭС и исключаться из рассмотрения прежде существовавшие. Если \tilde{T} – последовательность дискретных различных состояний ЭЭС на протяжении периода планирования, имеющаяся в текущий момент оптимизации, то указанные правила состоят в следующем.

1. Пусть $t^{(v-1)}, t^{(v)}, t^{(v+1)} \in \tilde{T}$ – моменты времени, соответствующие последовательным состояниям, и для заявки $\alpha_j \in A'_0$ с очередным приоритетом в текущий момент поиска ее оптимального размещения известно, что состояние $t^{(v-1)}$ недоступно из-за нарушения ограничений и что проверке подлежит положение этой заявки с моментом начала $t_j > t^{(v-1)}$. Тогда если $t^{(v+1)} - t^{(v)} = \Delta t$, то $t_j := t^{(v+1)}$, в противном случае справедливо, что $t^{(v+1)} - t^{(v)} \geq 2\Delta t$, и в качестве момента начала принимается $t_j := t^{(v)} + \Delta t$, т. е. t_j вводится как новое состояние

$$\tilde{T} := T \cup \{ t_j \}. \quad (11)$$

Эти случаи показаны соответственно на рис. 1а, б, где $k \geq 2, k' \geq 1, k'' \geq 1$ и жирной линией отмечен интервал $[t^{(v-1)}, t^{(v)}]$, который, как установлено предшествующей проверкой, недоступен для размещения заявки α_j .

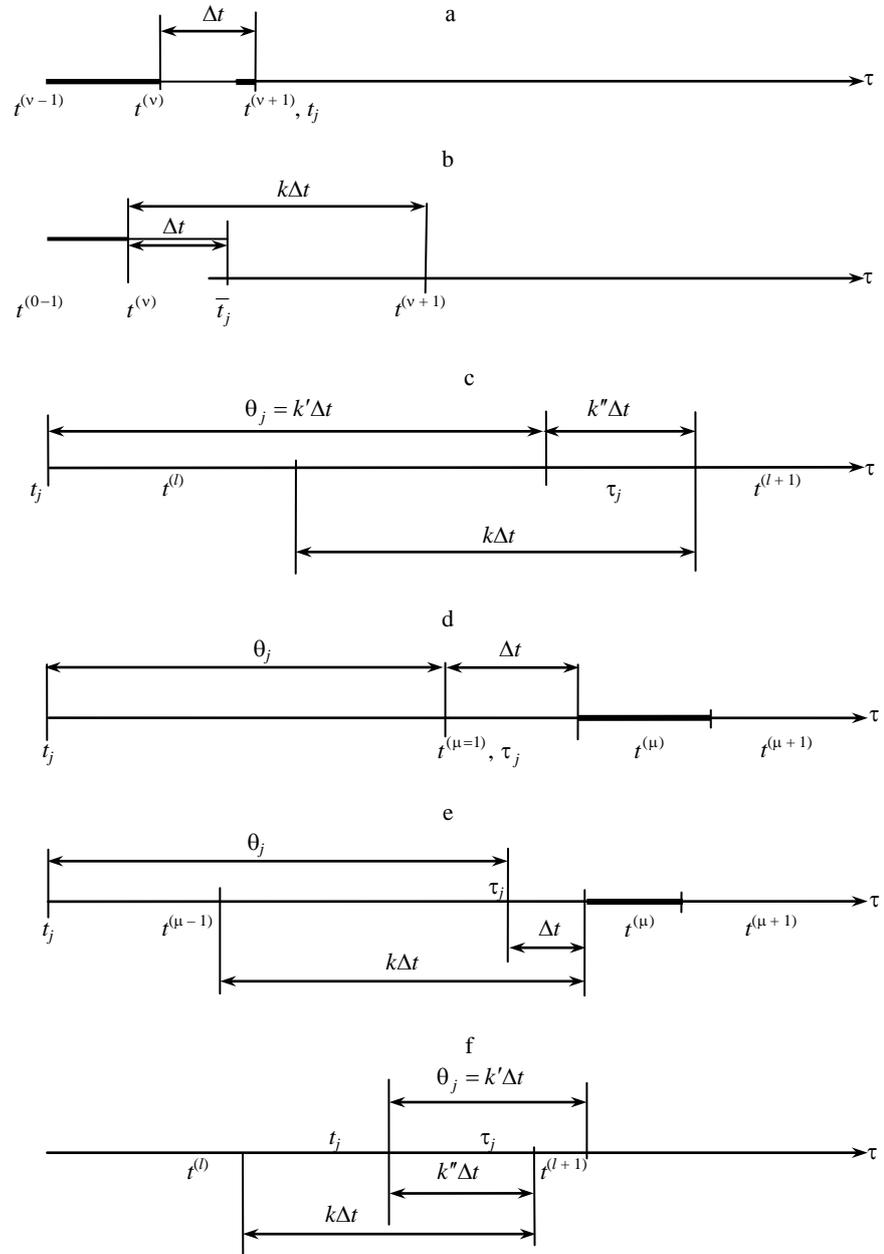


Рис. 1. Схемы, поясняющие введение различных дискретных состояний
Fig. 1. Diagrams illustrating the insertion of distinguishable discrete states

Пусть θ_j – длительность отключения, соответствующая моменту t_j начала заявки. Тогда алгоритм определения θ_j при любом текущем векторе t должен обеспечивать кратность θ_j интервалу Δt , т. е. выполнение условия

$$\theta_j / \Delta t = \lceil \overline{\theta_j / \Delta t} \rceil.$$

Если расчетный момент конца заявки

$$\tau_j = t_j + \theta_j \notin \tilde{T},$$

то вводится новое состояние, соответствующее моменту времени τ_j

$$\tilde{T} := \tilde{T} \cup \{ \tau_j \}. \quad (12)$$

Этот случай проиллюстрирован на рис. 1с.

2. Пусть $t^{(\mu-1)}, t^{(\mu)} \in \tilde{T}$ – последовательные состояния, и для заявки $\alpha_j \in A'$ известно, что состояние $t^{(\mu)}$ недоступно из-за нарушения ограничений и что проверке подлежит положение этой заявки с моментом конца $\tau_j \leq t^{(\mu)}$ (это соответствует сдвигу заявки из предшествующего положения влево). Тогда если $t^{(\mu)} - t^{(\mu-1)} = \Delta t$, то $t_j := t^{(\mu-1)}$, в противном случае справедливо, что $t^{(\mu)} - t^{(\mu-1)} \geq 2\Delta t$, поэтому $\tau_j := t^{(\mu)} - \Delta t$, и \tilde{T} преобразуется по (12). Этот случай показан на рис. 1d, e.

Если θ_j – длительность отключения, соответствующая моменту τ_j конца заявки, и расчетный момент начала

$$t_j = \tau_j - \theta_j \notin \tilde{T},$$

то \tilde{T} преобразуется по (12) (рис. 1f).

Допустимое множество U решений задачи для составления оптимального суточного плана отключений в любой текущий момент процесса оптимизации определяется условиями $t_k \in [t^{(0)}, t^{(0)} + \delta] \cap \tilde{T}$ или $t_k = \Lambda$ для закрываемых заявок, а также набором учитываемых ограничений задачи [10, 11].

Алгоритм решения задачи построен таким образом, что при отказе пользователя от заданных приоритетов они устанавливались бы стандартным способом, учитывающим разную степень мобильности элементов оборудования по отношению к изменениям запрашиваемых сроков ремонтов. С этой точки зрения наиболее оправдано упорядочение заявок по убыванию запрашиваемой длительности ремонта. В части системы управления (руководство ЦДС и административный аппарат энергосистемы) учет человеческого фактора в алгоритме оптимизации сводится к выбору соответствующей математической модели и вычислительного метода. Методика, разработанная на базе данной модели, позволяет получить несколько оптимальных или близких к оптимальному вариантов решения, т. е. графиков отключений для обеспечения возможности выбора окончательного решения на основе интуиции инженера. Как отмечалось выше, это свойство алгоритма обеспечивается применением метода последовательных уступок. Аналогичные свойства имеют алгоритмы, которые могут быть получены на основе метода динамического программирования, если все исходные

критерии оптимальности свернуты тем или иным способом в единый скалярный критерий.

ВЫВОДЫ

1. Предложена математическая модель для описания системы рассматривания оперативных заявок на выполнение коммутационных вариаций в электроэнергетической системе.

2. Простота вычислительного алгоритма и адекватность математической модели принятия решений в наибольшей степени обеспечиваются путем распознавания заявок, разрешение которых практически влияет на надежность и экономичность планируемого суточного режима электроэнергетической системы. Процесс идет путем иерархического упорядочения подлежащих оптимизации заявок, что может быть выполнено на основе показателей мобильности элементов оборудования по отношению к изменению сроков ремонта относительно запрашиваемых либо априорной оценки степени важности заявок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Оптимизация эксплуатационного обслуживания электрических сетей / М. А. Короткевич; под ред. А. В. Бережного. Минск: Наука и техника, 1984. 199 с.
2. Нормы времени на капитальный, текущий ремонт и техническое обслуживание подстанций напряжением 35–500 кВ. М.: Информэнерго, 1984. Ч. 2. 212 с.
3. Коварский, Л. Г. Расчетные основы оптимизации ремонта энергооборудования / Л. Г. Коварский. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-е, 1985. 12 с.
4. Алгоритмизация задачи составления оптимального месячного графика отключений основного электросетевого оборудования энергосистемы / О. И. Александров [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1991. № 7. С. 10–17.
5. Александров, О. И. Формально-функциональная модель выбора вариантов для экспертной системы оперативного рассмотрения ремонтных заявок в АСДУ ЭЭС / О. И. Александров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1993. № 9–10. С. 9–17.
6. Назарычев, А. Н. Методы и модели оптимизации ремонта электрооборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А. Н. Назарычев. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т. 2002. 168 с.
7. Александров, О. И. Алгоритм определения суточного недоотпуска электроэнергии при разрешении ремонтных заявок в ЭЭС / О. И. Александров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 4. С. 3–13.
8. Александров, О. И. Автоматизированный контроль режимных параметров при планировании текущих ремонтных отключений в энергосистеме / О. И. Александров, Д. Г. Горячко // Инженер-механик. 2001. Т. 12, № 3. С. 32–33.
9. Alexandrov, O. I. Algorithm of Decision Making on Operative Requests for Repair Switchings-off of the Main Equipment in an Electric Power System / O. I. Alexandrov, A. F. Muihsen // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2002. No 2. P. 53–60.
10. Alexandrov, O. I. Method for Optimum Planning of Generating Equipment Switching-offs for Repair / O. I. Alexandrov // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2009. No 6. P. 27–39.
11. Александров, О. И. Методы анализа текущих ремонтных отключений основного оборудования в сложной электроэнергетической системе / О. И. Александров, С. В. Домников. Минск: Технопринт, 2001. 260 с.

Поступила 27.02.2017 Подписана в печать 03.05.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Berezhnyi A. V. ed. (1984) *Optimization of Operational Service of Electric Networks*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 199 (in Russian).
2. *Time Rates for Capital, Current Repairs and Maintenance of Substations of 35–500 kV. Vol. 2*. Moscow, Informenergo Publ. 212 (in Russian).
3. Kovarsky L. G. (1985) *Estimated Bases of Optimization of Repair of the Power Equipment*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningr. Office. 12 (in Russian).
4. Alexandrov O. I., Domnikov S. V., Babochkin V. T., Baro Bandia, Orlova V. P. (1991) Algorithmization of a Problem of Drawing up the Optimum Monthly Schedule of Shutdowns of the Capital Network Equipment of a Power Supply System. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (7), 10–17 (in Russian).
5. Alexandrov O. I. (1993) Formal-and-Functional Model of the Choice of Options for the Expert System of Expeditious Consideration of Repair Applications in ASDS EES. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (9–10), 9–17 (in Russian).
6. Nazarychev A. N. (2002). *Methods and Models of Optimization of Repair of Electric Equipment of Power Industry Facilities Taking into Account Technical Condition*. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University. 168 (in Russian).
7. Alexandrov O. I. (1998) Algorithm of Definition of a Daily Inefficient Output of the Electric Power at Permission of Repair Applications in EES. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 3–13 (in Russian).
8. Alexandrov O. I., Goryachko, D. G. (2001). The Automated Control of Regime Parameters when Planning the Current Repair Shutdowns of a Power Supply System. *Inzhener-Mekhanik =The Mechanical Engineer*, 12 (3), 32–33 (in Russian).
9. Alexandrov O. I., Muhsen A. F. (2002) Algorithm of Decision Making on Operative Requests for Repair Switchings-off of the Main Equipment in an Electric Power System. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, (2), 53–60.
10. Alexandrov O. I. (2009) Method for Optimum Planning of Generating Equipment Switching-offs for Repair. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, (6), 27–39.
11. Alexandrov O. I., Domnikov S. V. (2001) *Methods of the Analysis of the Current Repair Shutdowns of the Capital Equipment of a Complex Electrical Power System*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 260 (in Russian).

Received: 27 February 2017

Accepted: 3 May 2017

Published online: 28 July 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-334-340

УДК 517.958:519.6

Приближенное решение одной задачи об электрических колебаниях в проводах с помощью полилогарифмов

П. Г. Ласый¹⁾, И. Н. Мелешко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. В статье рассматривается смешанная задача с однородными краевыми условиями для одномерного однородного волнового уравнения. Такая задача может возникнуть, например, при изучении колебаний силы тока и напряжения в проводнике, по которому проходит электрический ток, и линия свободна от искажения. Решение можно найти методом Фурье в виде тригонометрического ряда. Данное представление имеет только теоретический интерес, поскольку для реального вычисления необходимо, во-первых, находить большое число коэффициентов-интегралов, что само по себе – задача нетривиальная и, во-вторых, практически невозможно провести оценку погрешности вычислений. Предлагается альтернативный способ решения этой задачи, основанный на использовании трансцендентных функций – полилогарифмов, которые представляют собой комплексные степенные ряды специального вида. Точное решение задачи выражается через мнимую часть полилогарифма первого порядка на единичной окружности, а приближенное – через действительную часть дилогарифма. Кроме того, если начальные условия в задаче являются элементарными функциями, то и решение также осуществляется через элементарные функции. Найдена простая и вместе с тем эффективная оценка погрешности приближенного решения задачи. Она не зависит от времени и имеет первый порядок точности относительно шага разбиения отрезка числовой оси, на котором рассматривается задача. Указанная оценка является равномерной относительно переменных задачи – как пространственной, так и временной.

Ключевые слова: электрические колебания, решение задачи, трансцендентные функции, оценка погрешности, полилогарифм

Для цитирования: Ласый, П. Г. Приближенное решение одной задачи об электрических колебаниях в проводах с помощью полилогарифмов / П. Г. Ласый, И. Н. Мелешко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 334–340. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-334-340

Approximate Solution of One Problem on Electrical Oscillations in Wires with the Use of Polylogarithms

P. G. Lasy¹⁾, I. N. Meleshko¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers a mixed problem with homogeneous boundary conditions for one-dimensional homogeneous wave equation. Such a problem can arise, for example, when studying

Адрес для переписки

Ласый Петр Григорьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-82-73
kafvm2@bntu.by

Address for correspondence

Lasy Petr G.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-82-73
kafvm2@bntu.by

oscillations of current and voltage in the conductor through which electric current flows, while the line is free from distortion. The solution can be found with the use of the Fourier method in the form of trigonometric series. This representation is of purely theoretical interest, because the real calculation should be, first, to find a large number of coefficients of the integrals, which in itself is not a trivial task and, second, it is almost impossible to assess the error of the calculations. An alternative way of solving this problem based on the use of transcendental functions i. e. polylogarithms that represent complex power series of a special kind. The exact solution of the problem is expressed through the imaginary part of a polylogarithm of the first order on the single circle and the approximate one – via the real part of the dilogarithm. In addition, if the initial conditions in the problem are elementary functions, then the solution is also computed using elementary functions. A simple and effective error estimate of the approximate solution has been found. It does not depend on time and it has the first-order of accuracy regarding the step of a partitioning segment of the numerical axis on which the problem is considered. This valuation is uniform with respect to the variables of the problem – both spatial and temporal.

Keywords: electric oscillations, solution of the problem, transcendental functions, error estimate, polylogarithm

For citation: Lasy P. G., Meleshko I. N. (2017) Approximate Solution of One Problem on Electrical Oscillations in Wires with the Use of Polylogarithms. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 334–340. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-334-340 (in Russian)

Колебания силы тока и напряжения при прохождении по проводу длиной $l > 0$ электрического тока удовлетворяют телеграфному уравнению

$$\partial_{xx}w = a_0\partial_{tt}w + 2b_0\partial_t w + c_0w, \quad (1)$$

где $w = w(x, t)$ – неизвестная функция переменных $0 \leq x \leq l$ и $t \geq 0$; a_0 , b_0 , c_0 – положительные постоянные [1–5].

Другие приложения уравнения (1) можно найти, например, в [6–8]. После замены в (1) искомой функции по формуле

$$w = e^{\frac{b_0 t}{a_0}} u$$

получим следующее линейное уравнение в частных производных:

$$\partial_{tt}u = a^2\partial_{xx}u + b^2u,$$

$$\text{где } a = \frac{1}{\sqrt{a_0}}; \quad b = \frac{\sqrt{b_0^2 - a_0 c_0}}{a_0}.$$

В линии, свободной от искажения, $b = 0$, и приведенное выше выражение принимает вид

$$\partial_{tt}u = a^2\partial_{xx}u. \quad (2)$$

То есть (2) является одномерным однородным волновым уравнением. Рассмотрим смешанную задачу для (2) с заданными начальными условиями:

$$u(x, 0) = f(x); \quad \partial_t u(x, 0) = F(x); \quad 0 \leq x \leq l \quad (3)$$

и постоянными краевыми условиями, которые для удобства будем считать однородными:

$$u(0,t) = u(l,t) = 0; \quad t \geq 0. \quad (4)$$

Это не является ограничением общности, так как в случае неоднородных условий:

$$u(0,t) = u_0; \quad u(l,t) = u_l; \quad t \geq 0,$$

где u_0, u_l – действительные числа, заменой искомой функции

$$u = v + \frac{u_l - u_0}{l} x + u_0$$

можно свести данную задачу к аналогичной относительно новой неизвестной функции v , но уже с однородными краевыми условиями.

Предположим, что функция $f(x)$ дифференцируема на отрезке $[0, l]$, а ее производная $f'(x)$ удовлетворяет условию Липшица с константой $L_1 > 0$, т. е. для любых $(x_1, x_2) \in [0, l]$ выполняется неравенство

$$|f'(x_1) - f'(x_2)| \leq L_1 |x_1 - x_2|.$$

Функцию $F(x)$ на отрезке $[0, l]$ будем предполагать кусочно-монотонной и удовлетворяющей условию Липшица с константой $L_2 > 0$. Тогда существует единственно обобщенное решение смешанной задачи (2)–(4) [1, с. 144], которое представляется рядом

$$u(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \sin k\omega x, \quad (5)$$

где $\omega = \pi/l$, и при любом натуральном k :

$$a_k = \frac{2}{l} \int_0^l f(s) \sin k\omega s \, ds; \quad b_k = \frac{2}{k\pi a} \int_0^l F(s) \sin k\omega s \, ds. \quad (6)$$

Формула (5) малоприспособна для приближенного вычисления решения, так как необходимо находить коэффициенты-интегралы (6), да и не существует общей оценки погрешности. Авторы статьи предлагают более эффективный метод решения этой задачи, основанный на использовании полилогарифмов [9, 10]. В дальнейшем будем использовать мнимую часть полилогарифма первого порядка на единичной окружности

$$N^1(x) = \operatorname{Im} L^1(e^{ix}) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin kx}{k}, \quad x \in \mathbf{R}, \quad (7)$$

и там же действительную часть дилогарифма

$$M^2(x) = \operatorname{Re} L^2(e^{ix}) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos kx}{k^2}, \quad x \in \mathbf{R}. \quad (8)$$

При $x \in [-\pi, \pi]$ эти периодические функции задаются выражениями:

$$N^1(x) = \frac{1}{2}(\pi \operatorname{sgn}(x) - x); \quad M^2(x) = \frac{(\pi - |x|)^2}{4} - \frac{\pi^2}{12}, \quad (9)$$

где $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} \frac{x}{|x|}, & x \neq 0; \\ 0, & x = 0 \end{cases}$ – функция знака.

Выполнив в первом из интегралов (6) интегрирование по частям и учитывая, что $f(0) = f(l) = 0$, получим

$$a_k = \frac{2}{k\pi} \int_0^l f'(s) \cos k\omega s \, ds.$$

Используя это выражение для коэффициентов a_k и b_k (6), после подстановки их в (5), несложных преобразований и, принимая во внимание (7), найдем следующее представление для искомой функции:

$$u(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^l \left(\left(f'(s) + \frac{1}{a} F(s) \right) \left(N^1(\omega(x-s+at)) + N^1(\omega(x+s-at)) \right) + \left(f'(s) - \frac{1}{a} F(s) \right) \left(N^1(\omega(x-s-at)) + N^1(\omega(x+s+at)) \right) \right) ds. \quad (10)$$

Теперь выполним приближенное вычисление функции $u(x, t)$. Разобьем отрезок $[0, l]$ на n равных частей точками $x_k = kh$, $k = \overline{0, n}$ (где $h = l/n$ – шаг разбиения) и заменим под знаком интеграла в правой части формулы (10) на каждом из частичных отрезков $[x_{k-1}, x_k]$, $k = \overline{1, n}$ функции $f'(x)$ и $F(x)$ ее значениями в средней точке отрезка. В результате, учитывая, что первообразной функции $N^1(x)$ является, очевидно, функция $-M^2(x)$, получим:

$$\begin{aligned} u(x, t) &\approx \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(\left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \left(N^1(\omega(x-s+at)) + N^1(\omega(x+s-at)) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) - \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \left(N^1(\omega(x-s-at)) + N^1(\omega(x+s+at)) \right) \right) ds = \\ &= \frac{l}{2\pi^2} \sum_{k=1}^n \left(\left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \left(M^2(\omega(x-s+at)) - M^2(\omega(x+s-at)) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) - \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \left(M^2(\omega(x-s-at)) - M^2(\omega(x+s+at)) \right) \right) \Big|_{x_{k-1}}^{x_k}. \end{aligned}$$

Таким образом, приближенным решением задачи (2)–(4) является функция

$$\begin{aligned}
u_n(x, t) = & \frac{l}{2\pi^2} \sum_{k=1}^n \left(\left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \times \right. \\
& \times \left(M^2(\omega(x-s+at)) - M^2(\omega(x+s-at)) \right) + \\
& \left. + \left(f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) - \frac{1}{a} F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \left(M^2(\omega(x-s-at)) - M^2(\omega(x+s+at)) \right) \right) \Big|_{x_{k-1}}^{x_k}.
\end{aligned} \quad (11)$$

Найдем оценку допускаемой при вычислении решения по формуле (11) погрешности, принимая во внимание, что

$$\begin{aligned}
u(x, t) - u_n(x, t) = & \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(\left(f'(s) - f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) + \frac{1}{a} \left(F(s) - F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \right) \times \right. \\
& \times \left(N^1(\omega(x-s+at)) + N^1(\omega(x+s-at)) \right) + \\
& + \left(f'(s) - f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) - \frac{1}{a} \left(F(s) - F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right) \right) \times \\
& \left. \times \left(N^1(\omega(x-s-at)) + N^1(\omega(x+s+at)) \right) \right) ds.
\end{aligned}$$

Тогда, учитывая липшицевость функций $f'(x)$ и $F(x)$, а также тот факт, что ввиду (9)

$$|N^1(x)| < \frac{\pi}{2},$$

получим

$$\begin{aligned}
|u(x, t) - u_n(x, t)| \leq & \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(\left(\left| f'(s) - f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right| + \frac{1}{a} \left| F(s) - F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right| \right) \times \right. \\
& \times \left(\left| N^1(\omega(x-s+at)) \right| + \left| N^1(\omega(x+s-at)) \right| \right) + \\
& + \left(\left| f'(s) - f' \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right| + \frac{1}{a} \left| F(s) - F \left(x_{k-1} + \frac{h}{2} \right) \right| \right) \times \\
& \left. \times \left(\left| N^1(\omega(x-s-at)) \right| + \left| N^1(\omega(x+s+at)) \right| \right) \right) ds \leq \\
\leq & \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} 2 \left(L_1 \left| s - x_{k-1} - \frac{h}{2} \right| + \frac{1}{a} L_2 \left| s - x_{k-1} - \frac{h}{2} \right| \right) \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \right) ds \leq \\
\leq & \sum_{k=1}^n \int_{x_{k-1}}^{x_k} \left(L_1 \frac{h}{2} + \frac{1}{a} L_2 \frac{h}{2} \right) ds = \frac{l(aL_1 + L_2)}{2a} h.
\end{aligned}$$

Следовательно, равномерно по $x \in [0, l]$ и $t \geq 0$

$$|u(x, t) - u_n(x, t)| \leq \frac{l(aL_1 + L_2)}{2a} h. \quad (12)$$

Проведенные выше исследования позволяют сформулировать следующее утверждение.

Теорема. При сделанных выше предположениях относительно функций $f(x)$ и $F(x)$ точное решение смешанной задачи (2)–(4) для однородного волнового уравнения представляется через мнимую часть полилогарифма первого порядка на единичной окружности (7) по формуле (10), а приближенное решение находится через действительную часть дилогарифма (8) по (11). Абсолютная погрешность вычислений оценивается по (12), т. е. она равномерна по $x \in [0, l]$, $t \geq 0$ и имеет первый порядок малости относительно шага разбиения h .

Пример. Найти приближенное решение следующей смешанной задачи:

$$\begin{aligned} \partial_t u &= 4 \partial_{xx} u; \\ u(x, 0) &= sh \sin 2\pi x; \quad \partial_x u(x, 0) = -4\pi \cos 2\pi x sh \sin 2\pi x; \quad 0 \leq x \leq 1; \\ u(0, t) &= u(1, t) = 0; \quad t \geq 0. \end{aligned}$$

Непосредственной проверкой мы можем убедиться в том, что точным решением этой задачи является функция

$$u(x, t) = e^{-\sin 4\pi t \cos 2\pi x} sh(\sin 2\pi x \cos 4\pi t).$$

Вычисление значений приближенного решения данной задачи по формуле (11) в узлах сетки (x_k, t_j) ; $k, j = \overline{0, 10}$ (где $x_k = 0,1k$; $t_j = 0,1j$) показывает, что уже при $n = 50$ абсолютная погрешность меньше 0,002. Графики точного $u(x, t)$ и приближенного $u_{50}(x, t)$ решений данной задачи в квадрате $0 \leq x, t \leq 1$ представлены на рис. 1.

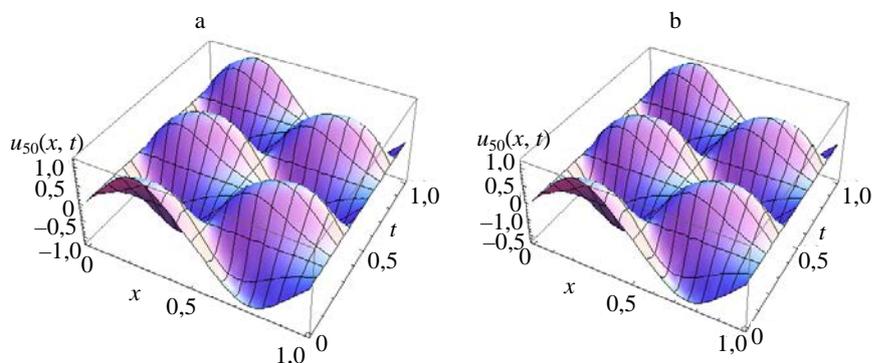


Рис. 1. График решений: а – точного $u(x, t)$; б – приближенного $u_{50}(x, t)$

Fig. 1. The graphs of the decisions: а – exact one $u(x, t)$; б – approximate one $u_{50}(x, t)$

ВЫВОД

С помощью полилогарифмов найдено точное и приближенное представления решений задачи об электрических колебаниях в линии, свободной от искажения. Приведена эффективная равномерная оценка погрешности приближенного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кошляков, Н. С. Дифференциальные уравнения математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. М.: Физматгиз, 1962. 767 с.
2. Араманович, И. Г. Уравнения математической физики / И. Г. Араманович, В. И. Левин. М.: Наука, 1969. 288 с.
3. Смирнов, В. И. Курс высшей математики: в 2 т. / В. И. Смирнов. М.: Наука, 1974. Т. 2. 479 с.
4. Мышкис, А. Д. Лекции по высшей математике / А. Д. Мышкис. СПб.: Лань, 2007. 688 с.
5. Остапенко, В. Телеграфное уравнение. Краевые задачи / В. Остапенко. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 272 с.
6. Новиков, Ю. Н. Электротехника и электроника. Теория цепей и сигналов, методы анализа / Ю. Н. Новиков. СПб.: Питер, 2005. 384 с.
7. Бычков, Ю. А. Основы теории электрических цепей / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев. СПб.: Лань, 2002. 464 с.
8. Дубнищев, Ю. Н. Колебания и волны / Ю. Н. Дубнищев. СПб.: Лань, 2011. 384 с.
9. Пыхтеев, Г. Н. Полилогарифмы, их свойства и методы вычисления / Г. Н. Пыхтеев, И. Н. Мелешко. Минск: Изд-во БГУ, 1976. 68 с.
10. Мелешко, И. Н. Специальные формулы для интегралов типа Коши и их приложения / И. Н. Мелешко. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1999. 197 с.

Поступила 28.10.2016 Подписана в печать 07.01.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. (1962) *Differential Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Fizmatgiz Publ. 767 (in Russian).
2. Aramanovich I. G., Levin V. I. (1969) *Equations of Mathematical Physics*. Moscow, Nauka Publ. 288 (in Russian).
3. Smirnov V. I. (1974) *A Course of Higher Mathematics. Vol. 2*. Moscow, Nauka Publ. 479 (in Russian).
4. Myshkis A. D. (2007) *Lectures in Higher Mathematics*. St.-Petersburg, Lan' Publ. 688 (in Russian).
5. Ostapenko V. (2012) *Telegraph Equation. Boundary Value Problems*. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing. 272 (in Russian).
6. Novikov Yu. N. (2005) *Electrical Engineering and Electronics. Circuit and Signals Theory, Methods of Analysis*. St.-Petersburg, Piter Publ. 384 (in Russian).
7. Bychkov Yu. A., Zolotnickij V. M., Chernyshev Je. P. (2002) *Fundamentals of Electric Circuit Theory*. St.-Petersburg, Lan' Publ. 464 (in Russian).
8. Dubnishchev Yu. N. (2011) *Oscillations and Waves*. St.-Petersburg, Lan' Publ. 384 (in Russian).
9. Pykhteev G. N., Meleshko I. N. (1976) *Polylogarithms, their Properties and Calculation Method*. Minsk, Belarusian State University Publ. 68 (in Russian).
10. Meleshko I. N. (1999) *Special Formula for Integrals of Cauchy-Type Integrals and their Applications*. Minsk, VUZ-YuNITI Publ. 197 (in Russian).

Received: 28 October 2016

Accepted: 7 January 2017

Published online: 28 July 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351

УДК 621.311

О моделировании режимов электроэнергетических систем с устройствами FACTS

Э. Д. Халилов¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт
энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Управление потоками мощности является актуальной задачей развития электроэнергетических систем. Это необходимо для снижения потерь мощности, повышения надежности и качества электроснабжения, увеличения передачи мощности. В настоящее время на основе современной силовой электроники разработаны эффективные устройства FACTS для гибкого управления режимами энергосистем. FACTS способны одновременно влиять на напряжение, реактивное сопротивление, угол между напряжениями. Как известно, расчеты установившихся режимов электроэнергетических систем являются наиболее часто выполняемыми задачами на всех территориальных и временных уровнях управления и планирования режимов. Эти расчеты имеют как самостоятельное значение, так и являются составной частью программных комплексов расчетов потерь мощности и энергии в электрических сетях, оптимальных режимов, а также устойчивости. Необходимость многократного расчета режима предъявляет повышенные требования к методам расчета установившегося режима в реальном времени в плане быстродействия и надежности получения результатов решения в условиях эксплуатации электроэнергетических систем. В традиционных расчетах установившихся режимов электрических сетей шунтирующие реакторы, токоограничивающие реакторы, батареи конденсаторов, устройства продольной компенсации при моделировании учитывались в виде пассивных элементов. В связи с внедрением устройств FACTS в энергосистемах возникает необходимость разработки соответствующих алгоритмов и их реализации в виде программного обеспечения для анализа и управления установившимися режимами энергосистем. Разработаны методика и программа для расчета установившихся режимов электрических сетей с учетом устройств FACTS. Программа за три внешние итерации расчета установившегося режима позволяет получить практически приемлемые допустимые решения. На основе результатов численного моделирования режимов электроэнергетической системы АО «Азерэнерджи» установлено, что применение устройств FACTS может существенно увеличить передаваемую по линии активную мощность, улучшить уровни напряжения и снизить потери активной мощности. Получены зависимости потоков и потерь мощности от регулируемого параметра устройств FACTS.

Ключевые слова: устройства FACTS, уравнения установившегося режима, модель, поток мощности, потери мощности

Для цитирования: Халилов, Э. Д. О моделировании режимов электроэнергетических систем с устройствами FACTS / Э. Д. Халилов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351

Адрес для переписки

Халилов Эльман Дамир оглы
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики
пр. Г. Зардаби, 94
Az1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +994012 432-80-76
elmanxalilov2010@mail.ru

Address for correspondence

Halilov Elman D.
Azerbaijan Scientific-Research and Design-
Prospecting Power Engineering Institute
94 G. Zardabi Ave.,
Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +994012 432-80-76
elmanxalilov2010@mail.ru

On the Simulation of Modes of Electric Power Systems with FACTS Devices

E. D. Halilov¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. Power flow control is an important task of development of electric power systems. It is necessary to reduce the power loss, improve the reliability and quality of power supply and increase the power transmission. Currently, on the basis of modern power electronics effective FACTS devices for flexible control of power system operation modes have been developed. FACTS devices are able to simultaneously influence the voltage, the reactance, the angle between the voltages. As it is known, the calculations of the established modes of electric systems are the most frequently performed tasks at all the territorial and time levels of control and planning operations. These calculations are significant by themselves, being also an integral part of software systems of calculation of losses of power and energy in electrical networks, calculation of optimal modes and also sustainability. The need for multiple mode calculation imposes high requirements to the methods of calculation of the established modes in real time in terms of performance and reliability of the results of the solution being obtained under operating conditions of electric power systems. In traditional calculations of the established modes of electrical networks, shunt reactors, current-limiting reactors, capacitor banks, longitudinal compensation devices were accounted in the simulation as passive elements. In regard with the introduction of FACTS devices in power systems, there is an arising need to develop appropriate algorithms and implement them in the form of software for analyzing and controlling the established modes of power systems. The methodology and software for calculation of the established modes of electric networks with consideration of FACTS devices have been developed. The software makes it possible to obtain practically acceptable solutions in three outer iterations. Based on the results of numerical simulation of modes of the power system of the “Azerenergy” JSC it was determined that the application of FACTS devices can significantly increase the transmission line active power, improve voltage levels and reduce losses of active power. The dependences of flows and power losses on the control parameter of FACTS devices have been derived.

Keywords: FACTS devices, equations of the established mode, model, power flow, power loss

For citation: Halilov E. D. (2017) On the Simulation of Modes of Electric Power Systems with FACTS Devices. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 341–351. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-341-351 (in Russian)

Введение

Как известно, мощность, передаваемая по линии электропередачи (ЛЭП), является функцией реактивного сопротивления линии, модулей напряжения в ее начале и конце и фазового угла между напряжениями [1, 2]:

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin \delta; \quad Q_{ij} = \frac{U_i (U_i - U_j) \cos \delta}{X_{ij}},$$

где U_i , U_j – напряжение в начале и конце линии; X_{ij} – индуктивное сопротивление линии; δ – угол между векторами U_i и U_j .

В настоящее время на основе современной силовой электроники созданы устройства FACTS для гибкого управления работой электропередачи, способные одновременно воздействовать на параметры U , X , δ , повышаю-

щие эффективность и обеспечивающие гибкое управление режимами энергосистем [3–7]. К FACTS относят устройства, которые предназначены для стабилизации напряжения, повышения устойчивости, оптимизации распределения потоков мощности, снижения потерь в электрических сетях (ЭС).

Первое поколение устройств FACTS – это статический компенсатор (СТК) реактивной мощности, управляемый шунтирующий реактор, фазосдвигающий трансформатор, тиристорное устройство продольной компенсации (ТУПК) и др. Ко второму поколению FACTS относятся: синхронный статический компенсатор, синхронный статический продольный компенсатор реактивной мощности, универсальный регулятор потоков мощности (УРПМ), асинхронизированный синхронный компенсатор, фазовращающий трансформатор. Переход инвертора из одного режима в другой в этих устройствах осуществляется путем изменения момента подачи управляющих импульсов на тиристоры [3, 6]. Некоторые принципиальные схемы устройств FACTS показаны на рис. 1.

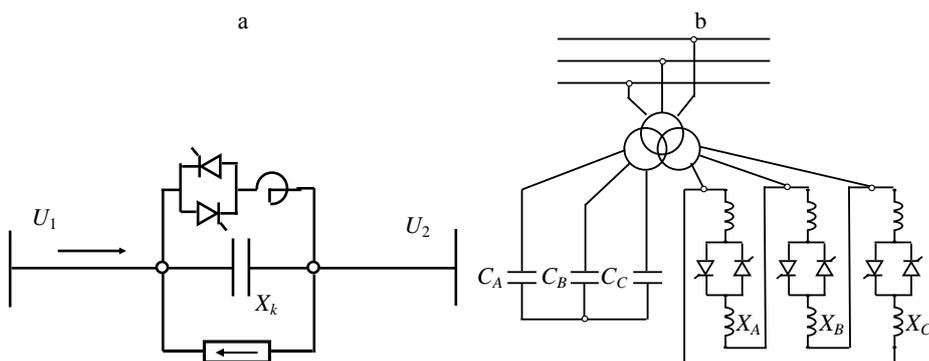


Рис. 1. Схемы: а – тиристорного устройства продольной компенсации
b – статического компенсатора

Fig. 1. The schemes: a – thyristor device of longitudinal compensation
b – static compensator

Внедрение устройств FACTS в энергосистемах требует разработки соответствующих методик, алгоритмов и программного обеспечения для управления установившимися режимами энергосистем [4]. Как известно, при оперативном управлении режимами электроэнергетической системы (ЭЭС) возникает необходимость выполнения большого объема вычислений, связанных с расчетом установившегося режима электрической сети (РУРЭС). Решение таких задач требует многократного расчета режима, что предъявляет повышенные требования к быстродействию и надежности получения результатов методами расчета установившегося режима (РУР) в реальном времени.

Уравнения установившегося режима (УУР) в виде баланса мощностей в полярной системе координат имеют вид [8–10]:

$$\Delta P_i = P_i - g_{ii}U_i^2 - U_i \left(\sum_{j=1(j \neq i)}^n U_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \right);$$

$$\Delta Q_i = Q_i + b_{ii}U_i^2 - U_i \left(\sum_{j=1(j \neq i)}^n U_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \right),$$

где g_{ii} , g_{ij} – собственная и взаимная проводимость узла; U_i , δ_i – модуль и фаза напряжения в узлах сети; P_{ij} , Q_{ij} – переток активной и реактивной мощностей; ΔP_{ij} , ΔQ_{ij} – небаланс активной и реактивной мощностей.

В результате РУР определяются комплексы напряжений в узлах сети, перетоки и потери активных и реактивных мощностей, токи в ЛЭП. Следует отметить, что число узлов и ветвей больших энергосистем достигает нескольких тысяч, в силу чего для расчета установившихся режимов электрических систем необходимо численными методами решить нелинейную систему алгебраических уравнений соответствующего порядка.

Математические модели устройств FACTS

В модели инъекции FACTS рассматриваются устройства, которые инжектируют определенное количество активной и реактивной мощностей в узел. Модель инъекции удобна при решении УУР электрической сети тем, что не изменит матрицу сопротивлений \mathbf{Z} .

Модель полной проводимости интерпретирует устройства FACTS как шунты или продольные элементы с суммарной проводимостью B .

Модель угла зажигания включает зависимость полного сопротивления FACTS или значений мощности от углов зажигания переключателей. В этой модели угол зажигания является регулируемым параметром.

Так, реактивная проводимость и реактивная мощность СТК определяются уравнениями [4]:

$$B_{\text{СТК}} = B_C - B_{\text{ТУР}} = -\frac{1}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] \right\};$$

$$Q_i = -\frac{U_i^2}{X_C X_L} \left\{ X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha_{\text{СТК}}) + \sin(2\alpha_{\text{СТК}})] \right\},$$

где α – угол зажигания тиристорно-управляемого реактора (ТУР), лежит в диапазоне $\pi/2 < \alpha < \pi$; $\alpha_{\text{СТК}}$ – угол зажигания СТК.

Линеаризованные уравнения установившегося режима при этом имеют вид [4]

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2U_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{\text{СТК}}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta \alpha_{\text{СТК}} \end{bmatrix}^{(i)}.$$

Методы решения задачи расчета установившегося режима электрической сети с устройствами FACTS

Управляемые устройства FACTS предоставляют дополнительные степени свободы для управления потоками мощности и напряжения в ЭС. Для того чтобы определить эффективность управляемых устройств в электрической сети, необходимо обновление методик, алгоритмов и программного обеспечения анализа режимов ЭЭС, в частности РУРЭС.

Первый подход заключается в решении УУР для ЭС без FACTS и последующем решении задачи для переменных состояний управляемых устройств в конце каждого РУР. Такой подход легче поддается реализации в алгоритмах Ньютона. Второй подход включает переменные состояния, описывающие устройства FACTS и ЭС в единой системе уравнений. Этот способ является унифицированным и сохраняет квадратичную сходимость. Однако при данном подходе могут возникнуть проблемы сходимости.

Таким образом, при учете устройств FACTS алгоритмы РУРЭС требуют изменения с учетом требований регулирования параметров этих устройств в отличие от традиционного расчета установившегося режима электрических сетей. В связи с этим программы РУРЭС, разработанные в Азербайджанском научно-исследовательском и проектно-изыскательском институте энергетики (АЗНИИЭ), были усовершенствованы, а работоспособность их проверена проведением соответствующих численных экспериментов на тестовых схемах.

Методика решения задачи расчета установившегося режима электрической сети с учетом FACTS во внешней итерации

Разработаны методики РУРЭС, основанные на коррекции регулируемого параметра FACTS [5].

Методика определения параметра FACTS, обеспечивающая заданный поток активной мощности по ветви $\min F(X_{\text{ЛЭП}}) = (P_{\text{задан}} - P_{\text{РУРЭС}}(X_{\text{ЛЭП}}))^2$, основана на нижеследующем алгоритме.

1. Расчет установившегося режима электрической сети и определение $F(X_{\text{ЛЭП}})$ при заданных начальных параметрах FACTS.

2. Для $X_{\text{ЛЭП}}(2) = X_{\text{ЛЭП}}(1) + h$ расчет режима РУРЭС и определение $F(X_{\text{ЛЭП}})_2$.

3. Если $F(X_{\text{ЛЭП}})_1 < F(X_{\text{ЛЭП}})_2$, то $X_{\text{ЛЭП}}(3) = X_{\text{ЛЭП}}(1) - h$ и расчет $F(X_{\text{ЛЭП}})_3$. В противном случае $X_{\text{ЛЭП}}(3) = X_{\text{ЛЭП}}(1) + 2h$ и расчет $F(X_{\text{ЛЭП}})_3$.

4. Используя полученные значения $F(X_{\text{ЛЭП}})$ в трех точках $X_{\text{ЛЭП}}(1)$, $X_{\text{ЛЭП}}(2)$, $X_{\text{ЛЭП}}(3)$ и формулу для оценивания с помощью квадратичной аппроксимации, вычисляются оптимальное напряжение $X_{\text{ЛЭП,опт}}$ и минимум функции $F(X_{\text{ЛЭП}})_{\min}$.

5. Проверка на окончание поиска оптимума: если $|(F(X_{\text{ЛЭП}}(k))_{\min} - F(X_{\text{ЛЭП}}(k-1))_{\min})| < \varepsilon_F$ и $|(X_{\text{ЛЭП}}(k)_{\min} - X_{\text{ЛЭП}}(k-1)_{\text{опт}})| < \varepsilon_{X_{\text{ЛЭП}}}$ выполняются, то процедура оптимизации заканчивается.

Методика определения параметра FACTS, обеспечивающая минимальные потери активной мощности $\min \Delta P(K_i'')$ при ограничениях $W(X, Y) = 0$; $X_{\min} < X < X_{\max}$; $Y_{\min} < Y < Y_{\max}$, основана на нижеследующем алгоритме.

1. РУРЭС и определение $\Delta P_{\text{сум1}}$ при заданных начальных параметрах FACTS.

2. Для $K_t''(2) = K_t''(1) + h$ расчет режима и определение $\Delta P_{\text{сум2}}$.

3. Если $\Delta P_{\text{сум1}} < \Delta P_{\text{сум2}}$, то $K_t''(3) = K_t''(1) - h$ и расчет $\Delta P_{\text{сум3}}$. В противном случае $K_t''(3) = K_t''(1) + 2h$ и расчет $\Delta P_{\text{сум3}}$.

4. Используя полученные значения $\Delta P_{\text{сум}}$ в точках $K_t''(1)$, $K_t''(2)$, $K_t''(3)$ и формулу для оценивания с помощью квадратичной аппроксимации, вычисляются оптимальное напряжение $K_{\text{юпт}}''$ и минимум функции $\Delta P_{\text{мин}}$.

5. Проверка на окончание поиска оптимума: если $|(\Delta P(k)_{\text{мин}} - \Delta P(k-1)_{\text{мин}})| < \varepsilon_p$ и $|(K_t''(k)_{\text{имин}} - K_t''(k-1)_{\text{юпт}})| < \varepsilon_{K_m''}$ выполняются, то процедура оптимизации заканчивается.

С целью получения РУРЭС с учетом УРПМ разработана программа расчета стационарного режима, блок-схема которой приведена на рис. 2.

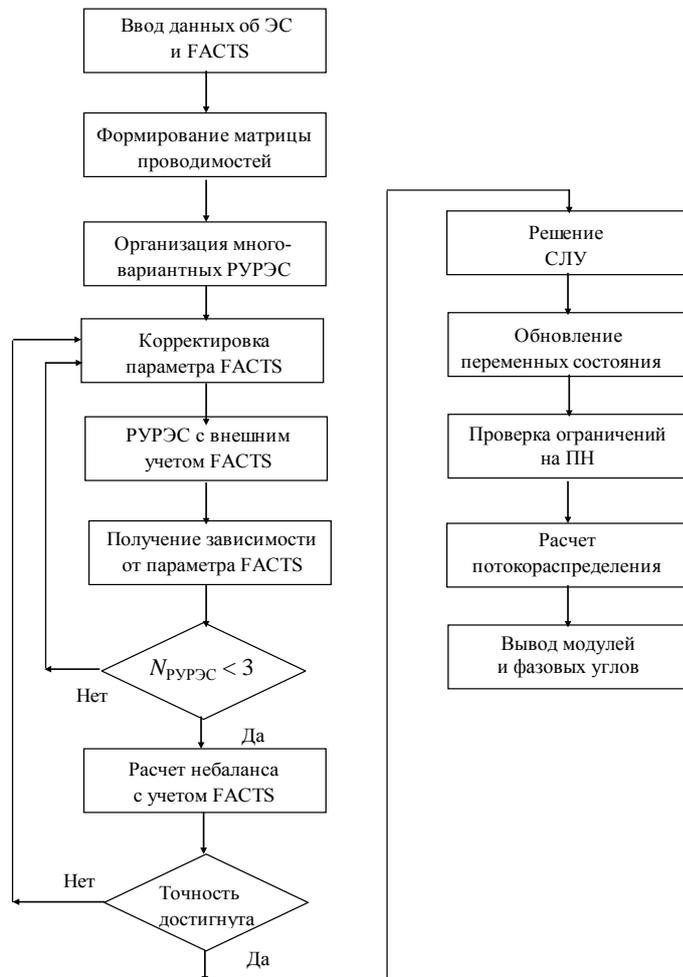


Рис. 2. Блок-схема расчета установившегося режима с учетом FACTS

Fig. 2. A block diagram of the calculation of the established mode with the account of the FACTS

Предлагаемая методика автоматизированной коррекции может быть реализована в известных промышленных программах РУР. Одна из экранных форм разработанной в среде Delphi программы с результатами расчета для ТУПК приведена на рис. 3.

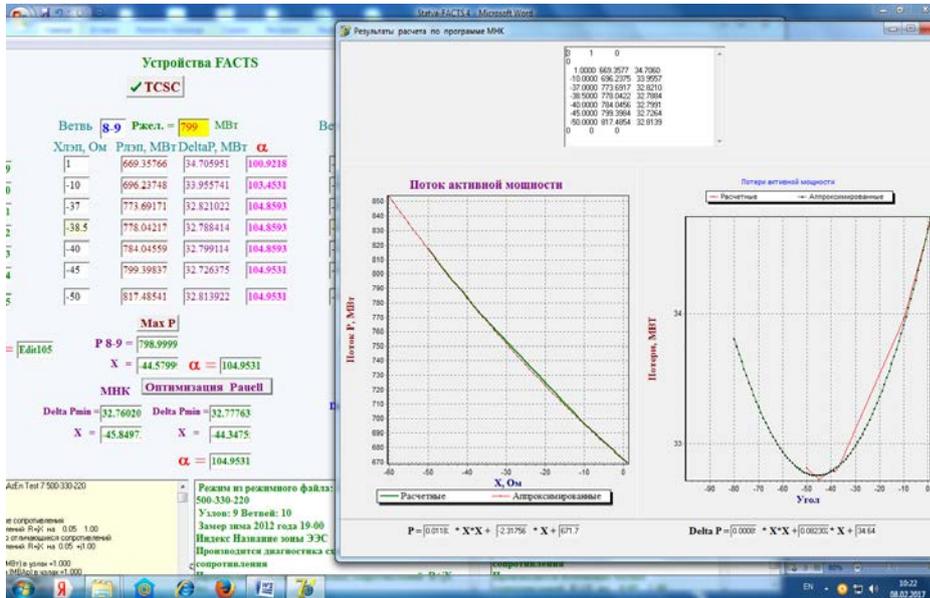


Рис. 3. Экранная форма разработанной в среде Delphi программы

Fig. 3. A screen form of the program developed in the Delphi media

Оценка эффективности от установки устройств FACTS в электроэнергетической системе АО «Азерэнержи»

Для оценки эффективности использования установок управляемых FACTS на примерах эквивалентной ЭЭС АО «Азерэнержи» [11] проведены расчеты установившегося режима на кольцевой схеме воздушной линии (ВЛ) 220 и 500 кВ с учетом ТУР, СТК, ТУПК, УРПМ (рис. 4).

Для моделирования возможностей управления напряжением ТУР узел 4, в котором установлен тиристорно-управляемый реактор с пределами регулирования реактивной мощности 0–200 Мвар для удержания величины напряжения на этом узле, выбран в качестве РУ-узла. Потоки активной и реактивной мощностей показаны на рис. 4, а узловых напряжения и углы приведены в табл. 1.

Для поддержания в узле 4 ЛЭП напряжения 500 кВ при нагрузке в узле 6, равной 600 МВт, ТУР потребляет 161,83 Мвар реактивной мощности. При этом угол зажигания тиристоров $\alpha = 98,65^\circ$.

Результаты расчета установившегося режима в случае установки статистического компенсатора в узле 6 с пределами регулирования реактивной мощности (+121)–(–242) Мвар для режима нагрузки 1200 МВт приведены в табл. 2.

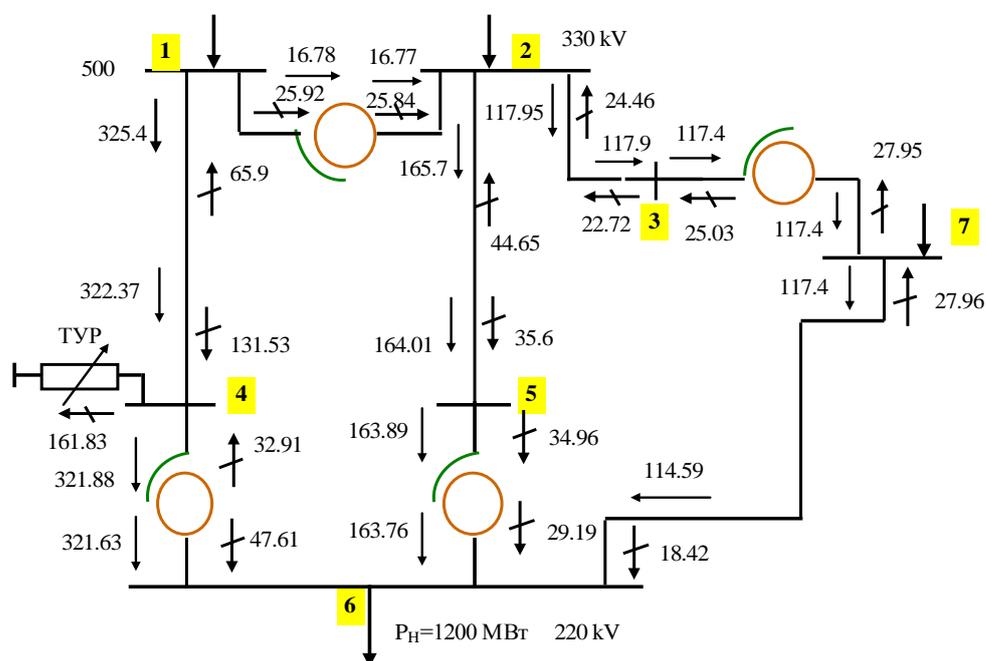


Рис. 4. Эквивалентный участок высоковольтной линии 220–330–500 кВ электроэнергетической системы Азербайджана

Fig. 4. The equivalent piece of high-voltage lines of 220–330–500 kV of Azerbaijani power system

Таблица 1

**Результаты расчета установившегося режима
при установке тиристорно-управляемого реактора в узле 4**
**Calculation results of the established mode
when installing thyristor-controlled reactor in node 4**

Наименование показателя	Режим в узле электрической сети						
	1	2	3	4	5	6	7
Действующее напряжение узла, кВ	510,00	337,00	337,06	500	334,46	221,34	225,79
Угол напряжения, град.	0	0,09	-0,01	-5,56	-6,20	-8,14	-1,37

Таблица 2

**Результаты расчета установившегося режима
при установке статического компенсатора в узле 6**
**The results of calculation of the established modes
when a static compensator in node 6 is installed**

Наименование показателя	Режим в узле электрической сети						
	1	2	3	4	5	6	7
Действующее напряжение узла, кВ	510,00	337,00	336,97	500,60	330,59	220,00	225,41
Угол напряжения, град.	0	-1,22	-1,40	-11,84	-13,47	-17,25	-4,02

Установка СТК на шинах подстанции 220 кВ «Апшерон» за счет снижения потерь электроэнергии от передачи реактивной мощности по ВЛ 220–330–50 кВ для режима передаваемой мощности 800–1200 МВт по этому сечению приводит к уменьшению суммарных потерь активной мощности на 2,3–5,5 МВт. Для поддержания напряжения 220 кВ в узле 6 для режима нагрузки 1200 МВт СТК генерирует 92,86 Мвар реактивной мощности. Результаты, представленные в табл. 1, 2, показывают, что использование ТУР и СТК приводит к улучшению уровня напряжений в узлах.

Для моделирования ТУПК применяли семиузловую эквивалентную схему с напряжениями 220–330–500 кВ электроэнергетической системы Азербайджана (рис. 4) для режима нагрузки 1200 МВт в узле 6. ТУПК использовали для повышения активной мощности по ВЛ 500 кВ, снижения потоков в ВЛ 220 и 330 кВ и уменьшения потерь активной мощности. Рассматривали варианты установления ТУПК в ВЛ 500 кВ (рис. 4, ветвь 1–4).

Параметры потокораспределения активной мощности приведены на рис. 5. В знаменателе указан поток активной мощности при исходном режиме без ТУПК, а в числителе – с ТУПК при $X_C = 38,5$ Ом. Результаты РУР при установке ТУПК в режиме нагрузки 1200 МВт для ветви 1–4 (рис. 5) отображены в табл. 3. Анализируя данные табл. 3, можно отметить, что включение ТУПК для компенсации линии электропередачи между узлами 1 и 4 способствует увеличению мощности, передаваемой по ВЛ 500 кВ, с 669,91 до 779,47 МВт. Кроме того, уровни узловых напряжений улучшились.

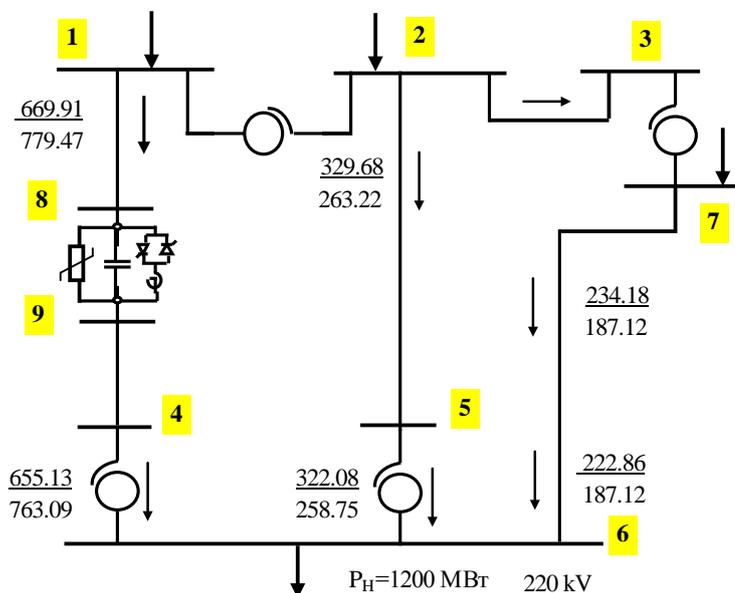


Рис. 5. Потокораспределение активной мощности при исходном режиме (числитель) и режиме с тиристорным устройством продольной компенсации (знаменатель)

Fig. 5. The active power flow distribution at the source mode (the numerator) and at the mode with a thyristor device of longitudinal compensation (denominator)

Таблица 3

**Результаты расчета установившегося режима
при установке тиристорного устройства продольной компенсации**
**Calculation results of the established mode
when a thyristor device of longitudinal compensation is installed**

Номер узла	X_c , ТУПК, Ом	Угол зажигания, град.	P_{14} , МВт	$\Delta P_{\text{сум}}$, МВт
1	0	100,92	671,8098	34,6388
2	-10	103,45	696,2375	33,9557
3	-37	104,86	773,6917	32,8210
4	-38,5	104,86	778,0422	32,7884
5	-40	104,86	784,0456	32,7991
6	-45	104,95	799,3984	32,7264
7	-50	104,95	817,4854	32,8139

Зависимость активной мощности от сопротивления линии аппроксимирована линейной функцией в виде

$$P = 0,0118X^2 - 2,317X + 671,744.$$

Получена также аппроксимация полиномом 2-й степени для потерь активной мощности от сопротивления линии

$$\Delta P = 0,00089X^2 + 0,0823X + 34,647.$$

При этом максимальная погрешность составила 0,12 %, а среднеквадратическая ошибка – 0,08 %. Компенсация линии электропередачи между узлами 1 и 4 способствует разгрузке ЛЭП 2–5, 2–3, 7–6. В частности, двухцепная ЛЭП 220 кВ разгружается с 234 до 178 МВт. Суммарные потери активной мощности в этом режиме составляют 32,20 МВт и снижаются на 2,07 МВт.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа математических моделей устройств управляемых FACTS установлено, что методика расчета установившегося режима электрической сети с FACTS может быть построена на совместном и раздельном решении соответствующих уравнений.

2. Разработаны алгоритм и программа для расчета установившихся режимов электрических сетей с учетом устройств FACTS. Получены зависимости потоков и потерь мощности от регулируемого параметра FACTS. Программа апробирована путем компьютерного моделирования установившегося режима на тестовых и реальных примерах.

3. Проанализированы результаты численного моделирования режимов электроэнергетической системы АО «Азербэнеджи». Установлено, что применение устройств FACTS (статического компенсатора, тиристорно-управляемого реактора, тиристорного устройства продольной компенсации, универсального регулятора потоков мощности) в электрических сетях 220–330–500 кВ может существенно увеличить передаваемую активную мощность, улучшить уровни напряжения и снизить потери активной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананичева, С. С. Передача электроэнергии на большие расстояния / С. С. Ананичева, П. И. Бартоломей, А. Л. Мызин; исправл. 3-е изд. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 85 с.
2. Бурман, А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336 с.
3. The Unified Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control / L. Gyugyi [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. Vol. 10, No 2. P. 1085–1097.
4. FACTS. Modelling and Simulation in Power Networks / E. Acha [et al.] // John Wiley & Sons, LTD. ISBN 0-470-85271-2.
5. Кошечев, Л. А. Об эффективности применения управляющих устройств в электрической сети / Л. А. Кошечев, В. А. Шлайфштейн // Электрические станции. 2005. № 12. С. 30–38.
6. Кочкин, В. И. Новые технологии повышения пропускной способности ЛЭП. Управляемая передача мощности / В. И. Кочкин // Новости Электротехники. 2007. Т. 46, № 4. С. 2–6.
7. Пospelova, T. G. Эффекты применения FACTS И АСМ в повышении эффективности региональных и национальных энергосистем / Т. Г. Пospelova // International Conference “Energy of Moldova-2012. Regional aspects of development”. Oct. 4–6, 2012. Chisinau, Republic of Moldova. P. 83–91.
8. Идельчик, В. И. Расчеты и оптимизации режимов электрических систем / В. И. Идельчик. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
9. Вычислительные методы потокораспределения в электрических системах / Б. И. Аюев [и др.]. М.: Наука, 2008. 256 с.
10. Баламетов, А. Б. Методы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем / А. Б. Баламетов, Г. С. Мусаханова, Э. Д. Халилов. Абакан: Изд-во Хакасского гос. ун-та имени Н. Ф. Катанова, 2009. 340 с.
11. Баламетов, А. Б. Моделирование устройств FACTS при расчетах установившихся режимов электрических сетей / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Проблемы энергетики. 2012. № 4. С. 20–28.

Поступила 08.02.2017 Подписана в печать 12.04.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Ananicheva S. S., Bartolomei P. I., Myzin A. L. (2012) *Transmission of Electricity over Large Distances*. 3rd ed. Ekaterinburg, Ural Federal University. 85 (in Russian).
2. Burman A. P., Rozanov Yu. K., Shakaryan Yu. G. (2012) *Managing Flows of Electricity and Improving the Efficiency of Electric Power Systems*. Moscow, MEI Publishing House. 336 (in Russian).
3. Gyugyi L., Schauder C. D., Williams S. L., Rietman T. R., Torgerson D. R., Edris A. (1995) The Unified Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (2), 1085–1097. DOI: 10.1109/61.400878.
4. Acha E., Fuente-Esquivel R. L., Ambriz-Pérez H., Angeles-Camacho C. (2004) *FACTS. Modelling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/0470020164.
5. Koshcheev L. A., Shlaifshstein V. A. (2005) On the Effectiveness of Control Devices Use in an Electric Network *Elektricheskie Stantsii* [Power Plants], (12), 30–38 (in Russian).
6. Kochkin V. I. (2007) New Technologies Increasing the Capacity of Transmission Lines. Controlled Transfer of Power. *Novosti Electrotehniki* = News of Electrical Engineering, 46 (4), 2–6 (in Russian).
7. Pospelova T. G. (2012) The Effects of FACTS and ASM Applying on Increasing the Effectiveness of Regional and National Power Grids. *International Conference “Energy of Moldova-2012. Regional Aspects of Development”*. Oct. 4–6, 2012. Chisinau, Republic of Moldova, 83–91 (in Russian).
8. Idel'chik V. I. (1988) *Calculations and Optimization of Electrical Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
9. Ayuev B. I., Davydov V. V., Erokhin P. M., Neuimin V. G. (2008) *Computational Methods of Flow Distribution in Electrical Systems*. Moscow, Nauka Publ. 256 (in Russian).
10. Balametov A. B., Musakhanova G. S., Halilov E. D. (2009) *Methods of Analysis of the Established Modes of Electric Power Systems*. Abakan, Publishing House of the Khakass State University named after N. F. Katanov. 340 (in Russian).
11. Balametov A. B., Halilov E. D. (2012) Modeling of FACTS Devices in the Calculation of the Established Modes of Electric Networks. *Problemy Energetiki* [Energy Sector Problems], (4), 20–28 (in Russian).

Received: 8 February 2017

Accepted: 12 April 2017

Published online: 28 July 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366

УДК 536.25

Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха

А. Б. Сухоцкий¹⁾, Г. С. Сидорик¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет (Минск,
Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Представлены методика и результаты экспериментального исследования теплоотдачи однорядного пучка, состоящего из биметаллических труб со спирально накатными ребрами, при естественной и смешанной конвекции воздуха. Смешанная конвекция, представляющая собой теплообмен, когда вклад свободной и вынужденной конвекции сопоставима, была организована с помощью вытяжной шахты, установленной над теплообменным пучком, а вынужденное движение воздуха создавали за счет разности его плотностей в шахте и окружающей среде. Получены экспериментальные зависимости теплоотдачи оребренных однорядных пучков в выбранных диапазонах чисел Грасгофа и Рейнольдса. Показано, что теплоотдача при смешанной конвекции в 2,5–3 раза выше, чем при свободной, а интенсивность роста теплоотдачи при увеличении числа Рейнольдса больше, чем при вынужденной конвекции. Проанализированы различные формы представления результатов экспериментов и определено, что число Нуссельта имеет единую степенную зависимость от числа Рейнольдса при любой высоте вытяжной шахты. Установлена линейная зависимость числа Рейнольдса от квадратного корня из числа Грасгофа и определены коэффициенты пропорциональности для различных высот шахты. Отмечено, что характер движения частиц воздуха в пучке при свободной конвекции идентичен движению частиц при вынужденной конвекции при малых числах Рейнольдса, т. е. свободно-конвективный поток при возникновении дополнительных движущих сил плавно перетекает в вынужденно-конвективный без характерных провалов или скачков.

Ключевые слова: биметаллическая труба, вытяжная шахта, аппарат воздушного охлаждения, воздухоохлаждаемый теплообменник, энергосбережение

Для цитирования: Сухоцкий, А. Б. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. Т. 60. № 4. С. 352–366. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366

Адрес для переписки

Сухоцкий Альберт Борисович
Белорусский государственный
технологический университет
ул. Свердлова, 13а,
220006, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Address for correspondence

Sukhotskii Al'bert B.
Belarusian State
Technological University
13a Sverdlov str.,
220006, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 327-87-30
alk2905@mail.ru

Experimental Study of Heat Transfer of a Single-Row Bundle of Finned Tubes in Mixed Convection of Air

A. B. Sukhotskii¹, G. S. Sidorik¹

¹Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The technique and results of experimental study of heat transfer of a single bundle consisting of bimetallic tubes with helically knurled edges, in natural and mixed convection of air are presented. Mixed convection, i.e. a heat transfer, when the contribution of free and forced convection is comparable, was created with the help of the exhaust shaft mounted above the heat exchanger bundle and forced air movement was created by the difference in density of the air in the shaft and the environment. The experimental dependence of the heat transfer of finned single row of bundles in the selected ranges of Grashof and Reynolds numbers has been determined. It is demonstrated that heat transfer in the mixed convection is 2.5–3 times higher than in free one and the growth rate of heat transfer with increasing Reynolds number is more than in the forced convection. Different forms of representation of results of experiments were analyzed and it was determined that the Nusselt number has a single power dependence on the Reynolds number at any height of the exhaust shafts. A linear dependence of the Reynolds number on the square root of the Grashof number was determined as well as the proportionality factors for different shaft heights. It is noted that the characteristics of the motion of air particles in the bundle in free convection is identical to the motion of particles in forced convection at small Reynolds numbers, i.e. a free convection flow smoothly flows into a forced convection one without the typical failures or surges if additional driving forces arise.

Keywords: bimetallic tube, exhaust shaft, air cooling apparatus, air-cooled heat exchanger, energy saving

For citation: Sukhotskii A. B., Sidorik G. S. (2017) Experimental Study of Heat Transfer of a Single-Row Bundle of Finned Tubes in Mixed Convection of Air. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 352–366. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366 (in Russian)

Введение

В различных энергетических и технологических установках применяются рекуперативные теплообменники с пучками из биметаллических труб со спирально накатными ребрами (БРТ) (при числах Рейнольдса $Re > 1000$), обтекаемых поперечным вынужденным потоком воздуха [1, 2]. Широкое применение БРТ нашли в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО). По данным [3], сейчас только в России эксплуатируется около 52000 АВО с установленной мощностью привода вентиляторов порядка $2,1 \cdot 10^6$ кВт, при этом парк АВО непрерывно увеличивается. Таким образом, электропотребление аппаратов воздушного охлаждения в ближайшие годы будет только возрастать и доля их в энергоёмкости промышленности станет ощутимее.

Один из способов решения проблемы энергосбережения – применение теплообменников в условиях свободной конвекции без затрат электроэнергии на обеспечение режима вынужденной конвекции охлаждающего воздуха. При температуре охлаждающего воздуха ниже некоторого значения вентиляторы воздухоохлаждаемого теплообменника могут быть полностью отключены с обеспечением нормативной тепловой мощности аппарата [4].

Имеется ряд публикаций [5] по расчету свободно-конвективного теплообмена гладкотрубных пучков в потоке воздуха для широкого диапазона компоновочных характеристик пучка и геометрических параметров трубы. Известно немало экспериментальных исследований [6–12] теплоотдачи шахматных и коридорных пучков из труб со спиральными и шайбовыми ребрами, обтекаемых снаружи поперечным свободным потоком воздуха в неограниченном пространстве.

Практическая реализация свободной конвекции изучена недостаточно, ввиду того что ранее для энергетики исследования в этой области считались неактуальными. Изучение тепловых режимов при эксплуатации АВО в режиме свободной конвекции показало [13], что применение этого вида теплообмена позволяет добиться снижения потребления электрической энергии примерно на 30 %. Однако область использования воздухоохлаждаемых теплообменников в условиях свободной конвекции довольно ограничена.

Перспективный способ решения проблемы энергосбережения – применение в воздухоохлаждаемых теплообменниках смешанной конвекции. Такой режим теплоотдачи организуется, когда свободное движение воздуха усиливается за счет дополнительных подъемных сил, создаваемых, например, маломощным вентилятором или вытяжной шахтой. При этом вклад в теплоотдачу свободной и вынужденной конвекции сопоставим. Техническая реализация смешанной конвекции не требует значительных материальных затрат, а получаемый теплоперенос в несколько раз больше, чем при свободной конвекции, что обеспечивает значительную экономию энергоресурсов [14–17].

Исследования теплоотдачи смешанной конвекцией при малых числах Рейнольдса ($Re < 1000$) в оребренных пучках практически отсутствуют. Известна лишь работа [17], в которой получены экспериментальные зависимости теплоотдачи оребренных однорядных пучков в диапазоне числа Грасгофа $(11–550) \cdot 10^3$ и числа Рейнольдса в пределах 480–2500.

При смешанной конвекции передача теплоты происходит в результате совместного действия свободной и вынужденной конвекции, а следовательно, возникает задача получения функциональной зависимости между числами подобия для расчета коэффициента теплоотдачи. Традиционно опытные данные для свободной конвекции обобщаются функциональным уравнением подобия

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (1)$$

где $Gr = (g\beta l^3(t_{ст} - t_0))/\nu^2$ – число Грасгофа; $Pr = \nu/a$ – число Прандтля; $Nu = \alpha l/\lambda$ – число Нуссельта; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; β – коэффициент температурного расширения, K^{-1} ; ν – коэффициент кинематической вязкости среды, m^2/c ; l – характерный геометрический параметр, m ; $t_{ст}$, t_0 – температура нагретой поверхности и окружающей среды, K ; a – коэффициент температуропроводности среды, m^2/c ; λ – теплопроводность среды, $Вт/(м \cdot K)$.

Для вынужденной конвекции уравнение подобия имеет вид

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}), \quad (2)$$

где $\text{Re} = w/\nu$ – число Рейнольдса; w – скорость потока воздуха, омывающего нагретую поверхность, м/с.

В ряде исследований в условиях смешанной конвекции [15–17] результаты экспериментов представлялись в координатах с различными комбинациями соотношений чисел Нуссельта, Грасгофа и Рейнольдса: $\text{Nu} - \text{Gr}/\text{Re}^2$, $\text{Nu}/\text{Re}^{0,5} - \text{Gr}/\text{Re}^2$. Известны исследования подбора зависимостей, наиболее точно и полно описывающих процессы теплообмена для оребренных пучков в условиях смешанной конвекции и удобных при этом для инженерных расчетов [16, 17].

В [18] высказано предположение, что энергия, возбуждающая подъемное движение воздуха и определяемая величиной $g\beta l^3(t_{\text{ст}} - t_0)$, эквивалентна кинетической энергии v^2 . Следовательно, число Грасгофа эквивалентно квадрату числа Рейнольдса. Исходя из этой аналогии, авторами [18] предложен определяющий критерий для случая смешанной конвекции в виде $k\text{Re}^2 + \text{Gr}$, где k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Методика и результаты исследования

Рассмотрим методику экспериментального определения теплоотдачи однорядного оребренного пучка при смешанной конвекции воздуха.

Экспериментальный стенд (рис. 1) для исследования свободной и смешанной конвекции состоит из камеры размерами $0,8 \times 0,8 \times 1,0$ м, в центре которой размещен опытный однорядный горизонтальный пучок из шести обогреваемых переменным электрическим током труб. При этом одна из центральных обогреваемых труб (калориметр) содержит средства измерения средней температуры для вычисления приведенного коэффициента теплоотдачи.

Трубчатые электронагреватели (ТЭН) шести обогреваемых труб пучка подключали параллельно к регулируемому масляному трансформатору (модель АОМН-40-220-75). Общую мощность, подаваемую на пучок труб, измеряли ваттметром Д57 (класс точности 0,1). Температуру на поверхности трубы-калориметра фиксировали с помощью пяти хромель-алюмелевых термопар диаметром 0,2 мм, которые через переключатель подключали к вольтметру (модель В7-40/5, класс точности 0,4). Термопары были заложены у основания ребер вдоль образующей трубы по винтовой линии на половине окружности трубы, считая, что вторая половина имеет симметричное поле температур. Мощность, подводимую к трубе-калориметру, измеряли ваттметром (модель К505, класс точности 0,5), а температуру воздуха t_0 внутри камеры – ртутным лабораторным термометром с точностью 0,1 °С. Общий для всех термопар холодный спай помещали в сосуд Дьюара с тающим льдом.

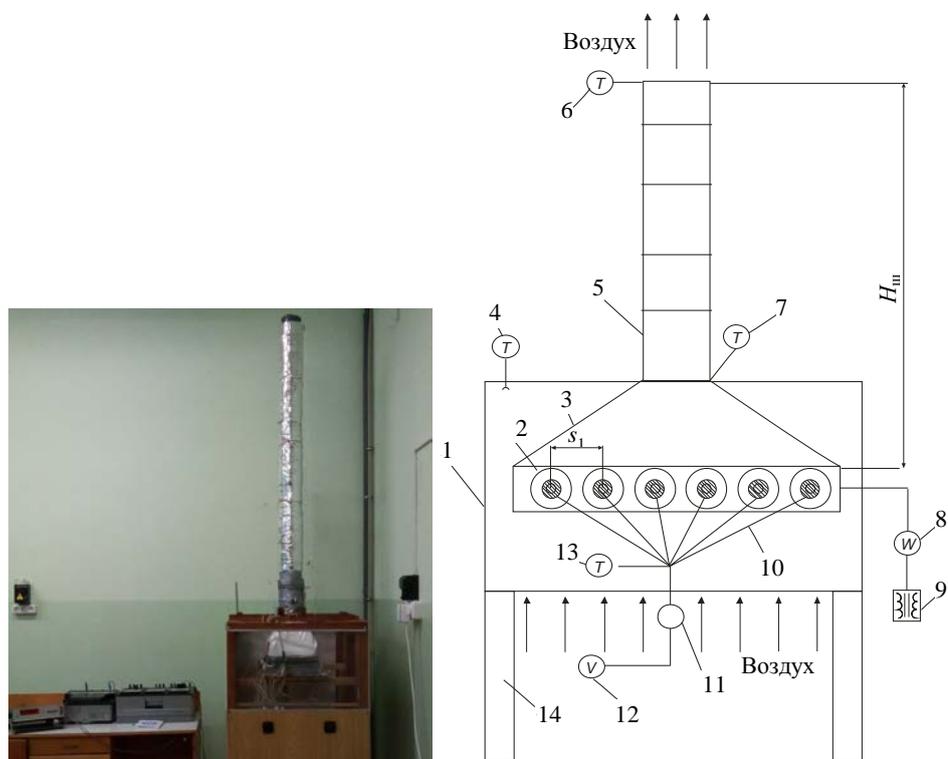


Рис. 1. Фотография и схема экспериментального стенда для исследования свободной и смешанной конвекции: 1 – камера; 2 – однорядный горизонтальный пучок; 3 – диффузор; 4 – лабораторный термометр; 5 – вытяжная шахта; 6 – медь-константановая термопара; 7 – медь-константановая гипертермопара; 8 – ваттметр; 9 – масляный трансформатор; 10 – термопара; 11 – переключатель; 12 – вольтметр; 13 – сосуд Дьюара; 14 – опора

Fig. 1. The photo and the scheme of an experimental stand for the study of free and mixed convection: 1 – camera; 2 – single row horizontal bundle; 3 – diffuser; 4 – laboratory thermometer; 5 – exhaust shaft; 6 – copper-constantan thermocouple; 7 – copper-constantan hyper-thermocouple; 8 – power meter; 9 – oil transformer; 10 – thermocouple; 11 – commutator; 12 – voltmeter; 13 – Dewar bottle; 14 – backup

Опыты проводили на биметаллических ребристых круглых трубах (рис. 2), имеющих параметры: наружный диаметр ребра $d = 56$ мм; высота ребра $h = 15$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм; диаметр ребра у основания $d_0 = 26$ мм; коэффициент оребрения $\phi = 21$. Несущую гладкую трубу с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм изготавливали из стали 10. Трубы с данными параметрами широко применяются в аппаратах воздушного охлаждения, в которых для существенного энергосбережения при некоторых температурах окружающего воздуха отвод теплоты осуществляется смешанной конвекцией. Теплоотдающая длина оребренной части трубы $l = 300$ мм. Поперечный шаг труб в однорядном пучке составлял $s_1 = 58$ мм. Пучок с торцов ограничивали деревянными трубными досками, а с боков – планками высотой 60 мм.

Внутри биметаллических ребристых труб (рис. 2) соосно был вставлен изготовленный на Минском заводе ТЭНов стальной трубчатый электро-

нагреватель диаметром $d_{ТЭН} = 12,5$ мм, мощностью 320 Вт. Внутри ТЭНа находились спираль из проволоки с высоким омическим сопротивлением и наполнитель из электротехнического периклаза марки ППЭ. Между ТЭНом и стенкой засыпался кварцевый песок дисперсным составом 0,16–0,32 мм. Торцевые участки обогреваемых труб для уменьшения потерь теплоты были защищены фторопластовыми втулками наружным диаметром $d_{вТ} = 45$ мм и длиной $l_{вТ} = 35$ мм.

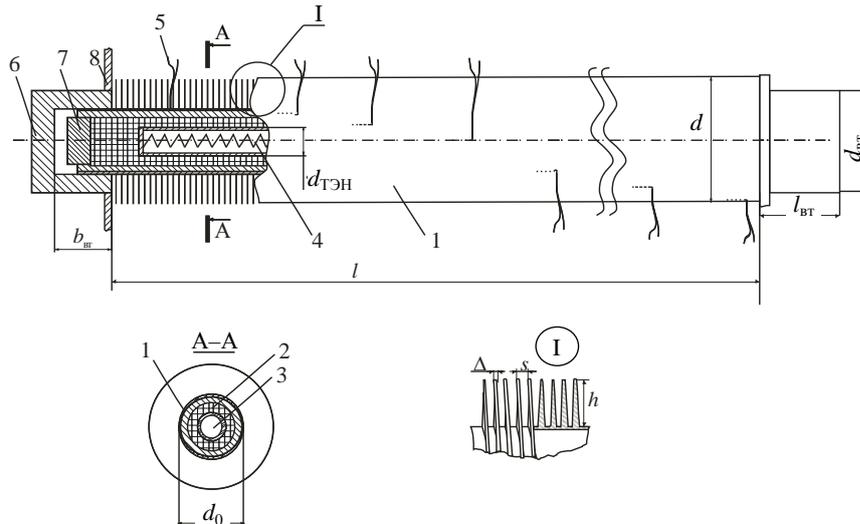


Рис. 2. Общий вид calorиметрической трубы: 1 – биметаллическая ребристая труба; 2 – кварцевый песок; 3 – трубчатый электронагреватель; 4 – спираль трубчатого электронагревателя; 5 – хромель-алюмелевая термопара; 6 – фторопластовая втулка; 7 – керамическая шайба; 8 – трубная доска из фанеры

Fig. 2. General view of calorimeter tube: 1 – bimetallic finned tube; 2 – quartz sand; 3 – heating bundles; 4 – spiral of heating bundles; 5 – chromel-alumel thermocouple; 6 – fluoroplastic bushing; 7 – ceramic bead; 8 – tube sheet of plywood

Во время эксперимента атмосферный воздух нагревался пучком труб, а затем за счет разности плотностей горячего и холодного воздуха возникла подъемная сила, выталкивающая воздух вверх в окружающую среду. Для интенсификации свободной конвекции воздуха над экспериментальным пучком устанавливали вытяжную шахту высотой $H_{ш} = 52; 116; 148; 210$ см (рис. 1) с прямоугольным основанием, переходящим в цилиндрическую трубу диаметром 110 мм. Для измерения средней температуры воздуха на выходе из пучка (на входе в цилиндрическую часть шахты) устанавливали протарированную четырехспайную медь-константановую гипертермопару, а для учета тепловых потерь в шахте на выходе из цилиндрической трубы – медь-константановую термопару (рис. 1). Для снижения тепловых потерь вытяжную шахту снаружи покрыли слоем минерального волокна толщиной 2–3 см.

Каждую серию опытов выполняли в условиях полного теплового моделирования при фиксированной высоте вытяжной шахты. Расчет коэф-

коэффициента теплоотдачи осуществляли только по результатам проведенных измерений на калориметре. В каждой серии опытов варьировали электрическую мощность, подаваемую на трубу-калориметр, в диапазоне 60–220 Вт. Температура стенки у основания ребер изменялась от 32 до 110 °С, температура окружающего воздуха в камере составляла 17–23 °С соответственно. Время выхода установки на стационарный тепловой режим – 60–90 мин после каждого регулирования электрической мощности, подаваемой на пучок.

Средний приведенный коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), отнесенный к полной наружной поверхности

$$\alpha = \frac{Q_k}{(t_{ст} - t_0)F}, \quad (3)$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; $t_{ст}$ – средняя температура поверхности стенки у основания ребер трубы (среднеарифметическая температура по показаниям термопар), °С; t_0 – температура воздуха в камере, °С; $F = \pi d_0 \varphi$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м².

Тепловой поток Q_k , Вт, отведенный от трубы к воздуху конвекцией, рассчитывали из уравнения

$$Q_k = W - Q_{л} - Q_{п}, \quad (4)$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; $Q_{л}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт; $Q_{п}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт.

Тепловые потери $Q_{п}$, Вт, через торцевые участки оребренной трубы вычисляли на основании предварительно проведенных опытов по следующей формуле [19]:

$$Q_{п} = 0,4125 + 0,08663W + 1,41106 \cdot 10^{-4}W^2. \quad (5)$$

Результирующий тепловой поток излучения между калориметрической трубкой и камерой $Q_{л}$, Вт, образующими замкнутую систему, определяли [20]

$$Q_{л} = \varepsilon_{пр} \varphi_{т-о} \varphi_{гп-о} c_0 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы тел; $\varphi_{т-о}$ – средний угловой коэффициент излучения трубы к окружающей среде; $\varphi_{гп-о}$ – то же излучения от гладкотрубного пучка к окружающей среде; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_1, T_2 – абсолютная температура оребренной трубы и окружающего воздуха в камере, К.

Средний угловой коэффициент излучения трубы к окружающей среде рассчитывали по формуле [21]

$$\varphi_{\tau-o} = \frac{(s - \varphi_{o1-o1}(s - \Delta))d}{(d^2 - d_0^2)/2 + (s - \Delta)d_0 + \Delta d}, \quad (7)$$

где φ_{o1-o1} – угловой коэффициент излучения на себя цилиндрической поверхности диаметром d и длиной $(s - \Delta)$, замыкающей межреберную полость.

Значение φ_{o1-o1} для труб АВО может быть принято $\varphi_{o1-o1} = 0,02-0,04$ или рассчитываться согласно [22]

$$\begin{aligned} \varphi_{o1-o1} = 1 - R + \frac{H}{4} + \frac{2R}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{2\sqrt{1-R^2}}{H} \right) + \frac{H}{2\pi} \operatorname{arcsin} (1 - 2R^2) - \\ - \frac{\sqrt{H^2 + 4}}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \operatorname{arcsin} \left(1 - \frac{2R^2 H^2}{H^2 - 4R^2 + 4} \right) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где $R = d_0/d$; $H = 2(s - \Delta)/d$.

Средний угловой коэффициент излучения от гладкотрубного пучка к окружающей среде вычисляли по данным [20]

$$\varphi_{\text{п-о}} = \frac{2\sigma_1}{\pi z} \left[1 - \left(\sqrt{1 - \frac{1}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sigma_1} \operatorname{arctg} \sqrt{\sigma_1^2 - 1} \right)^z \right], \quad (9)$$

где $\sigma_1 = s_1/d$ – относительный поперечный шаг.

Приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[1 + (1/\varepsilon_{\text{эф}} - 1)\varphi_{\text{п-о}} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,66$ – эффективная степень черноты одиночной ребренной трубы [23].

Результаты эксперимента представляли в числах подобия Грасгофа и Нуссельта. При этом определяющей для теплофизических свойств воздуха λ , ν , β являлась температура окружающего воздуха t_0 . За определяющий размер принимали диаметр трубы по основанию ребер d_0 .

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи при смешанной конвекции однорядных пучков представлены на рис. 3. Анализируя данные рис. 3, можно предположить, что за счет подъемной тяги, создаваемой вытяжной шахтой, увеличиваются расход и скорость потока воздуха. Это приводит к его турбулизации и повышению теплоотдачи конвекцией в 1,5–3 раза. Поэтому возникла необходимость представить экспериментальные данные в другом виде с использованием числа Рейнольдса, отражающего влияние вынужденного движения воздуха, возникающего от подъемной силы, и усиливающее свободное движение.

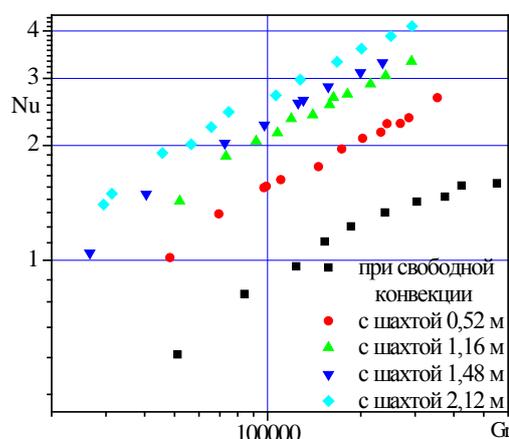


Рис. 3. Интенсификация теплоотдачи пучка воздействием вынужденной конвекцией

Fig. 3. Intensification of the heat of the bundle exposed to forced convection

Для определения скорости потока воздуха в пучке воспользуемся уравнением теплового баланса

$$Q = n(W - Q_n) = c\rho V(t_{\text{ш}} - t_0), \quad (11)$$

из которого вычислим расход воздуха V , м³/с, проходящего через однорядный пучок:

$$V = \frac{n(W - Q_n)}{c\rho(t_{\text{ш}} - t_0)}, \quad (12)$$

где Q – теплота, подведенная к потоку воздуха, проходящего через пучок, Вт; $n = 6$ – число труб в пучке, шт.; c – средняя изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха при средней температуре, кг/м³; $t_{\text{ш}}$ – средняя температура воздуха в шахте, °С.

Скорость воздуха в пучке

$$w_n = \frac{V}{f_2}, \quad (13)$$

где f_2 – площадь сжатого сечения пучка, м², рассчитываемая по формуле

$$f_2 = l \cdot n \cdot s_1 \left[1 - \left(\frac{1}{s_1} \right) d \right]. \quad (14)$$

Результаты исследования теплоотдачи при смешанной конвекции однорядных пучков в различных координатах $Nu/Re^{0.5} - Gr/Re^2$ и $Nu - 0.5Re^2$ приведены на рис. 4 [15]. Как видно, оба способа представления экспериментальных данных не позволяют получить единую критериальную зависимость.

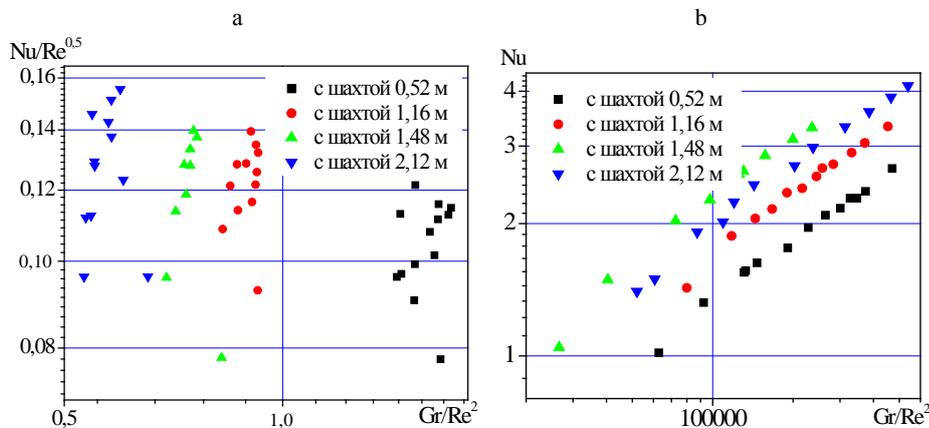


Рис. 4. Теплоотдача при смешанной конвекции однорядных пучков в различных координатах

Fig. 4. Heat interchange of mixed convection in different coordinates

Исследовали теплоотдачу при смешанной конвекции однорядных пучков в виде зависимости чисел Нуссельта от чисел Рейнольдса в логарифмических координатах. Влияние определяющей температуры воздуха на сходимость (обобщаемость) опытных данных представлено на рис. 5. При этом для построения графиков на рис. 5а число Рейнольдса рассчитывали в зависимости от температуры окружающей среды t_0 , а на рис. 5б – от средней температуры воздуха в пучке $t_{cp} = 0,5(t_0 + t_{ш})$.

Как видно из рис. 5, на обоих графиках имеется качественное степенное описание зависимостей числа Нуссельта от числа Рейнольдса, при этом все экспериментальные данные располагаются на одной линии для различных высот шахты. Следовательно, определяющими при смешанной конвекции являются скорость воздуха в пучке и число Рейнольдса, а число Грасгофа для описания процессов теплообмена не требуется.

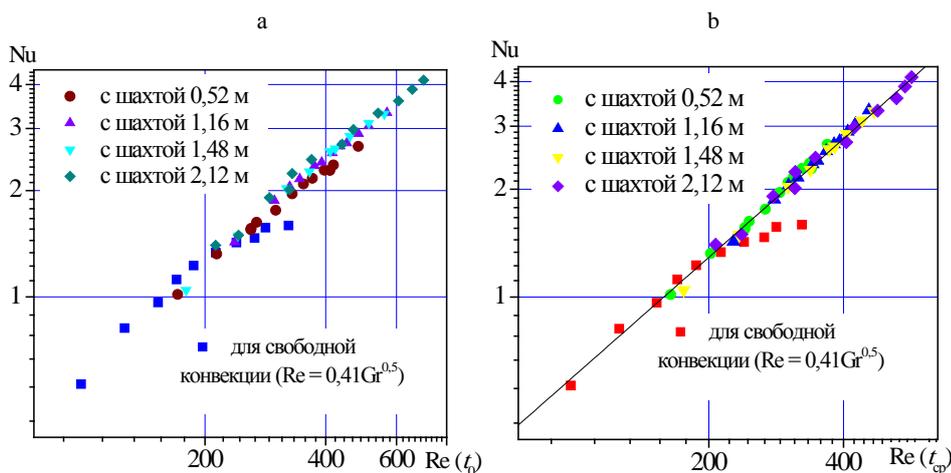


Рис. 5. Влияние определяющей температуры воздуха на сходимость опытных данных

Fig. 5. The effect of determining temperature of air on convergence of the experimental data

Наиболее качественно зависимости представлены при расчете числа Рейнольдса по средней температуре воздуха в пучке (рис. 5b), для которых было получено аппроксимационное уравнение для определения числа Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,038 \text{Re}^{1,1}. \quad (15)$$

Как видно из (15), относительный рост теплоотдачи в пучке (определяемый степенью 1,1) при смешанной конвекции с увеличением числа Рейнольдса более существенен по сравнению с ростом теплоотдачи при вынужденной конвекции воздуха (степень 0,7–0,8). Следовательно, это еще раз подтверждает, что организация малозатратной смешанной конвекции даст значительный энергосберегающий эффект по сравнению с обеспечением вынужденной конвекции воздуха.

Анализируя приведенные выше графики, можно сделать предположение: поскольку движение воздуха обусловлено только подъемными силами, возникшими из-за перепада температур потока в пучке и шахте по сравнению с окружающей средой, в этом случае действительно ранее высказанное предположение [18], что число Грасгофа эквивалентно квадрату числа Рейнольдса. Для изучения данного предположения на рис. 6 приведены зависимости числа Рейнольдса от корня из числа Грасгофа. Как видно, эти зависимости близки к линейным, т. е. имеется прямая пропорциональная связь между корнем из числа Грасгофа и числом Рейнольдса для каждой высоты шахты. Путем аппроксимации экспериментальных данных получены коэффициенты пропорциональности $k_{\text{пр}} = 0,795$ (1,055; 1,596; 1,327) соответственно для шахты высотой $H_{\text{ш}} = 52$; 116; 148; 210 см.

Следовательно, $\text{Re} = k_{\text{пр}} \text{Gr}^{0,5}$. Преобразовав это выражение, получим

$$v^2 = k_{\text{пр}}^2 g \beta d_0 (t_{\text{ст}} - t_0). \quad (16)$$

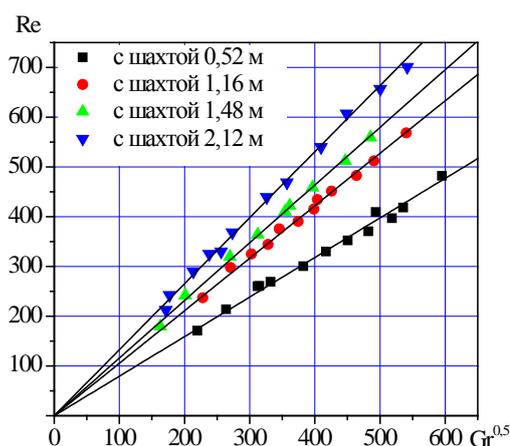


Рис. 6. Зависимость числа Рейнольдса от квадратного корня из числа Грасгофа

Fig. 6. The dependence of the Reynolds number on the square root of the number Grashof

Однако скорость потока воздуха в пучке можно определить через равенство потери давления потока воздуха в шахте и пучке, а также подъемно-вытяжного давления шахты

$$v = \left(\frac{2(\rho_0 - \rho_{\text{ш}})g(H_{\text{ш}} + d_0)}{\rho_{\text{п}}k_{\text{п}} + \rho_{\text{ш}}k_{\text{ш}} \frac{H_{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}}} \right)^{0.5}, \quad (17)$$

где $k_{\text{п}}$, $k_{\text{ш}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления пучка и шахты, рассчитанный через скорость потока воздуха в пучке.

Объединив (16) и (17), получим выражение для определения коэффициента пропорциональности

$$k_{\text{пр}} = \left(\frac{2(\rho_0 - \rho_{\text{ш}})(H_{\text{ш}} + d_0)}{\left(\rho_{\text{п}}k_{\text{п}} + \rho_{\text{ш}}k_{\text{ш}} \frac{H_{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}} \right) \beta d_0 (t_{\text{ст}} - t_0)} \right)^{0.5}. \quad (18)$$

При отсутствии шахты ($H_{\text{ш}} = 0$) из (17) и (18) можно найти скорость потока в пучке и коэффициент пропорциональности при свободной конвекции воздуха:

$$v = \left(\frac{2(\rho_0 - \rho_{\text{ш}})gd_0}{\rho_{\text{п}}k_{\text{п}}} \right)^{0.5};$$

$$k_{\text{пр}} = \left(\frac{2(\rho_0 - \rho_{\text{ш}})}{\rho_{\text{п}}k_{\text{п}}\beta(t_{\text{ст}} - t_0)} \right)^{0.5}.$$

В процессе исследований авторами статьи определен коэффициент пропорциональности в отсутствие шахты для опытного пучка $k_{\text{пр}} = 0,41$ и построена зависимость $Nu = f(0,41Gr^{0.5})$ (рис. 5, закрашенные квадратики), которая хорошо согласуется с $Nu = f(Re)$. Можно отметить, что характер движения частиц воздуха в пучке при свободной конвекции идентичен движению частиц при вынужденной конвекции при малых числах Рейнольдса, т. е. свободно-конвективный поток при возникновении дополнительных движущих сил плавно перетекает в вынужденно-конвективный без характерных провалов или скачков.

Некоторое отклонение зависимости $Nu = f(0,41Gr^{0.5})$ при свободной конвекции от линейной в верхней области при высоких температурах ($t_{\text{ст}} > 90$ °C), скорее всего, связано с особенностью изменения физических свойств воздуха и с влиянием диффузных сил в воздухе над пучком. В области высоких температур вязкость воздуха существенно увеличивается, что приводит к идентичному росту аэродинамического сопротивления пучка при движении воздуха в узких межреберных щелях. Также становятся больше диффузные силы, отчего возникают значительные горизонтальные перемещения, которые увеличивают поперечное сечение,

но препятствуют росту столба теплого воздуха над пучком. В результате температура выше 90 °С не приводит к увеличению скорости потока и росту числа Нуссельта. Изменение вязкости воздуха не оказывает существенного влияния на значение аэродинамического сопротивления шахты, а в ограниченном пространстве поток воздуха движется только вертикально вверх, поэтому не наблюдается отклонение $Nu = f(Re)$ от линейной зависимости (рис. 5а, б).

ВЫВОДЫ

1. Теплоотдача при смешанной конвекции в 2,5–3 раза выше, чем при свободной, а интенсивность роста теплоотдачи при увеличении числа Рейнольдса больше, чем при вынужденной конвекции.

2. При смешанной конвекции, организованной за счет установки над пучком вытяжной шахты, число Нуссельта имеет единую степенную зависимость от числа Рейнольдса при любой высоте шахты, а также существует линейная зависимость числа Рейнольдса от корня из числа Грасгофа. Коэффициент пропорциональности определяется через коэффициенты аэродинамического сопротивления шахты и пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунтыш, В. Б. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников / В. Б. Кунтыш, А. Н. Бессонный. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
2. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
3. Аппарат воздушного охлаждения: пат. 9446 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалеев, В. П. Мулин; дата публ. 30.08.2013.
4. Кунтыш, В. Б. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Самородов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.
5. Короленко, Ю. А. Теплоотдача от горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции / Ю. А. Короленко // Известия Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С. М. Кирова. 1962. № 110. С. 26–33.
6. Мачулин, В. И. Теплообмен вертикального ряда труб при естественной конвекции воздуха / В. И. Мачулин // Холодильная техника. 1976. № 7. С. 24–25.
7. Кунтыш, В. Б. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер / В. Б. Кунтыш, А. В. Позднякова, В. И. Мелехов // Изв. вузов. Лесной журнал. 2002. № 2. С. 116–119.
8. Кунтыш, В. Б. Исследование теплоотдачи однорядных пучков из оребренных труб при совместном действии свободной и вынужденной конвекции воздуха / В. Б. Кунтыш, А. И. Самылов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1999. № 4. С. 59–68.
9. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Й. Джалурия; пер. с англ. С. Л. Вишневецкого; под ред. В. И. Полежаева. М.: Мир, 1983. 399 с.
10. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен: в 2 кн. / Б. Гебхарт [и др.]; пер. с англ. М.: Мир, 1991. Кн. 1. 678 с.
11. Гусев, С. Е. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / С. Е. Гусев, Г. Г. Шкловер. М.: Энергоатомиздат, 1992. 160 с.
12. Новожилова, А. В. К расчету теплообмена коридорных пучков из биметаллических ребристых труб при различных углах наклона труб в режиме свободной конвекции / А. В. Но-

- вожилова, З. Г. Марьяна, Е. А. Львов // Тез. докл. и сообщений XV междунар. форума по тепло- и массообмену, Минск, 23–26 мая 2016 г. Минск, 2016. С. 157–161.
13. Кунтыш, В. Б. Перевод эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в энергосберегающий режим. Технические решения с расчетом экономического эффекта / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Самородов // Химическая техника. 2014. № 6. С. 20–25.
 14. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман, Б. А. Алешин // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
 15. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен: справ. / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.
 16. Новожилова, А. В. Анализ методик определения теплоотдачи воздуха на оребренных поверхностях нагрева при свободной конвекции / А. В. Новожилова // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. Архангельск: Северный (Арктич.) федеральный ун-т, 2010. С. 88–97.
 17. Кунтыш, В. Б. Экспериментальная установка и методика исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха / В. Б. Кунтыш, А. В. Самородов, А. И. Самылов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск, 1998. Вып. 4. С. 139–149.
 18. Кунтыш, В. Б. О нетрадиционном представлении опытных данных по свободно-конвективному теплообмену / В. Б. Кунтыш, В. В. Дударев // Труды БГТУ. Сер. III: Химия и технология неорганич. в-в. 2008. Вып. XVI. С. 10–12.
 19. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной оребренной трубы при различных углах наклона / А. Б. Сухоцкий [и др.] // Труды БГТУ. Сер. I: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. Минск: БГТУ, 2017. № 1. С. 169–175.
 20. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками / А. В. Самородов. СПб.: СПбГТУ, 1999. С. 3–22.
 21. Самородов, А. В. К расчету теплообмена излучением круглоребристых труб и пучков / А. В. Самородов // Тр. лесинж. факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.
 22. Блох, А. Г. Теплообмен излучением / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1974. 247 с.
 23. Сидорик, Г. С. Экспериментальная установка для исследования свободноконвективного теплообмена ребристых труб воздухоохлаждаемых теплообменников / Г. С. Сидорик // Политехнический молодежный журнал МГТУ имени Н. Э. Баумана. 2016. № 2. С. 1–7.
- Поступила 01.03.2017 Подписана в печать 10.05.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Kuntyshev V. B., Bessonnyi A. N. (2000) *Examples of Calculations of Non-Standardized Efficient Heat Exchangers*. St.-Petersburg, Nedra Publ. 300 (in Russian).
2. Kuntyshev V. B., Bessonnyi A. N. (eds.) (1996) *Fundamentals of Calculation and Design of Heat Exchangers of Air Cooling*. St.-Petersburg, Nedra Publ. 512 (in Russian).
3. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Minnigaleev A. Sh., Mulin V. P. (2013). Air Cooling Apparatus. Patent Republic of Belarus No 9446 (in Russian).
4. Kuntyshev V. B., Sukhotskii A. B., Samorodov A. V. (2013) Engineering Method for Thermal Calculation of an Apparatus for Air Cooling by Free Convection Heat Transfer. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie* = Chemical and Petroleum Engineering, (12), 3–6 (in Russian).
5. Korolenko Yu. A. (1962) Heat Transfer from a Horizontal Bundle of Tubes to the Air under Free Convection. *Izv. Tomskogo Ordena Trud. Krasn. Znameni Politekh. In-ta imeni S. M. Kirova* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute named after S. M. Kirov], (110), 26–33 (in Russian).
6. Machulin V. I. (1976) Heat Transfer of a Vertical Row of Tubes in Natural Air Convection. *Kholodil'naya Tekhnika* [Refrigeration Equipment], (7), 24–25 (in Russian).

7. Kuntysh V. B., Pozdnyakova A. V., Melekhov V. I. (2002) Heat Transfer by Natural Convection of Vertical Finned Tubes of Drying Kilns Calorifers. *Izvestiya Vuzov. Lesnoi Zhurnal* = Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry Journal, (2), 116–119 (in Russian).
8. Kuntysh V. B., Samylov A. I. (1999) The Study of Heat Transfer from Single-Row Bundles of Finned Tubes under the Joint Action of Free and Forced Air Convection. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 59–68 (in Russian).
9. Jaluria Y. (1980) Natural Convection: Heat and Mass Transfer. NY, Pergamon Press (Russ. ed.: *Estestvennaya Konveksiya: Teplo- i Massoobmen*. Moscow, Mir Publ. 399).
10. Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R. L., Sammakia B. (1988) *Buoyancy-Induced Flows and Transport*. New York, Hemisphere Publishing Corp., 678.
11. Gusev S. E., Shklover G. G. (1992) *Free-Convection Heat Transfer in Body External Streamlining*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 160 (in Russian).
12. Novozhilova A. V., Mar'ina Z. G., L'vov E. A. (2016) Towards the Calculation of Heat Transfer in-Line Bundles of Bimetallic Finned Tubes with Different Inclination Angles of the Tubes in Free Convection. *Tez. Dokl. i Soobshchenii XV Mezhdunar. Forumu po Teplo- i Massoobmenu* [Abstracts of Presentations and Communications at the XVth International Forum on Heat and Mass Exchange, Minsk, 23–26 May]. Minsk, 157–161 (in Russian).
13. Kuntysh V. B., Sukhotskii A. B., Samorodov A. V. (2014) The Transfer of the Air-Cooling Unit Operation in an Energy Saving Mode. Technical Solutions with a Calculation of Economic Effect. *Khimicheskaya tekhnika* [Chemical Engineering], (6), 20–25 (in Russian).
14. Mil'man O. O., Aleshin B. A. (2005) Experimental Investigation of Heat Transfer During the Natural Circulation of Air in a Model of an Air Condenser with an Exhaust Shaf. *Thermal Engineering*, 52 (5), 369–373.
15. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. (1982) *Free-Convective Heat Transfer*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 400 (in Russian).
16. Novozhilova A. V. (2010) Analysis of Methods for Determining Heat Transfer of Air on Finned Heating Surfaces under Free Convection. *Problemy Teploenergetiki Evropeiskogo Severa: Sb. Nauch. Tr.* [Problems of Power Engineering in the European North: Collected Research Works]. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University, 88–97 (in Russian).
17. Kuntysh V. B., Samorodov A. V., Samylov A. I. (1998) Experimental Unit and Methods of Research of Heat Transfer of Bundles of Finned Tubes in Mixed Air Convection. *Okhrana Okruzhayushchei Sredy i Ratsional'noe Ispol'zovanie Prirodnnykh Resursov: Sb. Nauch. Tr.* [Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources: Collected Research Works]. Arkhangelsk, (4), 139–149 (in Russian).
18. Kuntysh V. B., Dudarev V. V. (2008) On Non-Traditional Presentation of Experimental Data on Free Convective Heat Transfer. *Trudy BGTU. Ser. III. Khimiya i Tekhnologiya Neorganicheskikh Veshchestv* [Proceedings of BSTU. Ser. III. Chemistry and Technology of Inorganic Substances], Is. XVI, 10–12 (in Russian).
19. Sukhotskii A. B., Farafontov V. N., Filatov S. O., Sidorik G. S. (2017) Development of the Stand and Investigation of Free Convection Finned Single Tubes at Different Inclination Angles; *Trudy BGTU. Ser. I. Lesnoe Khozyaistvo, Prirodopol'zovanie i Pererabotka Vozobnovlyаемых Resursov* = Proceedings of BSTU. Ser. I. Forestry, Environmental Management and Recycling Renewable Resources. Minsk, Belarusian State Technological University, (1), 169–175 (in Russian).
20. Samorodov A. V. (1999) *Amending of the Method of Thermal Calculation and Design of Air Coolers with Staggered Finned Bundles*. St.-Petersburg, St. Petersburg State Technical University, 3–22 (in Russian).
21. Samorodov A. V. (1999) Towards the Calculation of the Radiative Heat Transfer of Circular-Finned Tubes and Bundles. *Tr. Lesoinzh. Fakul'teta Petrozavodskogo Gos. Un-ta* [Proceedings of the Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University], (2), 135–142 (in Russian).
22. Blokh A. G., Zhuravlev Yu. A., Ryzhkov L. N. (1974) *Radiative Heat Transfer*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 247 (in Russian).
23. Sidorik G. S. (2016) The Experimental Unit for the Study of Free-Convective Heat Transfer of Finned Tubes of Air-Cooled Heat Exchangers; *Politekhnikeskii Molodezhnyi Zhurnal MGTU im. Baumana* = Politechnical Student Journal of BMSTU, (2), 1–7 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-367-379

UDC 621.311.25

The Improvement of Low-Waste Technologies of Working Body of Water Preparation at Thermal and Nuclear Power Plants

K. D. Rymasheuskaya¹⁾

¹⁾RUE “Belniপিenergoprom” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In the present work the main directions of water desalination technologies improving have been analyzed. Possible techniques of high-quality treatment of water that enable the reduction of amounts of environmentally hazardous substances to be discharged into the hydrosphere are indicated. The purpose of the work was to improve the ecological efficiency and the effectiveness of water treatment equipment at heat power plants when designing new and the modernizing existing water treatment schemes. In order to achieve this goal the following problems have been solved: the one of analyzing the main directions of the improvement of technologies of working body of water preparation at thermal and nuclear power plants; of analyzing the main directions of reduction of total volume of highly mineralized power plant wastewaters; of developing the technological scheme of recycling of concentrate of membrane installations and regenerants of ionite filters in acid and alkali; of developing the technological scheme of transformation of the sludge in pre-processing waste into valuable commodity products. The results of research can be applied for the design of new and the modernization of existing water treatment installations of thermal and nuclear power plants. It will enable to reduce considerably the use of natural water and the amount of chemicals added as well as the volume of wastewater and the concentration of dissolved solids in it. As a consequence, the negative impact of thermal and nuclear power plants on the hydrosphere will be reduced.

Keywords: water treatment plant, low-waste technologies, water desalination, closed cycle of water use, membrane technologies of water desalination, ion exchange

For citation: Rymasheuskaya K. D. (2017) The Improvement of Low-Waste Technologies of Working Body of Water Preparation at Thermal and Nuclear Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 367–379. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-367-379

Совершенствование малоотходных технологий подготовки водного рабочего тела на тепловых и атомных электрических станциях

Е. Д. Римашевская¹⁾

¹⁾РУП «Белнипиэнергопром» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проанализированы основные направления совершенствования технологий обезсоливания воды, представлены возможные пути снижения нагрузки водоподготовительных

Адрес для переписки
Римашевская Екатерина Дмитриевна
РУП «Белнипиэнергопром»
ул. Романовская Слобода, 5а,
220048, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 105-75-00
katiarim1993@gmail.com

Address for correspondence
Rymasheuskaya Ekaterina D.
RUE “Belniপিenergoprom”
5a Romanovskaya Sloboda str.,
220048, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 105-75-00
katiarim1993@gmail.com

систем на гидросферу. Предмет исследований – ресурсосбережение и повышение экологической безопасности вновь вводимого и реконструируемого водоподготовительного оборудования на тепловых электрических станциях путем проведения сравнительного анализа технологий обессоливания воды и выявления наиболее экономически и экологически выгодной схемы подготовки добавочной воды. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ основных направлений совершенствования технологий обессоливания воды для тепловых и атомных электрических станций; исследование основных путей снижения общего количества сточных вод тепловых электрических станций; разработка технологических схем переработки концентрата мембранных установок и отработанных регенерационных растворов ионитных фильтров в кислоту и щелочь и шлама предочистки – в ценные товарные продукты. Результаты работы могут быть применены в процессе проектирования новых и модернизации существующих водоподготовительных установок тепловых и атомных электрических станций, что позволит значительно сократить использование природной воды и реагентов для регенерации, а значит, минимизировать объем сточных вод и их солесодержание и снизить за счет этого нагрузку тепловых и атомных электростанций на гидросферу.

Ключевые слова: водоподготовительная установка, малоотходные технологии, обессоливание воды, замкнутый цикл водопользования, мембранные технологии в водоподготовке, ионный обмен

Для цитирования: Римашевская, Е. Д. Совершенствование малоотходных технологий подготовки водного рабочего тела на тепловых и атомных электрических станциях / Е. Д. Римашевская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 367–379. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-367-379

The current state of technology of working body of water preparation on thermal power plants in the Republic of Belarus is determined by the state and prospects of development of main power equipment. Today, more than 90 % of country's power is generated in thermal power plants that were commissioned lots of years ago. Traditionally used in the Belarusian energy system methods and technologies of physical and chemical treatment of natural water for steam generators feed allow to provide the high quality of desalinated water, guarantee the long-term reliable work of main power equipment, are easy to automate and to operate. Despite all the advantages of these water desalination technologies a serious problem of such water treatment plants is the use a significant amounts of chemicals and the formation of highly mineralized acidic and alkaline wastewaters as a result [1, 2]. Under the circumstances when prices for ion-exchange resins, acid and alkali as well as expenses for water use and wastewater disposal costs are permanently increasing water treatment technologies must be improved and developed. So the aim to increase the economic efficiency of water purification systems and to reduce their negative impact on the environment is of special significance nowadays [3].

Currently, desalination for thermal power plants steam generators feed water preparation is mainly based on traditional technological schemes. These schemes include preliminary water treatment stage in sludge blanket clarifiers and filtration in clarification filters and a subsequent step of the two-stage chemical softening (by the bed of strong acid cation exchange resin in the sodium form) or desalination (which include a strong acid cation unit and a strong base anion unit). Clarification filters are loaded with granular material (hydroanthracite or crushed anthracite) to the height not more than 1.0 m [4, 5].

As a result of the operation of the currently used makeup water treatment plants, the highly mineralized acidic and alkaline wastewaters are formed. That is why the tasks of modern water treatment plant are [6]:

- to provide stable quality of desalinated water;
- to provide long-term reliability and operating stability of the main power equipment;
- to reduce operating costs;
- to minimize the amount of wastewater discharges.

Application of modern water desalination technologies (for pretreated water) such as counter-current ion exchange, membrane and thermal desalination technologies as well as implementation of brine concentrators followed by a brine crystallizer or an evaporation pond (designed for eliminating any liquid waste leaving the power plant while the produced solids are recovered as valuable salt byproducts) would allow to solve the problem of reduction of total volume of highly mineralized power plant wastewaters[7–9].

In the world practice of water treatment the following tendencies could be marked out [10]:

- economy of fresh water;
- reduction of chemicals used as a result of practical implementation of reagent-free methods of water desalination;
- reduction of the environmental impact of water purification systems as a result of wastewater discharges minimization;
- practical implementation of closed cycles of water use as well as technological schemes of wastewater recycling and reuse.

So recovery and recycling of wastewater is becoming a growing trend [11]. Wastewater reuse not only minimizes the volume and environmental risk of discharged wastewater, but also alleviates the pressure on ecosystems resulting from freshwater withdrawal. Through reuse, wastewater is no longer considered a “pure waste” that potentially harms the environment, but rather an additional resource that can be harnessed to achieve water sustainability [12].

A water desalination technology for thermal power plants could be considered as a near-zero liquid discharge if the wastewater total dissolved solids (TDS) is not higher than TDS of raw water, and as a zero liquid discharge if no effluent is left over. A Zero liquid discharge facility is an industrial plant that eliminates liquid waste leaving the power plant, with the majority of water being recovered for reuse. This target could only be reached using integrated approach to solving the thermal power plant wide problem of wastewater formation, reclamation and reuse [13].

One of the possible ways of reducing the total amount of wastewater discharges is that at least 50 % of makeup water treatment plant wastewaters (including all wastewaters from pretreatment, waste waters after ionite filters backwash and also water discharged when emptying clarification and ionite filters) have the same or even better salinity, hardness, alkalinity and other indicators than those of the pretreated water as well as of raw water. That is why such wastewaters could be used as a raw water for clarification filters or even for

Sodium-cationite filters without additional chemicals added. To further minimize the amount of thermal power plant wastewaters the following measures must be taken [14]:

- water desalination using counter-current ion exchange technologies;
- thoroughfare regeneration of a weak and a strong resin filters connected in series (the regenerant pass first through the strong, then through the weak resin filter) (fig. 1);
- rinse recycling and reuse;
- partial water desalination using membrane technologies (reverse osmosis (RO), electrodialysis (EDI), electro deionization);
- application of thermal desalination technologies [15] (multi-stage flash distillation (fig. 2), multiple-effect distillation (fig. 3)) [14];
- implementation of electrodialysis to the recovery of acids and alkali from thermal power plants acidic and alkaline wastewaters correspondently;
- application of electrodeionization;
- application of electrocoagulation.

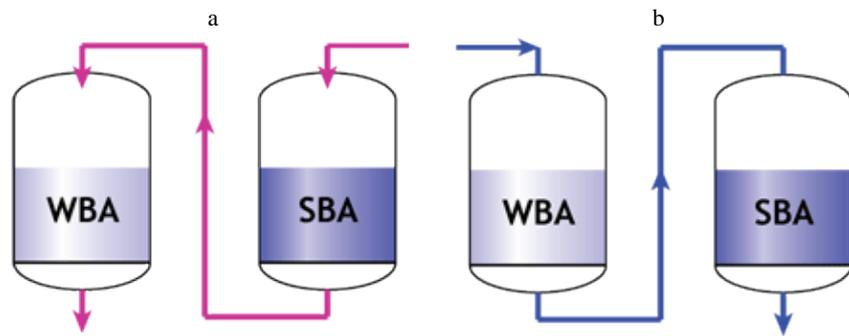


Fig. 1. Ion exchange process regeneration:
 a – separate columns in service; b – separate columns in regeneration

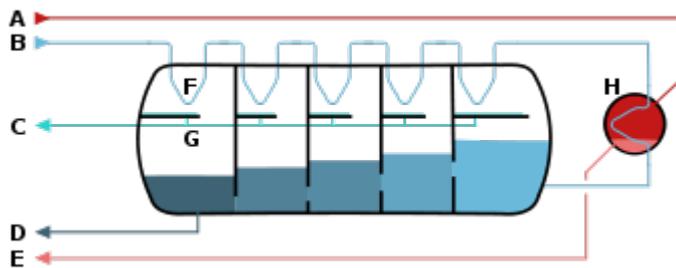


Fig. 2. The schematic of a 'once-through' multi-stage flash desalinator: A – steam in; B – seawater in; C – potable water out; D – waste out; E – steam out; F – heat exchange; G – condensation collection; H – brine heater

Theoretically, the most promising zero liquid discharge technology is thermal desalination, where the feed wastewater undergoes a pretreatment step that reduces scaling potential, and is then concentrated sequentially by two core elements – a brine concentrator and a brine crystallizer (or an evaporation pond) [16].

The distillates generated by the brine concentrator and crystallizer units are reused as clean product water, whereas the solids produced are either stored (in evaporation ponds), further processed for landfill disposal, or reused as valuable byproducts. But taking into account high capital cost as well as intensive energy consumption required, this way of solving the thermal power plant wide problem of wastewater formation, reclamation and reuse is considered as not viable [17]. A water desalination technology could be considered as a viable one when the produced solids are recovered as valuable salt byproducts or when the amount of wastewater formation is at minimum possible level [18].

But while designing low-waste water treatment plants the following problems occur [19]:

- absence of serial equipment for production of solids (the absence of brine crystallizers for sedimentation of substances with low solubility; absence of reactors that allow to recover separate components from produced solids; absence of regulating and shut-off valves for corrosive-active agents);

- absence of serial equipment for deep concentrating of wastewaters;
- absence of technologies of recovering valuable salt byproducts from waste;
- absence of systems of automatic control and analysis of zero liquid discharge technologies.

In recent years membrane desalination technologies has emerged as the most viable solution to environmental impact reduction [20, 21]. The possibility of dissolved solids and organic impurities removal with almost no chemicals added predetermines the current interest to the use of these technologies for water desalination on thermal and nuclear power plants in the Republic of Belarus [22].

Of the many available desalination technologies, two membrane processes – reverse osmosis and electrodialysis – are most widely used in power engineering [23]. Such widespread use would not have been possible without the advances made in membrane technology over the last decades. Depending on the nature of driving forces applied, ion exchange membranes (cationite, anionite, bipolar) let through the water but retains the salt and other impurities or vice

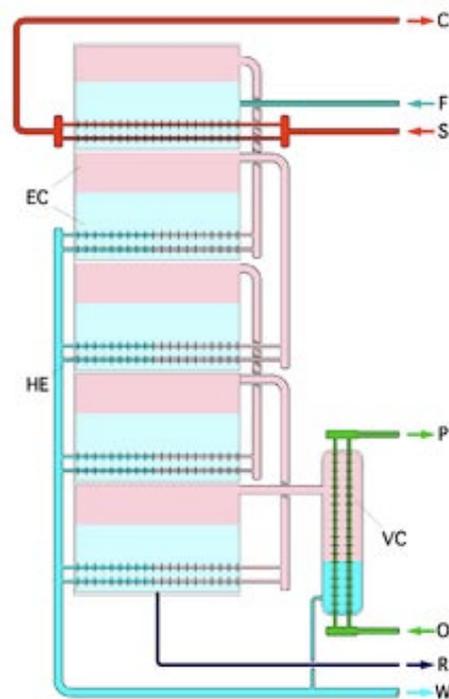


Fig. 3. Schematic of a multiple effect of the desalination plant (the first stage is at the top): the pink areas – vapor; the lighter blue areas – liquid feed water; dark turquoise – condensate; F – feed water in; S – heating steam in; C – heating steam out; W – fresh water (condensate) out; R – brine out; O – coolant in; P – coolant out; VC – the last-stage cooler

versa. In particular, by applying a pressure difference (reverse osmosis), the permeating component(s), in most applications nearly exclusively water, are forced through the semi-permeable membrane while all ions are rejected to the maximum extent [24]. However, when applying an electric potential as the driving force to remove dissolved ions, ion exchange membranes selectively permit the transport of counter ions but prevent the passage of co-ions.

The positive aspect of membrane technologies application is almost complete automation of the chemical water treatment system and 3–4 times reduction the costs of traditional chemicals use (acid, alkali, salt), qualitative change of waste water chemical composition [20, 25].

The experience of operation of reverse osmosis installations shows that the main factor that affects the satisfactory performance of the membrane is the observance of the norms of quality of raw water supplied to the installation [26]. The analysis manufacturers' requirements shows that there is virtually no restrictions to total dissolved solids in fresh water to be treated in reverse osmosis units. The units can operate in a wide range of pH too. Only the content of the substances that can cause poisoning or clogging of the membranes are limited [20]. However, RO, although much more energy efficient than thermal evaporation, can be applied only to feedwaters with a limited salinity range.

Electrodialysis (fig. 4) is another membrane-based process but it is worth applying only to feedwaters with a high salinity (1.5–15.0 g/l). That is why electrodialysis is widely applied in sea water desalination and industrial wastewater management [27, 28].

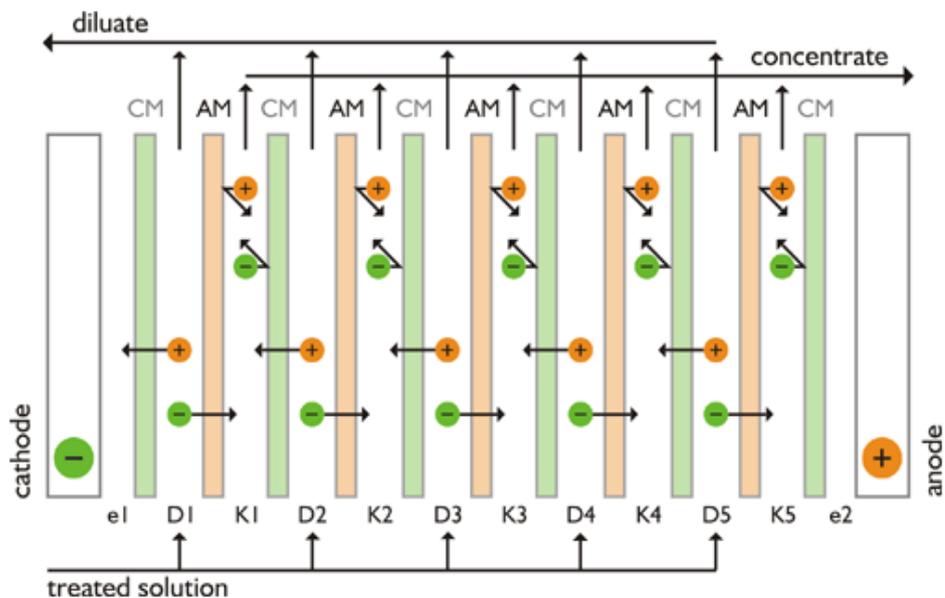


Fig. 4. The scheme of ion separation in membrane bundle: CM – cation exchange membrane; D – diluate chamber; e1, e2 – electrode chambers; AM – anion exchange membrane; K – concentrate chamber

Electrodialysis applies an electric potential as the driving force to remove dissolved ions through ion exchange membranes. In contrast to RO membranes that reject all ions, ion exchange membranes selectively permit the transport of counter-ions but prevent the passage of co-ions [29].

The amount of energy consumption depends both on the feed water quality, which is mainly characterized by its total dissolved solids content (TDS value), and on the membrane quality. Electrodialysis membranes must meet the following requirements [30]:

- high selectivity;
- low permeability for water;
- conductivity;
- high chemical stability.

The development and practical application of technological schemes of the most dangerous for hydrosphere acidic and alkaline wastewaters treatment is the possible way of reducing the negative impact of thermal and nuclear power plants on the hydrosphere too [31, 32]. The most promising way of extracting acids and alkali from such wastewaters is the development and practical application of electrodialysis units.

Considering the bipolar membrane electrodialysis unit as a black box, it allows to produce an acid and a base from a neutral salt feed stream (fig. 4). Bipolar membrane electrodialysis can become interesting if either the acid or the base is the desired product [33].

Promising applications have been investigated in acid and base production, in the acidification of product streams, or for special separations, such as the separation of amino-acids on the basis of their isoelectric points [34]. The economically most interesting applications can reduce side products or achieve process schemes not possible before [35]. As an example, sodium lactate from a fermentation step can be converted into lactic acid by bipolar membrane electrodialysis [36]. The side product, sodium hydroxide, can be used to control the fermentation reaction. Designing bipolar membrane, electrodialysis provides increasing prospects for its economic feasibility, however, it also increases the complexity and challenges that have to be met.

However, there are some difficulties when using electrodialysis units for wastewater treatment. The reasons of these difficulties are [37]:

- high salinity of water to be treated that results in high current density; it can cause membranes burnout in case of irregular operation of membrane cells;
- high organic impurities and iron compounds content in waste water that can result in membrane poisoning;
- diffusion and electroosmotic processes when the salinity difference between concentrate chambers and dilute chambers is high;
- the possibility of insoluble compounds formation on membranes' surfaces.

Electrodeionization uses the water purification benefits of ion exchange resin while eliminating the disadvantages of chemical regeneration, which is done by combining ion exchange resin with electrodialysis. The elements required for the electrodialysis (EDI) process consist of ion selective cation and anion mem-

branes, electrodes, concentrate chambers, dilute chambers and direct (DC) current. The result is electrodeionization, which is a continuous, chemical-free system which generates high resistivity water. However, some problems can occur inside the electrodeionization modules when operating requirements aren't met:

- irreversible scaling in the concentrate chamber when recovery rate and feed water quality isn't be controlled strictly (recovery rate is determined by the feed water total hardness);
- severe and irreversible module damage when feed water specifications isn't strictly adhered to;
- buildup when gases (hydrogen, oxygen, chlorine) from water electrolysis been produced at the electrodes and carried away in the electrode flush and concentrate stream aren't vented;
- poor EDI performance and/or irreversible scaling in the concentrating chambers due to polymerization of silica when influent silica levels are high.

Other desalination technologies are used less widely due to their rudimentary development and/or higher cost. However, there is no single desalination technology that is considered "best" for all uses. The selection of the most appropriate technology depends on the composition of the feed water (prior to desalination), the desired quality of the product water, and many other site-specific factors.

The proper choice of a desalination technology to be applied will depend on the feed water quality, which is mainly characterized by its total dissolved solids content (TDS value). The treated water quality requires so that the costs and environmental impact of the desalination technology applied must be minimized [36, 38, 39].

CONCLUSIONS

1. In the present work the main directions of water desalination technologies improving are analyzed. The comparative analysis of desalination technologies for the design of low-waste water treatment is carried out. The comparative evaluation of ecological efficiency of ion exchange and membrane desalination schemes of water desalination on thermal and nuclear power plants is obtained.

2. The results of research can be applied for the design of new and the modernization of existing water treatment plants of thermal power plants. It will allow to considerably reduce the use of natural water and the amount of chemicals added as well as the volume of wastewater and the concentration of dissolved solids in it. It will help to reduce the negative impact of thermal power plants on the hydrosphere.

REFERENCES

1. Rimashevskaya E. D. (2015) The State of the Technology of Preparation of Water of Working Medium at a Heat Power Plant of the Republic of Belarus. *Aktualnye Problemy Energetiki: Materialy 71-i Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov* [Topical Problems of Power Engineering: Proceedings of the 71st Scientific-and-Technical Conference of Students]. Minsk, Belarusian National Technical University, 226–227 (in Russian).
2. Rimashevskaya E. D. (2015) Analysis of Technical Efficiency of the Use of the Promising Patterns of Ion Exchangers in Water Demineralization in Nuclear Power Plants. *Energetika:*

- Effektivnost, Nadezhnost, Bezopasnost: Materialy XXI Vseros. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Energy: Efficiency, Reliability, Safety: Proceedings of the XXIst All-Russian Scientific-and-Technical Conference. Vol. 1]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 261–263 (in Russian).
3. Tong T., Elimelech M. (2016) The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies and Future Directions. *Environmental Science & Technology*, 50 (13), 6846–6855. DOI: 10.1021/acs.est.6b01000.
 4. Rimashevskaya E. D. (2015) Improvement of Low-Waste Technologies of Chemical Water Purification. *Aktualnye Problemy Energetiki: Materialy 71-i Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov* [Topical Problems of Power Engineering: Proceedings of the 71st Scientific-and-Technical Conference of Students]. Minsk, Belarusian National Technical University, 254–257 (in Russian).
 5. Chizh V. A., Rimashevskaya E. D. (2014) Ways to Improve Pre-Treatment of Water at a Heat Power Plant. *Energetika i Energoberezhenie: Teoriya i Praktika: Materialy I Vseros. Nauch.-Prakt. Konf.* [Energy and Energy Efficiency: Theory and Practice. Proceedings of the Ist All-Russian Scientific-and-Practical Conference]. Kemerovo, Kuzbas State Technical University named after T. F. Gorbachev. Available at: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2014/oldenerg1/energ1/pages/Articles/1/Chizh.pdf>. (Accessed: 1 August 2016) (in Russian).
 6. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. (2012) Fibrous Ion Exchangers. Inamuddin Dr. Mohammad Luqman (eds.). *Ion Exchange Technology: Theory and Materials*. Springer, 299–371. DOI: 10.1007/978-94-007-1700-8_9.
 7. Rimashevskaya E. D., Chizh V. A. (2016) The Use of Modern Environmental and Resource-Saving Technologies of Desalination of Water when Designing the Water Treatment Installations of Heat and Nuclear Power Plants. *Sbornik Nauchnykh Rabot Studentov Respubliki Belarus "NIRS 2015"* [Collection of Scientific Works of Students of the Republic of Belarus "NIRS 2015"]. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University, 124 (in Russian).
 8. Tchobanoglous G., Leverenz H. (2009) Impacts of New Concepts and Technology on the Energy Sustainability of Wastewater Management. *Conference on Climate Change, Sustainable Development and Renewable Resources in Greece*, Oct. 17, 2009.
 9. Larin B. M., Korotkov A. N., Oparin M. Yu., Larin A. B. (2010) Experience Gained from Putting New Technologies of Water Treatment in Use at Thermal Power Stations. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 57 (8), 646–652. DOI: 10.1134/S0040601510080033.
 10. Odoevtseva M. V., Chekunov S. S., Gromova I. V. (2015) Assessment of Efficiency of Application of the Combined Scheme of Treatment of Salted Drains. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, (17–18), 158–161 (in Russian). DOI:10.15518/isjaee.2015.17-18.025.
 11. Grant S. B., Saphores J.-D., Feldman D. L., Hamilton A. J., Fletcher T. D., Cook P. L. M., Stewardson M., Sanders B. F., Levin L. A., Ambrose R. F., Deletic A., Brown R., Jiang S. C., Rosso D., Cooper W. J., Marusic I. (2012) Taking the “Waste” out of “Wastewater” for Human Water Security and Ecosystem Sustainability. *Science*, 2012, 337 (6095), 681–686. DOI: 10.1126/science.1216852.
 12. Chizh V. A., Rimashevskaya E. D. (2015) Improvement of Technologies for Purification and Neutralization of Waste Waters of Heat Power Plants Based on Membrane Methods. *Energetika i Energoberezhenie: Teoriya i Praktika: Materialy II Vseros. Nauch.-Prakt. Konf.* [Energy and Energy Efficiency: Theory and Practice. Proceedings of the Second All-Russian Scientific-and-Practical Conference]. Kemerovo, Kuzbas State Technical University named after T. F. Gorbachev. Available at: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/1/Chizh_Rimashevskaja.pdf. (Accessed: 1 August 2016) (in Russian).
 13. Zhadan A. V. (2013) *Improving the Technology of Water Treatment at Heat Power Plants on the Basis of Ion Exchange and Membrane Methods*. Ivanovo, Ivanovo State Power University. 20 (in Russian).
 14. Rodiana E. V., Rimashevskaya E. D. (2015) The Study of Computer Software Design of Remote Control Panels of Thermal and Nuclear Power Plants. *Vestnik Rossiiskogo Natsionalnogo Komiteta CIGRE. Vyp. 7: Materialy Molodezhnoi Seksii RNK SIGRE* [Herald of the Russian National Committee of CIGRE. Issue 7: Materials of the Youth Section of CIGRE RNC: Collected Works Towards the Competition Presentations “Power-2015” in Electric Power and Electric Engineering Directions of CIGRE Research, Ivanovo, 21–23 April 2015]. Ivanovo, Ivanovo State Power University, 76–80 (in Russian).

15. Bruinsma D., Spoelstra S. (2010) Heat Pumps in Distillation. *Distillation & Absorption Conference 12–15 September 2010, Eindhoven, Netherlands*, 21–28.
16. Fardiev I. Sh., Zakirov I. A., Silov I. Yu., Galiev I. I., Korolev A. G., Shishchenko V. V., Sedlov A. S., Ilina I. P., Sidorova S. V., Khaziakhmetova F. R. (2009) Experience of Creating Complex Low-Waste System of Water Use at the Kazan CHP-3. *Novoe v Rossiiskoi Elektroenergetike* [New in Russian Power Industry], (3), 30–37 (in Russian).
17. Oren Y., Korngold E., Daltrophe N., Messalem R., Volkman Y., Aronov L., Weismann M., Bouriakov N., Glueckstern P., Gilron J. (2010) Pilot Studies on High Recovery BWRO-EDR for Near Zero Liquid Discharge Approach. *Desalination*, 261 (3), 321–330. DOI:10.1016/j.desal.2010.06.010.
18. Rimashevskaya E. D. (2016) Improving the Design of Water Treatment Facilities of Thermal and Nuclear Power Plants with the Use of Computer Technologies. *Informatizatsiya Inzhernogo Obrazovaniya – INFORINO-2016: tr. Mezhdunar. Nauch.-Metod. Konf.* [Informatization of Engineering Education – INFORENE-2016 : Proceedings of the International Scientific-and-Methodic Conference, Moscow, 12–13 April 2016]. Moscow, Moscow Energy Institute, 415–419 (in Russian).
19. Rimashevskaya E. D. (2015) Development of a Small Drain Remote Control Panel of a CHP. *Elektroenergetika Glazami Molodezhi: tr. VI Mezhdunar. Nauch.-Tekhnich. Konf. T. 1* [The Electric Power Industry Through the Eyes of Youth: Proceedings of the VIth International Scientific-and-Technical Conference, Ivanovo, 9–13 November 2015. Vol. 1]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute named after V. I. Lenin, 358–363 (in Russian).
20. Panteleev A. A., Ryabchikov B. E., Khoruzhii O. V., Gromov S. L., Sidorov A. R. (2012) *Membrane Technologies in the Industrial Water Treatment*. Moscow, DeLi plus Publ. 429 (in Russian).
21. Panteleev A. A., Ryabchikov B. E., Zhadan A. V., Khoruzhii O. V. (2012) Design Solutions for Water Treatment Plants Constructed on the Basis of Membrane Technologies. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 59 (7), 517–523. DOI: 10.1134/S0040601512070142.
22. Rimashevskaya E. D. (2016) A Study of Environmental Efficiency of Baromembrane Schemes of Water Desalination at TPP. *Energiya-2016: Odinnadsataya Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Aspir. i Molodykh Uchenykh: Materialy Konf. T. 1* [Energy-2016: the Eleventh International Scientific-and-Technical Conference of Students and Young Researchers. Vol. 1]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute named after V. I. Lenin, 99–101 (in Russian).
23. Elimelech M., Phillip W. A. (2011) The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology and the Environment. *Science*, 333 (6043), 712–717. DOI: 10.1126/science.1200488.
24. Gerard R., Laflamme R. (2008) Technology Selection Tools for Boiler Feedwater Application. *Paper Presented at Abu Qir WTT Conference*. Tech Paper GE 1160EN.
25. Vladana N. R., Dragana Z. Z., Branimir N. G. (2011) Improvement of Chemical Control in the Watersteam Cycle of Thermal Power Plants. *Applied Thermal Engineering*, 31 (1), 119–128. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.08.028.
26. Kucera J. (2015) *Reverse Osmosis Industrial Processes and Application*. 2nd ed. Canada, Scrivener Publ. 472. DOI: 10.1002/9781119145776.
27. Gruzdyev E., Starikov E. (2009) Water Treatment Plant with Use of Reverse Osmosis and Electrical Deionization Processes. *Bulgarian Nuclear Energy – National, Regional and World Energy Safety: Materials of Belene NPP II International Nuclear Conference, 27–29 May 2009*.
28. Kagramanov G. G., Farnosova E. N., Kandelaki G. L. (2010) Heavy Metal Cationic Wastewater Treatment with Membrane Methods. Václavíková M., Vitale K., Gallios G. P., Ivaničová L. (eds.) *Water Treatment Technologies for the Removal of High-Toxicity Pollutants. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Springer, Dordrecht, 177–182. DOI: 10.1007/978-90-481-3497-7_15.
29. Xu T. W., Huang C. H. (2008) Electrodialysis-Based Separation Technologies: a Critical Review. *AIChE Journal*, 54 (12), 3147–3159. DOI: 10.1002/aic.11643.
30. Bilyukevich A., Branitsky G., Plisko T. (2010) Morphological Structure and Transport Properties of Polymer-Inorganic Membranes. *V International Conference on Chemistry and Chemical Education “Sviridov Readings 2010”: Book of Abstracts*. Minsk, Belarussian State University, 40.

31. Fu Fenglian, Qi Wang (2011) Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: a Review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407–418. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
32. Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J. A. (2011) Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological Treatments for Wastewater Decontamination – a Review. *Science of the Total Environment*, 409 (20), 4141–4166. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.08.061.
33. Heidrich E. S., Curtis T. P., Dolfing J. (2011) Determination of the Internal Chemical Energy of Wastewater. *Environmental Science and Technology*, 45 (2), 827–832. DOI: 10.1021/es103058w.
34. Rana D., Matsuura T., Kassim M. A., Ismail A. F. (2013) Radioactive Decontamination of Water by Membrane Processes – a Review. *Desalination*, 321, 77–92. DOI: 10.1016/j.desal.2012.11.007.
35. Ojovan M. I., Lee W. E. (2011) Treatment of Radioactive Wastes. *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*. Elsevier Ltd., 171–203.
36. Ghaffour N., Missimer T. M., Amy G. L. (2013) Technical Review and Evaluation of the Economics of Water Desalination: Current and Future Challenges for Better Water Supply Sustainability. *Desalination*, 309, 197–207. DOI: 10.1016/j.desal.2012.10.015.
37. DOW™ EDI-310 Module. Product Manual. Version 1. Form No 795-00051-1110. USA. 2010.
38. Rymashevskaya E. D., Chizh V. A. (2016) Experience of the Use of Computer Design Technologies of Water-Treatment Installations of Thermal and Nuclear Power Plants in the Educational Process at the Belarusian National Technical University. *Materialy IX Mezhdunar. Vodno-Himicheskogo Foruma, g. Minsk, 17–19 Maja 2016 g.* [Materials of the IXth International Water-Chemical Forum, Minsk, 17–19 May, 2016]. Minsk, Kovcheg Publ., 127–131 (in Russian).
39. Rymashevskaya E. D. (2016) The Development and Analysis of Technology of Recycling of Wastewater Sodium in the Preparation of Demineralized Water at a Heat Power Plant and Nuclear Power Plants in Accordance with the Baromembrane Methods. *Energiya-2016: Odinnadtsataya Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Asp. i Molodykh Uchenykh: Materialy Konf. T. 1* [Energy-2016: the Eleventh International Scientific-and-Technical Conference of Students and Young Researchers. Vol. 1]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute named after V. I. Lenin, 101–102 (in Russian).

Received: 31 August 2016

Accepted: 28 October 2016

Published online: 28 July 2017

ЛИТЕРАТУРА

1. Римашевская, Е. Д. Состояние технологии подготовки водного рабочего тела на ТЭС Республики Беларусь / Е. Д. Римашевская // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2015 г. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Т. Е. Жуковская. Минск, 2015. С. 226–227.
2. Римашевская, Е. Д. Анализ технологической эффективности использования перспективных ионитов в схемах обессоливания воды на атомных электростанциях / Е. Д. Римашевская // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т., Томск, 2–4 дек. 2015 г. / Томский политехн. ун-т; редкол.: В. В. Литвак [и др.]. Томск, 2015. Т. 1. С. 261–263.
3. Tong, T. The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies and Future Directions / T. Tong, M. Elimelech // *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50, No 13. P. 6846–6855.
4. Римашевская, Е. Д. Совершенствование малоотходных технологий ХВО / Е. Д. Римашевская // Актуальные проблемы энергетики: материалы 71-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2015 г. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Т. Е. Жуковская. Минск, 2015. С. 254–257.
5. Чиж, В. А. Пути совершенствования предварительной обработки воды на ТЭС [Электронный ресурс] / В. А. Чиж, Е. Д. Римашевская // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы I всерос. науч.-практ. конф., Кемерово, 3–5 дек. 2014 г. / ФГБОУ ВПО Кузбас. гос. техн. ун-т имени Т. Ф. Горбачева; редкол.: В. П. Тащиенко (отв. редак-

- top) [и др.]. Кемерово, 2014. Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2014/oldenerg1/energ1/pages/Articles/1/Chizh.pdf>. Дата доступа: 01.08.2016.
6. Kosandrovich, E. G. Fibrous Ion Exchangers / E. G. Kosandrovich, V. S. Soldatov // Ion Exchange Technology: Theory and Materials / Eds. Dr. Inamuddin, M. Luqman. New York: Springer, 2012. P. 299–371.
 7. Римашевская, Е. Д. Применение современных экологических и ресурсосберегающих технологий обессоливания воды при проектировании водоподготовительных установок тепловых и атомных электрических станций / Е. Д. Римашевская, В. А. Чиж // Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2015». Минск: Издательский центр БГУ, 2016. С. 124.
 8. Tchobanoglous, G. Impacts of New Concepts and Technology on the Energy Sustainability of Wastewater Management / G. Tchobanoglous, H. Leverenz // Conference on Climate Change, Sustainable Development and Renewable Resources in Greece, Oct. 17, 2009. Greece, 2009.
 9. Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС / Б. М. Ларин [и др.] // Теплоэнергетика. 2010. Т. 57, № 8. С. 8–13.
 10. Одоевцева, М. В. Оценка эффективности применения комбинированной схемы переработки засоленных стоков / М. В. Одоевцева, С. С. Чекунов, И. В. Громова // Альтернативная энергетика и экология (ISJAE). 2015. № 17–18. С. 158–161.
 11. Taking the “Waste” out of “Wastewater” for Human Water Security and Ecosystem Sustainability / S. B. Grant [et al.] // Science. 2012. Vol. 337, No 6095. P. 681–686.
 12. Чиж, В. А. Совершенствование технологий очистки и нейтрализации сточных вод ТЭС на базе мембранных методов [Электронный ресурс] / В. А. Чиж, Е. Д. Римашевская // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы II всерос. науч.-практ. конф., Кемерово, 2–4 дек. 2015 г. / ФГБОУ ВО Кузбас. гос. техн. ун-т имени Т. Ф. Горбачева; редкол.: О. В. Тайлаков (отв. ред.), И. А. Лобур (зам. отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2015. Режим доступа: http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2015/energ/pages/Articles/1/Chizh_Rimashevskaja.pdf. Дата доступа: 01.08.2016.
 13. Жадан, А. В. Совершенствование технологии обработки воды на ТЭС на базе ионного обмена и мембранных методов / А. В. Жадан. Иваново: ИГЭУ, 2013. 20 с.
 14. Родина, Е. В. Исследование компьютерных программ проектирования ВПУ ТЭС и АЭС / Е. В. Родина, Е. Д. Римашевская // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. Иваново: ИГЭУ, 2015. Вып. 7: Материалы молодежной секции РНК СИГРЭ: сб. конкурс. докл. «Энергия-2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ по итогам Конкурса докладов в рамках X Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015», 21–23 апр. 2015 г. С. 76–80.
 15. Bruinsma, D. Heat Pumps in Distillation / D. Bruinsma, S. Spoelstra // Distillation & Absorption Conference, 12–15 Sept. 2010, Eindhoven, Netherlands. Netherlands, 2010. P. 21–28.
 16. Опыт создания комплексной малоотходной системы водопользования на Казанской ТЭЦ-3 / И. Ш. Фардиев [и др.] // Новое в российской электроэнергетике. 2009. № 3. С. 30–37.
 17. Pilot Studies on High Recovery BWRO-EDR for Near Zero Liquid Discharge Approach / Y. Oren [et al.] // Desalination. 2010. No 261 (3). P. 321–330.
 18. Римашевская, Е. Д. Совершенствование проектирования водоподготовительных установок тепловых и атомных электрических станций с использованием компьютерных технологий / Е. Д. Римашевская // Информатизация инженерного образования – ИНФОРИНО-2016: тр. Междунар. науч.-метод. конф. Москва, 12–13 апр. 2016 г. / МЭИ; редкол.: С. А. Позднеев (рецензент) [и др.]. М., 2016. С. 415–419.
 19. Римашевская, Е. Д. Разработка малосточной ВПУ ТЭЦ / Е. Д. Римашевская // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI междунар. науч.-технич. конф., Иваново, 9–13 нояб. 2015 г.: в 2 т / ФГБОУВПО Ивановский госуд. энергет. ун-т имени В. И. Ленина; редкол.: В. В. Тютиков (отв. ред.) [и др.]. Иваново, 2015. Т. 1. С. 358–363.
 20. Технологии мембранного разделения в промышленной водоподготовке / А. А. Пантелеев [и др.]. Москва: ДеЛи плюс, 2012. 429 с.
 21. Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А. А. Пантелеев [и др.] // Теплоэнергетика. 2012. Т. 59, № 7. С. 30–36.

22. Римашевская, Е. Д. Исследование экологической эффективности баромембранных схем обессоливания воды на ТЭС и АЭС / Е. Д. Римашевская // Энергия-2016: Одиннадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, асп. и молодых ученых: материалы конф.: в 7 т. / ИГЭУ; оргкомитет: В. В. Тютиков (пред. оргком.) [и др.]. Иваново, 2016. Т. 1. С. 99–101.
23. Elimelech, M. The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology and the Environment / M. Elimelech, W. A. Phillip // Science. 2011. No 333 (6043). P. 712–717.
24. Gerard, R. Technology Selection Tools for Boiler Feedwater Application / R. Gerard, R. Laflamme // Paper Presented at Abu Qir WTT Conference. 2008. Tech Paper GE 1160EN.
25. Vladana, N. R. Improvement of Chemical Control in the Watersteam Cycle of Thermal Power Plants / N. R. Vladana, Z. Z. Dragana, N. G. Branimir // Applied Thermal Engineering. 2011. No 31 (1). P. 119–128.
26. Kucera, J. Reverse Osmosis Industrial Processes and Application / J. Kucera. 2nd edition. Canada: Scrivener Publ., 2015. 472 p.
27. Gruzdyev, E. Water Treatment Plant with Use of Reverse Osmosis and Electrical Deionization Processes / E. Gruzdyev, E. Starikov // Bulgarian Nuclear Energy – National, Regional and World Energy Safety: Materials of Belene NPP II International Nuclear Conference, 27–29 May 2009. Belene, 2009.
28. Kagramanov, G. G. Heavy Metal Cationic Treatment with Membrane Methods / G. G. Kagramanov, E. N. Farnosova, G. L. Kandelaki // Water Treatment Technologies for the Removal of High-Toxicity Pollutants / eds. M. Václavíková, K. Vitale, G. P. Gallios, L. Ivaničová. Dordrecht: Springer, 2010. P. 177–182. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security).
29. Xu, T. W. Electrodialysis-Based Separation Technologies: a Critical Review / T. W. Xu, C. H. Huang // AIChE Journal. 2008. Vol. 54, No 12. P. 3147–3159.
30. Bilyukevich, A. Morphological Structure and Transport Properties of Polymer-Inorganic Membranes / A. Bilyukevich, G. Branitsky, T. Plisko // V International Conference on Chemistry and Chemical Education “Sviridov Readings 2010”: Book of Abstracts, Minsk, Belarus, 6–9 April, 2010 / Belarussian State University; edit.: E. I. Vasilevskaya [et al.]. Minsk, 2010. P. 40.
31. Fu, Fenglian. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: a Review / Fenglian Fu, Qi Wang // Journal of Environmental Management. 2011. Vol. 92, No 3. P. 407–418.
32. Oller, I. Combination of Advanced Oxidation Processes and Biological, Treatments for Wastewater Decontamination – a Review / I. Oller, S. Malato, J. A. Sánchez-Pérez // Science of the Total Environment. 2011. Vol. 409, No 20. P. 4141–4166.
33. Heidrich, E. S. Determination of the Internal Chemical Energy of Wastewater / E. S. Heidrich, T. P. Curtis, J. Dolfin // Environmental Science and Technology. 2011. Vol. 45, No 2. P. 827–832.
34. Radioactive Decontamination of Water by Membrane Processes – a Review / D. Rana [et al.] // Desalination. 2013. Vol. 321. P. 77–92.
35. Ojovan, M. I. Treatment of Radioactive Wastes / M. I. Ojovan, W. E. Lee // An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. Elsevier Ltd., 2011. P. 171–203.
36. Ghaffour, N. Technical Review and Evaluation of the Economics of Water Desalination: Current and Future Challenges for Better Water Supply Sustainability / N. Ghaffour, T. M. Missimer, G. L. Amy // Desalination. 2013. No 309. P. 197–207.
37. DOW™ EDI-310 Module. Product Manual. Version 1. Form No 795-00051-1110. USA. 2010.
38. Римашевская, Е. Д. Опыт использования компьютерных технологий проектирования водоподготовительных установок тепловых и атомных электрических станций в учебном процессе Белорусского национального технического университета / Е. Д. Римашевская, В. А. Чиж // Материалы IX междунар. водно-хим. форума, г. Минск, 17–19 мая 2016 г. / Инс-т физ.-орг. химии НАН Беларуси. Минск: Ковчег, 2016. С. 127–131.
39. Римашевская, Е. Д. Разработка и анализ технологий утилизации натрийсодержащих стоков при подготовке обессоленной воды на ТЭС и АЭС по баромембранным методам / Е. Д. Римашевская // «Энергия-2016»: Одиннадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, асп. и молодых ученых: материалы конф.: в 7 т. / ИГЭУ; оргкомитет: В. В. Тютиков (пред. оргком.) [и др.]. Иваново, 2016. Т. 1. С. 101–102.

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388

УДК 556.552

Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепродзержинского водохранилища в условиях изменения климата

Е. В. Обухов¹⁾

¹⁾Одесский государственный экологический университет (Одесса, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проблемой водохранилищ в настоящее время является их функционирование в условиях меняющегося климата. Управление водными ресурсами водных объектов, оценка состояния и происходящих в них процессов требуют постоянного мониторинга и анализа. Цель работы автора – исследование интенсивности внешнего водообмена на Днепродзержинском водохранилище, горизонтальной и вертикальной составляющих водообмена, а также хозяйственного использования объекта. На основе водобалансовых составляющих исследования интенсивность внешнего водообмена водохранилища с учетом водности года за весь период его эксплуатации: многоводный 1970 г., маловодный 1972 г. и очень маловодный 2015 г. Определены коэффициенты интенсивности и показатели внешнего водообмена по каждому месяцу года, месяцы с максимальной и минимальной интенсивностями внешнего водообмена во временных единицах и основной фактор влияния на него – боковая приточность в водохранилище. Максимальная интенсивность внешнего водообмена в водохранилище в очень маловодном году в весенний и осенний периоды его эксплуатации ухудшилась по отношению к многоводному году в четыре раза. Установлено, что чем больше коэффициент интенсивности внешнего водообмена, тем меньше показатель внешнего водообмена во временных единицах и интенсивнее происходят смена и самоочищение воды в водохранилище. Если показатель внешнего водообмена меньше единицы, то смена нормативных водных ресурсов водохранилища будет происходить меньше чем за год. Результаты исследований могут быть полезны при разработке режимов эксплуатации водохранилища в условиях изменения климата.

Ключевые слова: водохранилище, водный баланс, водообмен, интенсивность, коэффициент

Для цитирования: Обухов, Е. В. Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепродзержинского водохранилища в условиях изменения климата / Е. В. Обухов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 4. С. 380–388. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388

A Study of the Influence of the Yearlong Water Content on the External Water Exchange in Dneprodzerzhinsk Reservoir under Conditions of Climate Change

E. V. Obukhov¹⁾

¹⁾Odessa State Environmental University (Odessa, Ukraine)

Abstract. A current problem of reservoirs is their functioning in conditions of a changing climate. In such conditions, water resources management of water bodies as well as assessment their state

Адрес для переписки

Обухов Евгений Васильевич
Одесский государственный экологический университет
ул. Львовская, 15,
65016, г. Одесса, Украина
Тел.: +38048 785-27-13
economy@odeku.edu.ua

Address for correspondence

Obukhov Evgenii V.
Odessa State Environmental University
15 Lvivska str.,
65016, Odessa, Ukraine
Tel.: +38048 785-27-13
economy@odeku.edu.ua

and ongoing processes require permanent monitoring and analysis. The aim of the author of the present work was to study the intensity of external water exchange in Dneprodzerzhinsk reservoir, the horizontal and vertical components of the water cycle and the economic use of the water body. On the basis of the components of the water balance the external water exchange in the reservoir has been studied taking into account the yearlong water content during the whole period of the reservoir operation, viz. during the water-abundant year 1970, the low-water year 1972 and the very much low-water year 2015. Intensity factors and indicators of external water exchange for each month of the year, and for the months of the maximum and minimum intensity of the external water exchange during a unit of time, as well as the main factor influencing on the water exchange, viz. the lateral inflow in the reservoir have been determined. The maximum intensity of the external water exchange in the reservoir during a very dry year has deteriorated in the spring and autumn periods of its operation fourfold as compared with the one of the high-water year. It is determined that the higher the intensity of the external water exchange is, the less the indicator of the external water exchange during a unit of time is and the more intensively an exchange and self-purification of the water in the reservoir are being fulfilled. If the rate of external water exchange is less than one, then the shift of regulatory water resources of the reservoir will take place in less than a year. The results of the study can be useful in developing modes of reservoir operation in conditions of a climate change.

Keywords: water reservoir, water balance, water exchange, intensity, ratio

For citation: Obukhov E. V. (2017) A Study of the Influence of the Yearlong Water Content on the External Water Exchange in Dneprodzerzhinsk Reservoir under Conditions of Climate Change. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (4), 380–388. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388 (in Russian)

В условиях меняющегося климата управление водными ресурсами водных объектов, оценка их состояния и происходящих в них процессов требуют постоянного мониторинга и анализа. Интенсивность водообмена в водохранилищах – одна из важнейших характеристик их состояния [1–13]. Взаимодействие гидрологических и гидродинамических процессов влияет на внешний и внутренний водообмен, на содержание растворенных веществ в водоемах, на качество и интенсивность цветения воды в водохранилищах степной зоны при накоплении в них химических или биологических веществ. Исследованиями процессов водообмена в озерах и искусственных водоемах занимались многие ученые, и в результате были получены характеристики водообмена многих водохранилищ.

Цель работы автора – исследование интенсивности внешнего водообмена на работающем в каскаде Днепродзержинском водохранилище с учетом водности года эксплуатации, горизонтальной и вертикальной составляющих водообмена, а также его хозяйственного использования. Основными материалами исследования были реальные водобалансовые показатели по Днепродзержинскому водохранилищу за многоводный 1970 г. (объем годового руслового притока $75,55 \text{ км}^3$), маловодный 1972 г. ($32,67 \text{ км}^3$) и очень маловодный 2015 г. ($19,5 \text{ км}^3$).

Днепродзержинское водохранилище – четвертая ступень в составе Днепровского каскада, на которой осуществляется суточное и недельное регулирование стока. Расположено оно на территории Кировоградской, Полтавской и Днепропетровской областей. Площадь водосбора 434000 км^2 , среднемноголетний сток 52 км^3 . Полная и полезная емкость водохранилища соответственно $2,46$ и $0,30 \text{ км}^3$, площадь при отметке нормального

подпертого уровня и при уровне мертвого объема 567 и 471 км², площадь мелководий 182 км². Длина водохранилища 149 км, максимальная и средняя ширина соответственно 8,0 и 5,1 км, максимальная и средняя глубина 16,1 и 4,3 м. Максимальный статический напор 15,50 м, минимальный 8,40 м, расчетный 9,85 м. Расчетный расход водосбросной плотины 20100 м³/с, расчетный максимальный сбросной расход через сооружения ($p = 0,1\%$) 23300 м³/с.

Результаты исследований и их анализ

Показатели интенсивности внешнего водообмена включают как горизонтальную, так и вертикальную его составляющие. К горизонтальным составляющим внешнего водообмена относят приток воды в водохранилище (по основной реке и боковой), а также сток из водохранилища через гидроузел.

Одна из вертикальных составляющих внешнего водообмена учитывает выпадение атмосферных осадков на водную поверхность водохранилища, а также испарение с его поверхности. Эта составляющая иногда существенно влияет на показатели внешнего водообмена во внутригодовом аспекте. Кроме того, при оценке внешнего водообмена предлагается также учитывать и другие составляющие водного баланса водоема – сброс в водохранилище сточных и бытовых вод, забор воды на хозяйственные нужды и др.

С использованием изложенной в [1, 7, 8, 10] методики по формулам В. Н. Штефана, А. С. Литвинова, Г. П. Калинина и А. В. Караушева для Днепродзержинского водохранилища в характерные по водности годы были рассчитаны коэффициенты интенсивности K_v как отношение суммы прихода и расхода воды из водохранилища к удвоенному среднему его объему за расчетный период, а также показатели внешнего водообмена T_y во временных единицах как величина, обратная коэффициенту интенсивности (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

**Коэффициенты интенсивности и показатели внешнего водообмена
Днепродзержинского водохранилища**
**Intensity factors and indicators of external water exchange
of Dneprodzerzhinsk water storage reservoir**

Месяц	K_{v1}	T_{y1} , лет	K_{v2}	T_{y2} , лет	$K_{v2} > K_{v1}$, %	K_{v3}	T_{y3} , лет	$K_{v3} > K_{v1}$, %	K_{v4}	$K_{v4} > K_{v1}$, %	T_{y4} , лет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Многоводный 1970 г.											
I	1,964	0,51	1,998	0,50	1,70	2,006	0,50	2,09	2,008	2,19	0,50
II	1,740	0,58	1,769	0,57	1,64	1,777	0,56	2,08	1,779	2,19	0,56
III	2,588	0,39	2,796	0,36	7,44	2,802	0,36	7,64	2,804	7,70	0,36
IV	5,787	0,17	6,236	0,16	7,20	6,240	0,16	7,26	6,242	7,29	0,16
V	6,677	0,15	6,766	0,15	1,32	6,785	0,15	1,59	6,787	1,62	0,15
VI	2,656	0,38	2,686	0,37	1,12	2,705	0,37	1,81	2,707	1,88	0,37
VII	1,400	0,71	1,421	0,70	1,45	1,443	0,69	2,98	1,445	3,11	0,69
VIII	1,034	0,97	1,051	0,95	1,61	1,078	0,93	4,08	1,080	4,26	0,93

Окончание табл. 1

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IX	1,296	0,77	1,317	0,76	1,59	1,330	0,75	2,56	1,332	2,70	0,75
X	1,523	0,66	1,600	0,63	4,81	1,623	0,62	6,16	1,626	6,33	0,61
XI	1,716	0,58	1,772	0,56	3,16	1,776	0,56	3,38	1,778	3,49	0,56
XII	2,271	0,44	2,303	0,43	1,39	2,309	0,43	1,65	2,311	1,73	0,43
Маловодный 1972 г.											
I	2,164	0,46	2,183	0,46	0,87	2,185	0,46	0,96	2,187	1,05	0,46
II	1,725	0,58	1,734	0,58	0,52	1,734	0,58	0,52	1,736	0,63	0,58
III	0,628	1,59	0,645	1,55	2,64	0,651	1,53	3,53	0,653	3,83	1,53
IV	0,724	1,38	0,784	1,28	7,65	0,790	1,27	8,35	0,792	8,59	1,26
V	0,942	1,06	0,977	1,02	3,58	0,990	1,01	4,85	0,992	5,04	1,01
VI	0,999	1,00	1,017	0,98	1,77	1,037	0,96	3,66	1,038	3,75	0,96
VII	0,960	1,04	0,985	1,02	2,54	1,006	0,99	4,57	1,008	4,76	0,99
VIII	1,019	0,98	1,032	0,97	1,26	1,055	0,95	3,41	1,058	3,69	0,94
IX	0,994	1,01	1,002	1,00	0,80	1,023	0,98	2,83	1,025	3,02	0,97
X	0,979	1,02	0,994	1,01	1,51	1,004	1,00	2,49	1,006	2,68	0,99
XI	0,989	1,01	1,017	1,00	2,75	1,025	0,98	3,51	1,027	3,70	0,97
XII	1,174	0,85	1,204	0,83	2,49	1,206	0,83	2,65	1,208	2,81	0,83
Очень маловодный 2015 г.											
I	0,874	1,14	0,893	1,12	2,13	0,897	1,11	2,56	0,901	3,00	1,11
II	1,074	0,93	1,105	0,91	2,81	1,111	0,90	3,33	1,117	3,85	0,89
III	0,802	1,25	0,851	1,18	5,76	0,863	1,16	7,07	0,869	7,71	1,15
IV	0,491	2,04	0,538	1,86	8,74	0,552	1,81	11,05	0,561	12,48	1,78
V	0,665	1,50	0,695	1,44	4,32	0,709	1,41	6,21	0,716	7,12	1,40
VI	0,523	1,91	0,539	1,86	2,97	0,569	1,76	8,26	0,575	9,04	1,74
VII	0,792	1,26	0,806	1,24	1,74	0,824	1,21	3,88	0,828	4,35	1,21
VIII	0,714	1,40	0,724	1,38	1,38	0,746	1,34	4,29	0,750	4,80	1,33
IX	0,566	1,77	0,574	1,74	1,39	0,590	1,69	4,07	0,595	4,87	1,68
X	0,468	2,14	0,481	2,08	2,70	0,491	2,04	4,68	0,497	5,83	2,01
XI	0,578	1,73	0,593	1,69	2,53	0,602	1,66	3,99	0,607	4,78	1,65
XII	0,815	1,23	0,836	1,20	2,51	0,841	1,19	3,09	0,847	3,78	1,18

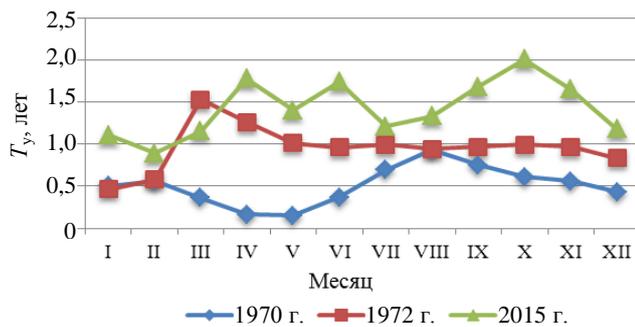


Рис. 1. Показатели внешнего водообмена на Днепродзержинском водохранилище в зависимости от месяца года

Fig. 1. Indicators of external water exchange in Dneprodzerzhinsk reservoir depending on a month of a year

Сравнительные характеристики коэффициентов интенсивности внешнего водообмена с постепенным учетом всех составляющих водного баланса водохранилищ приведены на рис. 2. Коэффициенты учитывают:

$K_{в1}$ – только основной приток и сток через гидроузел; $K_{в2}$ – боковую приточность и перекачку; $K_{в3}$ – осадки и испарение с водохранилища; $K_{в4}$ – сумму приходных и расходных составляющих водного баланса. Отметим, что коэффициент интенсивности внешнего водообмена K_v с увеличением в расчетах числа составляющих водного баланса возрастал для всех месяцев (характерных по водности) лет эксплуатации водохранилища, а показатель внешнего водообмена T_y уменьшался.

Для Днепродзержинского водохранилища максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена в многоводном 1970 г. наблюдаются в мае: $K_{в1} = 6,677$; $K_{в2} = 6,766$; $K_{в3} = 6,785$; $K_{в4} = 6,787$; минимальные – в августе: $K_{в1} = 1,034$; $K_{в2} = 1,051$; $K_{в3} = 1,078$; $K_{в4} = 1,080$. Соответствующие показатели внешнего водообмена в мае для всех факторов: $T_y = 0,15$ года, а в августе $T_y = 0,97$; $0,95$; $0,93$; $0,93$ года.

Влияние бокового притока в 1970 г. наибольшее (7,44 %) в марте, а наименьшее (1,12 %) в июне. Осадки и испарение оказывали максимальное влияние (более 2,40 %) на интенсивность внешнего водообмена в августе, минимальное (0,06 %) – в апреле. Влияние суммарных составляющих водного баланса $K_{в4}$ на внешний водообмен мало отличаются от влияния $K_{в3}$ (рис. 2а).

Для маловодного (1972-го) года эксплуатации Днепродзержинского водохранилища соответствующие максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена наблюдаются в январе: $K_{в1} = 2,164$; $K_{в2} = 2,183$; $K_{в3} = 2,185$; $K_{в4} = 2,187$; минимальные – в марте: $K_{в1} = 0,628$; $K_{в2} = 0,645$; $K_{в3} = 0,651$; $K_{в4} = 0,653$. Соответствующие показатели внешнего водообмена в январе для всех факторов: $T_y = 0,46$ года, а в марте $T_y = 1,59$; $1,55$; $1,53$; $1,53$ года (рис. 2б).

Влияние бокового притока в 1972 г. наибольшее (7,65 %) в апреле, а наименьшее (0,52 %) в феврале. Осадки и испарение оказывали максимальное влияние (около 2,15 %) на интенсивность внешнего водообмена в августе, минимальное (нулевое) – в феврале. Влияние суммарных составляющих водного баланса $K_{в4}$ на внешний водообмен практически отличается от $K_{в3}$ на 0,2 % (рис. 2б).

Для очень маловодного (2015-го) года эксплуатации Днепродзержинского водохранилища максимальные коэффициенты интенсивности внешнего водообмена наблюдаются в феврале: $K_{в1} = 1,074$; $K_{в2} = 1,105$; $K_{в3} = 1,111$; $K_{в4} = 1,117$; минимальные – в октябре: $K_{в1} = 0,468$; $K_{в2} = 0,481$; $K_{в3} = 0,491$; $K_{в4} = 0,497$. Соответствующие показатели внешнего водообмена в феврале для всех факторов: $T_y = 0,931$; $0,905$; $0,900$; $0,895$ года, а в октябре $T_y = 2,14$; $2,08$; $2,04$; $2,01$ года (рис. 2с).

Влияние бокового притока в 2015 г. наибольшее (8,74 %) в апреле, а наименьшее (1,38 %) в августе. Осадки и испарение оказывали максимальное влияние (5,29 %) на интенсивность внешнего водообмена в июне, минимальное (0,43 %) в январе. Влияние суммарных составляющих водного баланса $K_{в4}$ на внешний водообмен максимальное (1,43 %) по отношению до $K_{в3}$ в апреле, а минимальное (0,44 %) в январе (рис. 2с).

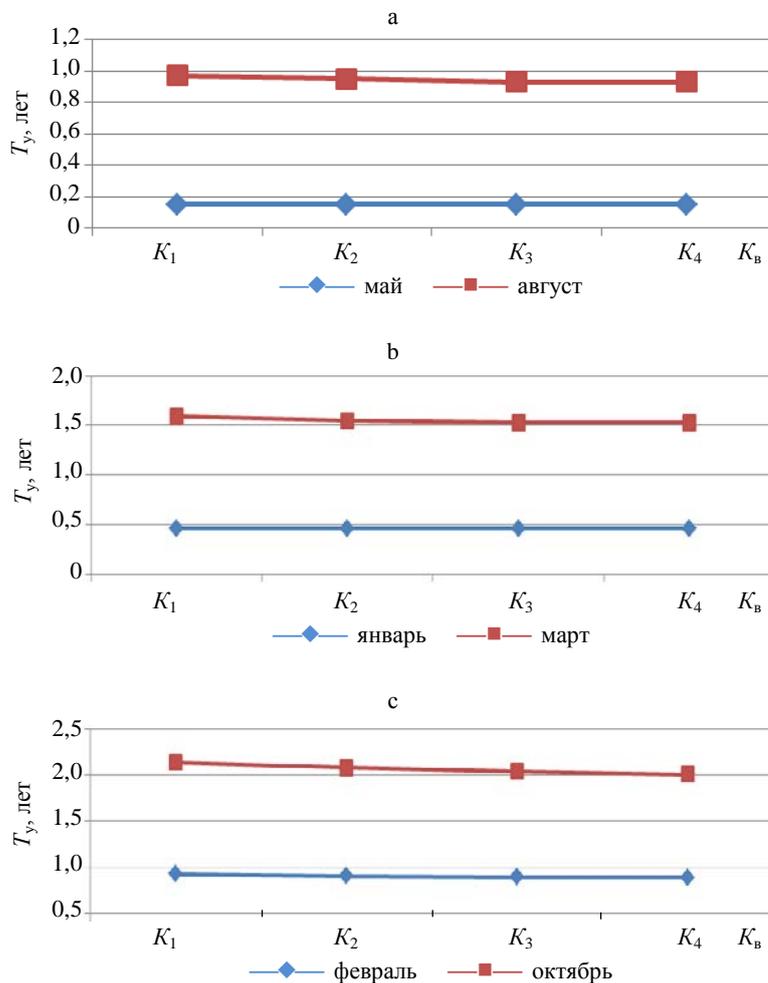


Рис. 2. Зависимость характерных показателей внешнего водообмена на Днепродзержинском водохранилище от коэффициентов интенсивности K_B по годам: а – 1970; б – 1972; с – 2015

Fig. 2. Dependencies of the characteristic indicators of external water exchange in Dneprodzerzhinsk reservoir from influencers K_B according to the years: а – 1970; б – 1972; с – 2015.

Сопоставляя показатели интенсивности внешнего водообмена на Днепродзержинском водохранилище в многоводном и маловодных годах его эксплуатации, отмечено заметное расхождение кривых $T_y = f(t)$ с марта по июль и с сентября по декабрь. Показатель внешнего водообмена в единицах времени в годовом аспекте для Днепродзержинского водохранилища в многоводном году составляет 0,031 года, в маловодном 1972 г. – 0,072 года, а в очень маловодном 2015 г. – 0,113 года, или 41 день. Для сравнения, аналогичный показатель для многоводного года на: Киевском водохранилище – 0,062 года, Кременчугском – 0,13, Днепровском – 0,039,

Каховском – 0,21 года; для маловодного 1972 г. на: Киевском – 0,135 года, Кременчугском – 0,29, Днепровском – 0,099, Каховском – 0,59 года; для очень маловодного 2015 г. на: Киевском – 0,203 года, Каневском – 0,117, Кременчугском – 0,502, Днепровском – 0,144, Каховском – 0,770 года.

ВЫВОДЫ

1. На основе водобалансовых составляющих и постепенного их учета проведено исследование интенсивности внешнего водообмена на Днепро-дзержинском водохранилище с учетом водности года за весь период его эксплуатации – многоводный 1970, маловодный 1972 и очень маловодный 2015 годы. Вычислены коэффициенты интенсивности и показатели внешнего водообмена по каждому месяцу года, месяцы с максимальной и минимальной интенсивностью внешнего водообмена во временных единицах. Определена боковая приточность в водохранилище как основной фактор влияния на интенсивность его внешнего водообмена.

2. Максимальная интенсивность внешнего водообмена в водохранилище в очень маловодном году в весенний и осенний периоды его эксплуатации ухудшилась по отношению к многоводному году в четыре раза. Проведенные исследования показали значимость учета влияния водности года и всех составляющих водного баланса при определении показателей интенсивности внешнего водообмена в водохранилище в разные периоды его эксплуатации, поэтому могут быть полезны при разработке режимов его эксплуатации в условиях изменения климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обухов, Е. В. Оценка интенсивности внешнего водообмена в Кременчугском и Каховском водохранилищах / Е. В. Обухов // Український гідрометеорологічний журнал. 2014. № 15. С. 134–140.
2. Обухов, С. В. Оцінка впливу вертикальної складової на інтенсивність зовнішнього водообміну на Кременчуцькому водосховищі / С. В. Обухов // Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: матеріали II міжнар. наук.-практ. інтерн.-конф., Тернопіль, 20–21 жовтня 2015 р. Тернопіль: Крок, 2016. С. 324–326.
3. Обухов, С. В. Оцінка інтенсивності зовнішнього водообміну на Каховському водосховищі в умовах зміни клімату / С. В. Обухов // Національне виробництво й економіка в умовах реформування: стан і перспективи інноваційного розвитку та міжрегіональної інтеграції: зб. наук. праць Міжнар. наук.-практ. інтерн.-конф., Кам'янець-Подільський, 30 жовтня 2015 р. / Подільський держ. аграр.-техн. ун-т; редкол.: В. В. Іванішин [та інш.]. Тернопіль: Крок, 2015. С. 280–282.
4. Обухов, Е. В. Внешний водообмен водохранилищ Днепровского каскада / Е. В. Обухов // Чистый ГОРОД. Чистая РЕКА. Чистая ПЛАНЕТА: материалы 6 междунар. экологич. форума, Херсон, 19–20 листоп. 2015 р. Херсон: Херсонська Торгово-промислова палата, 2015. С. 140–146.
5. Обухов, Е. В. Внешний водообмен Днестровского водохранилища / Е. В. Обухов // Досягнення науки в 2015 році: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 19 грудня 2015 р. / Центр наук. публікацій «Велес». Київ, 2015. Ч. 2. С. 31–38.

6. Обухов, Е. В. Внешний водообмен на украинских водохранилищах / Е. В. Обухов // Развитие науки в XXI в.: сб. статей IX междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 30 дек. 2015 г. / Науч. информ. центр «Знание». Харьков, 2015. Ч. 2. Т. 2. С. 32–37.
7. Обухов, Е. В. Внешний водообмен на Днепродзержинском водохранилище / Е. В. Обухов, Е. П. Корецкий // Развитие науки в XXI в.: сб. статей X междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 15 фев. 2016 г. / Науч. информ. центр «Знание». Харьков, 2016. Ч. 2. Т. 2. С. 99–104.
8. Обухов, Е. В. Внешний водообмен украинских водохранилищ / Е. В. Обухов. Одесса: Междунар. акад. наук экол., безопас. чел. и прир., 2016. 48 с. (Сер.: Экология, экономика, безопасность. Вып. 1).
9. Обухов, Е. В. Внешний водообмен на Киевском водохранилище / Е. В. Обухов // Стратегія збалансованого використання економічного, технологічного та ресурсного потенціалу країни: зб. наук. праць 11 міжнар. наук.-практ. конф., Кам'янець-Подільський, 1 червня 2016 р. / редкол.: В. В. Іванішин [та інш.]. Кам'янець-Подільський: Подільський держ. аграр.-техн. ун-т, 2016. С. 176–179.
10. Обухов, Е. В. Сравнительные показатели внешнего водообмена на водохранилищах Днепровского каскада в условиях изменения климата / Е. В. Обухов // Географический вестник. 2016. № 2 (37). С. 61–69. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-2-61-69.
11. Обухов, Е. В. / Исследование влияния водности года на интенсивность внешнего водообмена днепровских водохранилищ / Е. В. Обухов, Е. П. Корецкий // Географический вестник = Geographical Bulletin. 2016. № 3 (38). С. 62–71. DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-62-71.
12. Обухов, Е. В. Экономико-экологический фактор влияния изменений климата на интенсивность внешнего водообмена Каховского водохранилища / Е. В. Обухов, Е. П. Корецкий // Економічні інновації: зб. наук. праць. Одеса: Ін-т проблем ринку та економ.-еколог. досліджень НАН України, 2016. Вип. 61. С. 275–284.
13. Обухов, Е. В. Внешний водообмен на Днепровском (Запорожском) водохранилище в условиях меняющегося климата / Е. В. Обухов // Проблемы экологической безопасности и развития народнохозяйственного комплекса: материалы X междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 10 окт. 2016 г. / редкол.: М. Я. Постан [и др.]. Одесса: Междунар. акад. наук экол., безопас. чел. и прир., 2016. С. 29–35.

Поступила 05.01.2017 Подписана в печать 10.03.2017 Опубликовано онлайн 28.07.2017

REFERENCES

1. Obukhov E. V. (2014) Assessing the Intensity of External Water Exchange of the Kremenchug and Kakhovka Reservoirs; *Ukrain'skii Gidrometeorologichnii Zhurnal* [Ukrainian Hydro-meteorological Journal], 15, 134–140 (in Ukrainian).
2. Obukhov E. V. (2016) Evaluation of the Effect of the Vertical Component on the Intensity of the External Water Exchange of the Kremenchug Reservoir. *Innovatsiini Tekhnologii ta Intensifikatsiya Rozvitku Natsional'nogo Virobnitstva: Materiali II Mizhnar. Nauk.-Prakt. Intern.-Konf.* [Innovative Technologies and Intensification of National Production Development: Proceedings of the II International Scientific-and-Practical Conference, Ternopil, October 20–21, 2015]. Ternopil, Krok, 324–326 (in Ukrainian).
3. Obukhov E. V. (2015). Assessing the Intensity of External Water Exchange of the Kakhovka Reservoir in the Conditions of Climate Change. *Natsional'ne Virobnitstvo i Ekonomika v Umovakh Reformuvannya: Stan i Perspektivi Innovatsiinogo Rozvitku ta Mizhregional'noi Integratsii: Zb. Nauk. Prats' Mizhnar. Nauk.-Prakt. Intern.-Konf.* [National Production and Economy in the Conditions of Reforming: the State and Prospects of Innovative Development and Interregional Integration: Collected Research Papers of the International Scientific-and-Practical Conference, Kamyanskyi-Podilskyi, October 30, 2015]. Ternopil, Krok, 280–282 (in Ukrainian).

4. Obukhov E. V. (2015) External Water Exchange of the Reservoirs of the Dnieper Cascade. *Chisty GOROD. Chistaya REKA. Chistaya PLANETA: Materialy 6 Mezhdunar. Ekolog. Forum* [Clean CITY. Clean RIVER. Clean PLANET: Proceedings of the 6th International Ecological Forum, Kherson, 19–20 Nov. 2015]. Kherson, The Kherson Chamber of Commerce, 140–146 (in Russian).
5. Obukhov E. V. (2015) External Water Exchange of the Dniester Reservoir. *Dosyagnennyya Nauki v 2015 Rotsi: Materiali Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. T. 2* [Science Achievements in 2015: Proceedings of the International Scientific-and-Practical Conference, Kyiv, 19 Dec. 2015. Vol. 2]. Kyiv, “Veles” Center of Scientific Publications, 31–38 (in Russian).
6. Obukhov E. V. (2015) External Water Exchange of the Ukrainian Reservoirs. *Razvitie Nauki v XXI Veke: Sb. Statei IX Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Science Development in XXI Century: Collected Papers of the IX International Scientific-and-Practical Conference, Kharkov, 30 Dec. 2015. Vol. 2]. Kharkov, “Znanie” Scientific Information Center, 32–37 (in Russian).
7. Obukhov E. V., Koretskii E. P. (2016) External Water Exchange of the Dneprodzerzhinsk Reservoir. *Razvitie Nauki v XXI Veke: Sb. Statei X Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Science Development in XXI Century: Collected Papers of the X International Scientific-and-Practical Conference, Kharkov, 15 Feb. 2016. Vol. 2]. Kharkov, “Znanie” Scientific Information Center, 99–104 (in Russian).
8. Obukhov E. V. (2016) External Water Exchange of the Ukrainian Reservoirs. *Inform. Nauch.-Tekhn. Byul. Ser. “Ekologiya, Ekonomika, Bezopasnost”* [Information Scientific-and-Technical Bulletin Ser. “Ecology, Economy, Security”]. Odessa, International Academy of Sciences for Ecological Security of People and Nature, (1), 48 (in Russian).
9. Obukhov E. V. (2016) External Water Exchange of the Kiev Reservoir. *Strategiya Zbalansovanogo Viktoristannya Ekonomichnogo, Tekhnologichnogo ta Resursnogo Potentsialu Kraïni: Zb. Nauk. Prats' 11 Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf.* [Strategy of the Balanced Use of Economic, Technological and Resource Potential of the Country: Collected Research Works of the 11 International Scientific-and-Practical Conference, Kamianets-Podilskyi, 1 June 2016]. Kamianets-Podilskyi, State Agrarian and Engineering University in Podilya, 176–179 (in Russian).
10. Obukhov E. V. (2016) Comparative Indicators of the External Water Exchange of the Reservoirs of the Dnieper Cascade in the Context of the Climate Change. *Geograficheskii Vestnik = Geographical Bulletin*, 37 (2), 61–69 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2016-2-61-69.
11. Obukhov E. V., Koretskii E. P. (2016) A Study of the Influence of the Rivers on the Intensity of the External Water Exchange of the Dnieper Reservoirs. *Geograficheskii Vestnik = Geographical Bulletin*, 38 (3), 62–71 (in Russian). DOI: 10.17072/2079-7877-2016-3-62-71.
12. Obukhov E. V., Koretskii E. P. (2016) Economic and Environmental Impact Factor of the Climate Change on the Intensity of the External Water Exchange of the Kakhovka Reservoir. *Ekonomichni Innovatsii: Zb. Nauk. Prats'* [Economic Innovations: Collection of Scientific Papers]. Odessa, Institute of Problems of Market and Economical-and-Ecological Studies of the NAS of Ukraine, (61), 275–284 (in Russian).
13. Obukhov E. V. (2016) External Water Exchange of the Dnieper (Zaporozhie) Reservoir in the Conditions of a Changing Climate. *Problemy Ekologicheskoi Bezopasnosti i Razvitiya Narodnokhozyaistvennogo Kompleksa: Materialy X Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf.* [Problems of Ecological Security and Development of the Economic Complex: Proceedings of the X International Scientific-and-Practical Conference, Odessa, 10 Oct. 2016]. Odessa, International Academy of Sciences for Ecological Security of People and Nature, 29–35 (in Russian).