

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 61, № 3
2018

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:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Фархадзаде Э. М., Мурадалиев А. З., Фарзалиев Ю. З., Рафиева Т. К.,
Абдуллаева С. А.** Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимо-
сти статистических связей технико-экономических показателей объектов электро-
энергетических систем 193

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Фурсанов М. И., Золотой А. А.** О выборе оптимальных точек размыкания
в городских электрических сетях в условиях SMART GRID 207
- Бладыко Ю. В.** Механический расчет гибких токопроводов при замене со-
средоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных
элементов 220
- Шейников А. А., Суходолов Ю. В., Зеленко В. В.** Учет инструментальных по-
грешностей при контроле обмоток электрических машин с использованием квази-
периодических тестовых сигналов 235
- Алексеев Ю. Г., Королёв А. Ю., Нисс В. С., Паршута А. Э., Сорока Е. В.,
Будницкий А. С.** Источник питания для исследования импульсных электрохимиче-
ских процессов 246

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Дмитриев С. М., Доронков Д. В., Легчанов М. А., Сорокин В. Д., Хробос-
тов А. Е.** Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешиваю-
щей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR. 258
- Каныгин А. В.** Водотрубно-дымогарный котел: числовое компьютерное моде-
лирование и эксперимент 269

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

*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. ЖУКОВСКИ (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. ПИСЬМЕННЫЙ (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 11.05.2018. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2018. Заказ .

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, 2018

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 61, No 3
2018

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:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

GENERAL POWER ENGINEERING

- Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A.** Minimization of Risk of the Erroneous Decision in the Assessment of the Importance of Statistical Relations of Technical and Economic Indicators of the Objects of Electric Power Systems 193

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Fursanov M. I., Zolotoy A. A.** On the Choice of the Optimal Points of Opening in City Power Grids in the Conditions of the SMART GRID 207
- Bladyko Y. V.** Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements 220
- Shenikov A. A., Suchodolov Yu. V., Zelenko V. V.** Accounting of Instrumental Errors in the Control of Windings of Electrical Machines with the Use of Quasi-Periodic Test Signals 235
- Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S.** Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes 246

HEAT POWER ENGINEERING

- Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Sorokin V. D., Khrobostov A. E.** Regularities of Formation of Flow of Coolant behind the TVS-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the PWR-Type Reactor 258
- Kanygin A. V.** Watertube Smoke Tube Boiler: Numerical Computer Simulation and Experiment 269

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- 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 25.05.2018. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2018. 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, 2018

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-193-206>

УДК 621.019

Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимости статистических связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем

**Э. М. Фархадзаде¹⁾, А. З. Мурадалиев¹⁾, Ю. З. Фарзалиев¹⁾, Т. К. Рафиева¹⁾,
С. А. Абдуллаева¹⁾**

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Повышение достоверности принимаемых решений при организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетических систем относится к наиболее важным и трудным проблемам. Важным потому, что ошибочные решения приводят прежде всего к росту эксплуатационных затрат. Трудность решения данной проблемы связана с отсутствием соответствующих методов снижения риска ошибочного решения. В статье приводится один из аспектов этой проблемы – повышение достоверности решения о характере взаимосвязи технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем. Традиционно повышение достоверности решения об отсутствии взаимосвязи достигается уменьшением ошибки первого рода. Обычно она принимается равной 5 %, изредка 1 %, а при исследованиях – даже 0,5 %. Соответствующие критические значения коэффициентов корреляции приводятся в справочниках по математике. Такой способ негласно предполагает, что последствия от ошибок первого рода существенно превышают последствия от ошибок второго рода, а распределение коэффициентов корреляции соответствует нормальному закону. Поэтому риск ошибочного решения об отсутствии значимой статистической связи не контролируется. Но и при желании оценить ошибку второго рода сделать это практически невозможно, поскольку критические значения для коэффициентов корреляции зависимых выборок отсутствуют. Не менее актуальна задача принятия решения о статистической взаимосвязи между технико-экономическими показателями в условиях, когда последствия ошибочных решений равны, т. е. необходимо учесть как ошибку первого рода, так и ошибку второго рода. Для преодоления указанных трудностей: разработан новый способ оценки критических значений коэффициентов корреляции (новизна состоит в применении фидуциального подхода); расчеты критических значений проводятся по компьютерным технологиям моделирования возможных реализаций коэффициентов корреляции для двух предположений (технико-экономические показатели независимы и зависимы); моделирование проводится методом решения «обратной задачи», позволяющим получить возможные реализации коэффициентов корреляции для действительно зависимых и независимых

Адрес для переписки

Фархадзаде Эльмар Мехтиевич
Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт
энергетики
просп. Г. Зардаби, 94
Аз1012, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +994012 431-64-07
elmeht@rambler.ru

Address for correspondence

Farhadzadeh Elmar M.
Azerbaijan Scientific-Research
and Design-Prospecting Power
Engineering Institute
94 G. Zardabi Ave.,
Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +994012 431-64-07
elmeht@rambler.ru

выборки случайных величин при заданном объеме выборки; разработанные алгоритмы и программы расчета позволили получить критические значения коэффициентов корреляции для независимых и зависимых выборок; в условиях, когда последствия ошибочного решения одинаковы, предлагается принимать решение не на основе критических значений, а на основе граничных значений коэффициентов корреляции, которые соответствуют минимальному суммарному риску ошибочного решения; иллюстрация применения рекомендаций приведена на примере технико-экономических показателей котельных установок энергоблоков 300 МВт. Показано существенное влияние наличия взаимосвязанных технико-экономических показателей на результат ранжирования котельных установок, надежность и экономичность их работы.

Ключевые слова: оптимизация, суммарный риск, статистическая связь, электроэнергетическая система, котлоагрегат, корреляция

Для цитирования: Минимизация риска ошибочного решения при оценке значимости статистических связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 193–206. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-193-206>

Minimization of Risk of the Erroneous Decision in the Assessment of the Importance of Statistical Relations of Technical and Economic Indicators of the Objects of Electric Power Systems

**E. M. Farhadzadeh¹⁾, A. Z. Muradaliyev¹⁾, Yu. Z. Farzaliyev¹⁾, T. K. Rafiyeva¹⁾,
S. A. Abdullayeva¹⁾**

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

Abstract. Improving the reliability of decisions taken in the organization of maintenance and repair of electric power systems is one of the most important and difficult problems. It is important because erroneous solutions lead, first of all, to an increase in operating costs. The difficulty in solving this problem is associated with the lack of appropriate methods to reduce the risk of erroneous decisions. The article presents one of the aspects of this problem, i.e. improving the reliability of the decision on the nature of the relationship of technical and economic indicators of electric power systems. Traditionally, increase of reliability of the decision is reached by reduction of a Type I error. Usually it is accepted to be equal to 5%, occasionally – to 1%, and at researches – even to 0.5 %. The corresponding critical values of correlation coefficients are given in mathematics reference books. This method implicitly assumes that the consequences of a Type I error significantly exceed the consequences of Type II errors, and the distribution of correlation coefficients corresponds to the normal law. Therefore, the risk of an erroneous decision concerning the absence of a significant statistical relation is not controlled. But even if there is a wish to estimate the Type II error, it is almost impossible to fulfill it, because there are no critical values for correlation coefficients of dependent samples. No less relevant is the problem of deciding on the statistical relationship between technical and economic indicators in conditions of equality of consequences of erroneous decisions, i.e. it is necessary to take into account both a Type I error and a Type II error. To overcome the mentioned difficulties a new method for estimating the critical values of correlation coefficients has been developed. The novelty consists in the application of fiducial approach; the calculation of critical values are fulfilled with the aid of computer technologies of simulation of possible realizations of the correlation coefficients for the two assumptions, viz. technical and economic indicators of the independent and dependent; simulation is fulfilled with the method of solving the “inverse problem”, which enables the possible implementation of the correlation coefficients for the really dependent and independent samples of random

variables at a given sample size; the developed algorithms and programs for calculation made it possible to obtain the critical values of correlation coefficients for independent and dependent samples; in conditions of the sameness of the consequences of erroneous decisions it is proposed to make a decision not based on critical value but based on the boundary values of the correlation coefficients that correspond to the minimum total risk of erroneous decisions; the exemplification of the recommendations application was made on example of technical and economic parameters of boilers of power units of 300 MWt. The significant impact of the availability of interrelated technical and economic indicators on the result of the ranking of boiler plants by the reliability and efficiency of their work is demonstrated.

Keywords: optimization, total risk, statistical relation, electric power system, boiler unit, correlation

For citation: Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2018) Minimization of Risk of the Erroneous Decision in the Assessment of the Importance of Statistical Relations of Technical and Economic Indicators of the Objects of Electric Power Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 193–206. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-193-206> (in Russian)

Постановка задачи

Повышение достоверности решения при оценке значимости статистической связи технико-экономических показателей (ТЭП) на практике осуществляется, как правило, путем уменьшения ошибки первого рода [1]. При этом негласно предполагается, что последствия от всех рисков ошибочного решения для альтернативных гипотез существенно меньше. Чаще всего данное предположение обуславливается отсутствием метода оценки ошибки второго рода.

Новые возможности открывает фидуциальный подход к отображению неопределенности информации. Напомним, что под фидуциальным подходом понимается использование распределения множества возможных оценок комплексного показателя [2].

К комплексным будем относить показатели, оценка которых устанавливается в результате расчета по некоторой формуле. К комплексным, например, относятся: коэффициент готовности, коэффициент корреляции, среднее арифметическое (гармоническое, геометрическое), медиана.

Фидуциальный подход ориентируется на экспериментально установленные закономерности распределения комплексных показателей без привязки этих распределений к известным законам распределения. По своим возможностям он незаменим для малых выборок многомерных статистических данных. Фидуциальные распределения позволяют достаточно просто находить критические значения показателей при заданных ошибках первого и второго рода. Если закон фидуциального распределения известен (например, для больших объемов выборок или для среднего арифметического случайных величин), то оценки критических значений комплексных показателей, вычисленных по формулам расчета доверительных интервалов, будут полностью совпадать с оценками, вычисляемыми непосредственно по фидуциальному распределению.

Однако, к сожалению, для малых выборок многомерных данных, используемых для характеристики однотипных объектов ЭЭС, закон распре-

деления случайных величин выборок не известен, потому что расчеты критических значений комплексных показателей не могут уже быть выполнены вручную. Фидуциальный подход основан на применении компьютерных технологий, имитационном моделировании возможных реализаций комплексных показателей.

Для выявления значимых статистических связей ТЭП критические значения коэффициентов корреляции (КК) рассчитывались авторами по их фидуциальным распределениям. Расчеты проводились для коэффициентов линейной корреляции Пирсона γ_α и коэффициентов ранговой корреляции Спирмена ρ_α [3, 4]. Эти вычисления подтвердили не только равенство γ_α и ρ_α , но и равенство их количественных оценок табличным значениям по литературным данным, вычисленным аналитически [5].

Это соответствие свидетельствует о работоспособности метода фидуциальных вероятностей и алгоритма расчета. Ошибки первого (α) и второго (β) рода определяют риски при проверке справедливости выдвигаемых предположений (гипотез). Рассматривались два предположения. Первое предположение (H_1) – выборки независимы, т. е. реализации выборок с одинаковыми порядковыми номерами изменялись независимо друг от друга. Второе предположение (H_2) сводилось к наличию статистической связи между выборками, при которой реализации выборок с одинаковыми порядковыми номерами изменялись все в одном или все в противоположном направлении.

Алгоритм моделирования реализации сопоставляемых выборок основывался на методе решения «обратной задачи». В соответствии с этим методом моделировались независимые выборки для H_1 и зависимые для H_2 . Малый объем реализаций выборок (n_v) изменял степень их соответствия H_1 и H_2 , и тем больше, чем меньше было n_v . Независимость выборок моделировалась случайными числами с равномерным распределением в интервале $[0, 1]$, а зависимость – ранжированием случайных выборок в порядке возрастания.

Оценка критических значений для ряда КК и заданных ошибок первого и второго рода позволила повысить достоверность оценки значимости статистических связей в условиях приоритетности одного из двух предположений H_1 или H_2 . Вопрос принятия решения при равнозначности H_1 и H_2 требует совместного рассмотрения фидуциальных распределений, отражающих возможные ошибки первого и второго рода.

Некоторые результаты моделирования возможных реализаций коэффициентов корреляции γ и ρ

Фидуциальные распределения $R^*(\gamma/H_1) = 1 - F^*(\gamma/H_1)$ и $F^*(\gamma/H_2)$ приведены на рис. 1, а $R^*(\rho/H_1) = 1 - F^*(\rho/H_1)$ и $F^*(\rho/H_2)$ – на рис. 2.

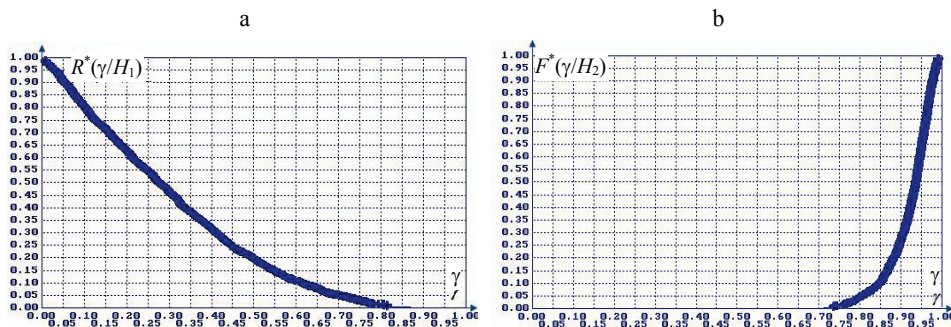


Рис. 1. Закономерности распределения для коэффициента корреляции γ :

$$a - R^*(\gamma/H_1) = 1 - F^*(\gamma/H_1); \quad b - F^*(\gamma/H_2)$$

Fig. 1. The patterns of distribution for the correlation coefficient γ :

$$a - R^*(\gamma/H_1) = 1 - F^*(\gamma/H_1); \quad b - F^*(\gamma/H_2)$$

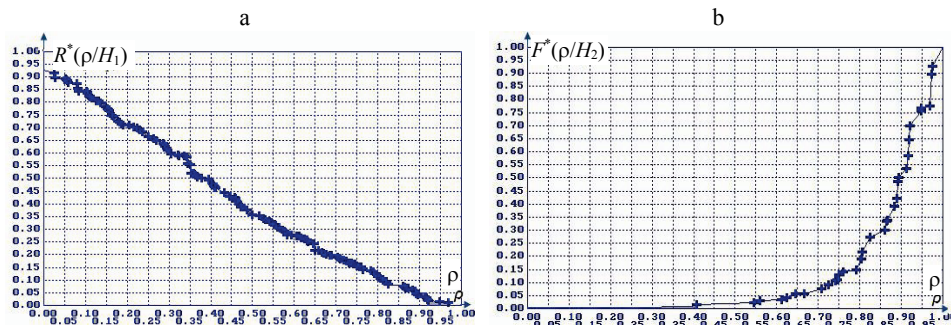


Рис. 2. Закономерности распределения для коэффициента корреляции ρ :

$$a - R^*(\rho/H_1) = 1 - F^*(\rho/H_1); \quad b - F^*(\rho/H_2)$$

Fig. 2. The patterns of distribution for the correlation coefficient ρ :

$$a - R^*(\rho/H_1) = 1 - F^*(\rho/H_1); \quad b - F^*(\rho/H_2)$$

Сопоставление этих распределений позволяет заключить:

1) экспериментальное значение КК γ , или ρ , может принадлежать как лишь к множеству возможных значений КК $\{KK/H_1\}_N$ (где N – число реализаций КК при $H \Rightarrow H_1$) или к множеству возможных значений КК $\{KK/H_2\}_N$ (при $H \Rightarrow H_2$), так и одновременно к обоим множествам $\{KK/H_1\}_N$ и $\{KK/H_2\}_N$;

2) если статистические функции фидуциальных распределений $R^*(\gamma/H_1)$ и $R^*(\rho/H_1)$ графически полностью совпадают, типы распределений $F^*(\gamma/H_2)$ и $F^*(\rho/H_2)$ заметно различаются;

3) с увеличением n_v критические значения γ_α и ρ_α уменьшаются, а γ_β и ρ_β увеличиваются;

4) с ростом n_v интервал возможных реализаций КК γ и ρ снижается.

Подтверждением перечисленному служат данные табл. 1, задающие минимальные значения реализаций множества КК γ и ρ фидуциальных распределений $F^*(\gamma/H_2)$ и $F^*(\rho/H_2)$ и максимальные значения множества реализаций КК γ и ρ фидуциальных распределений $R^*(\gamma/H_1)$ и $R^*(\rho/H_1)$.

Таблица 1

Граничные значения возможных реализаций коэффициентов линейной γ и ранговой ρ корреляций (при $N = 10000$)

The boundary values of the possible realizations of the coefficients of the linear γ and ranking ρ correlations ($N = 10000$)

Объем выборки	Коэффициент корреляции			
	$\gamma_{\alpha\min}$	$\gamma_{\alpha\max}$	$\rho_{\beta\min}$	$\rho_{\beta\max}$
5	0,434	0,997	0	1,000
8	0,569	0,97	0,535	0,947
10	0,616	0,953	0,567	0,916
15	0,692	0,910	0,734	0,873
30	0,820	0,721	0,868	0,559

Очевидно, что усеченные ошибками первого и второго рода множества возможных реализаций $\{\gamma/H_1\}_{N_1}$ и $\{\gamma/H_2\}_{N_2}$, так же как и множества $\{\rho/H_1\}_{N_1}$ и $\{\rho/H_2\}_{N_2}$, не совмещаются, если критическое значение γ_α меньше, чем γ_β при $\alpha = \beta$. Таким образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \gamma_\alpha \leq \gamma_\beta \text{ при } \alpha = \beta \\ \text{и если } \gamma_\gamma \geq \gamma_\alpha, \text{ то } H \Rightarrow H_2, \\ \text{а если } \gamma_\gamma \leq \gamma_\beta, \text{ то } H \Rightarrow H_1. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Условие (1) является необходимым, но недостаточным, так как учитывается случай, когда $\gamma_\alpha > \gamma_\beta$, а интервал $(\gamma_\alpha - \gamma_\beta)$ задает зону неопределенности решения.

С учетом условия $\gamma_\alpha > \gamma_\beta$ критерий принятия решения имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если при } \alpha = \beta \quad \gamma_\alpha \leq \gamma_\beta \\ \text{и если } \gamma_\gamma \geq \gamma_\alpha, \text{ то } H \Rightarrow H_2, \\ \text{а если } \gamma_\gamma \leq \gamma_\beta, \text{ то } H \Rightarrow H_1; \\ \text{если же } \gamma_\alpha > \gamma_\beta \\ \text{и если } F^*(\gamma_\gamma/H_2) > R^*(\gamma_\gamma/H_1), \text{ то } H \Rightarrow H_2, \\ \text{иначе } H \Rightarrow H_1. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Аналогичные соотношения позволяют установить наличие (отсутствие) статистической связи между выборками КК Спирмена ρ .

Критерий (2) исходит из традиционных условий, когда α и β , а следовательно, и критические значения КК задаются (как граничные значения доверительного интервала), что всегда вносило в решение элемент неопределенности, поскольку выбор α и β проводится субъективно. Кроме того, предполагается, что возможна лишь ошибка или первого, или второго рода. На самом деле при $\gamma_\alpha > \gamma_\beta$ в интервале $(\gamma_\beta - \gamma_\alpha)$ возможны одновременно обе ошибки α и β , так как возможны и H_1 , и H_2 .

Фидуциальный подход позволяет принимать решения с минимально возможным суммарным риском ошибочного решения. Для этого проводится суммирование вероятностей $\alpha = R^*(\gamma/H_1)$ и $\beta = F^*(\gamma/H_2)$ для одних и тех же квантилей γ (или ρ). Расчеты с $i = 1, N_\Sigma$ выполняются по формуле

$$W^*(\gamma_i) = 1 - [F^*(\gamma_i/H_1) - F^*(\gamma_i/H_2)], \quad (3)$$

где N_Σ – число реализаций КК γ в интервале $(\gamma_{\alpha\max} - \gamma_{\beta\min})$.

Кажущаяся простота алгоритма обманчива, поскольку процент одинаковой реализации квантилей распределений $F^*(\gamma/H_1)$ и $F^*(\gamma/H_2)$ невелик и требуются специальные подходы для преодоления этих трудностей. Оптимальное значение КК вычисляется по формуле

$$\gamma_{\text{опт}} \Rightarrow \min \{ W^*(\gamma) \}_{N_\Sigma}. \quad (4)$$

При этом критерий распознавания наличия значимых статистических связей имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \gamma_\alpha > \gamma_{\text{опт}}, \text{ то } H \Rightarrow H_2, \\ \text{иначе } H \Rightarrow H_1. \end{array} \right\} \quad (5)$$

В иллюстративных целях в табл. 2, 3 приведены результаты расчета суммарного риска ошибочного решения и оценки оптимальной величины КК γ для n_v , равного 5 и 10.

Таблица 2

**Результаты расчета суммарного риска ошибочного решения
 при оценке значимости коэффициента линейной корреляции Пирсона для $n_v = 5$**

**Results of the calculation of the total risk of the erroneous decision
 in assessing the significance of Pearson linear correlation coefficient for $n_v = 5$**

Номер реализации	Коэффициент корреляции Пирсона	Ошибка		Суммарный риск ошибочного решения
		первого рода	второго рода	
1	2	3	4	5
1	0,65	0,236	0,011	0,247
2	0,67	0,220	0,016	0,236
3	0,69	0,202	0,023	0,225

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
4	0,71	0,184	0,031	0,215
5	0,72	0,176	0,035	0,211
6	0,73	0,166	0,040	0,206
7	0,74	0,157	0,047	0,204
8	0,75	0,149	0,057	0,206
9	0,76	0,142	0,065	0,207
10	0,78	0,125	0,091	0,216
11	0,80	0,110	0,120	0,230
12	0,83	0,087	0,178	0,265
13	0,86	0,065	0,254	0,319
14	0,90	0,041	0,406	0,447

Таблица 3

Результаты расчета суммарного риска ошибочного решения
 при оценке значимости коэффициента ранговой корреляции Спирмена для $n_v = 10$

The results of the calculation of the total risk of the erroneous decision
 in assessing the significance of the Spearman rank correlation coefficient for $n_v = 10$

Номер реализации	Коэффициент корреляции Спирмена	Ошибка		Суммарный риск ошибочного решения
		первого рода	второго рода	
1	0,25	0,657	0,004	0,661
2	0,54	0,336	0,017	0,353
3	0,63	0,270	0,040	0,310
4	0,67	0,215	0,059	0,271
5	0,73	0,177	0,091	0,268
6	0,74	0,163	0,103	0,266
7	0,75	0,161	0,108	0,269
8	0,76	0,146	0,132	0,278
9	0,80	0,110	0,190	0,300
10	0,86	0,087	0,289	0,373
11	0,87	0,077	0,330	0,407

Оптимальные значения КК γ и ρ и соответствующие им суммарные
 риски ошибочных решений $W(\gamma_{1\text{опт}})$ и $W(\rho_{2\text{опт}})$ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Изменение оптимальных значений коэффициентов корреляции
и суммарного риска ошибочного решения в зависимости от объема выборки

Alteration of optimal values of correlation coefficients
and total risk of erroneous decision depending on sample size

Объем выборки	$\gamma_{\text{опт}}$	$W(\gamma_{\text{опт}})$	$\rho_{\text{опт}}$	$W(\rho_{\text{опт}})$
5	0,740	0,20400	0,740	0,26000
8	0,760	0,05200	0,760	0,05600
10	0,770	0,02130	0,770	0,02200
15	0,780	0,00210	0,780	0,00200
20	0,785	0,00015	0,786	0,00017

Графическая иллюстрация фидуциальных распределений $R^*(\gamma/H_1)$, $F^*(\gamma/H_2)$ и функции $W^*(\gamma)$ приведена на рис. 3, а иллюстрация фидуциальных распределений $R^*(\rho/H_1)$, $F^*(\rho/H_2)$ и $W^*(\rho)$ – на рис. 4.

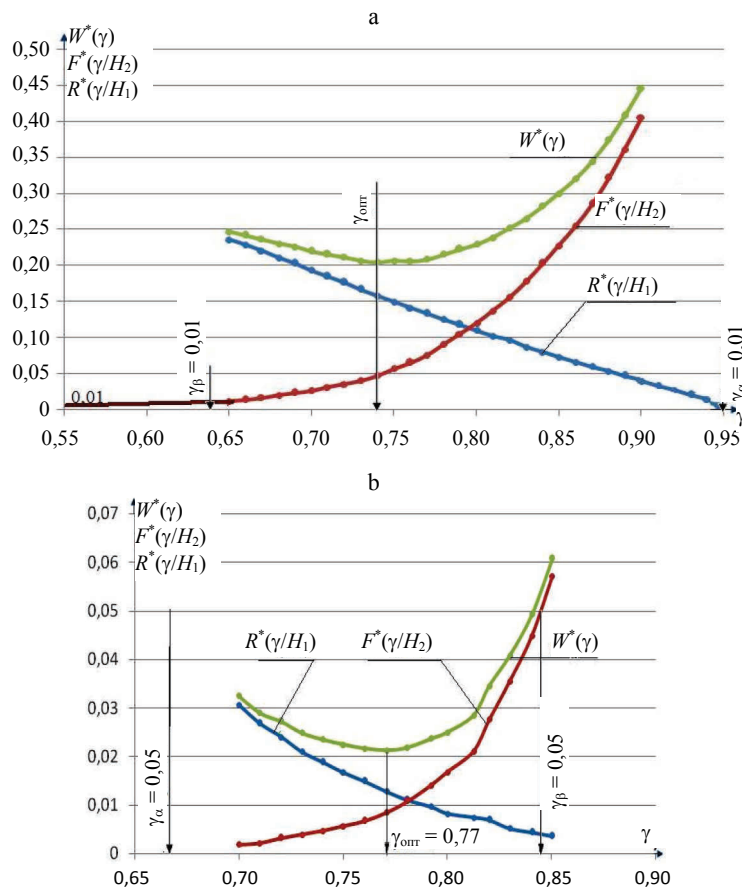


Рис. 3. Закономерности изменения фидуциальных распределений $R^*(\gamma/H_1)$ и $F^*(\gamma/H_2)$ и суммарного риска ошибочного решения $W^*(\gamma)$ для: а – $n_v = 5$; б – 10

Fig. 3. Regularities of alterations in the fiducial distributions $R^*(\gamma/H_1)$ and $F^*(\gamma/H_2)$ and the total risk of the solution $W^*(\gamma)$ for: а – $n_v = 5$; б – 10

Анализ рис. 1, 2 совместно с табл. 2, 3 показывает:

- прерывистый характер закономерности изменения суммарного риска ошибочного решения $W^*(\rho)$ обуславливается дискретным характером распределений $R^*(\rho/H_1)$ и $F^*(\rho/H_2)$;
- поскольку $F^*(\gamma/H_2) < F^*(\rho/H_2)$ при $\gamma = \rho$ (рис. 1b, 2b), а $F^*(\gamma/H_1) = F^*(\rho/H_1)$ (рис. 1a, 2a), величины оптимального значения $\gamma_{\text{опт}}$ и $\rho_{\text{опт}}$ при одном и том же n_v также равны, а суммарный риск ошибочного решения $W^*(\gamma_{\text{опт}}) < W^*(\rho_{\text{опт}})$. Максимальное значение величины минимального суммарного риска ошибочного решения для КК γ и ρ имеет место при $n_v = 5$ и составляет: для КК Пирсона $W(\gamma_{\text{опт}}) = 0,204$ и для КК Спирмена $W(\rho_{\text{опт}}) = 0,260$;
- квантиль фидуциальных распределений $R^*(\gamma/H_1)$ и $R^*(\gamma/H_2)$ при условии, что $R^*(\gamma/H_1) = R^*(\gamma/H_2)$ не равен $\gamma_{\text{опт}}$, так же как $W^*(\gamma_{\text{опт}}) > [R^*(\gamma/H_1) + F^*(\gamma/H_2)]$. Это расхождение при увеличении объема выборки n_v уменьшается.

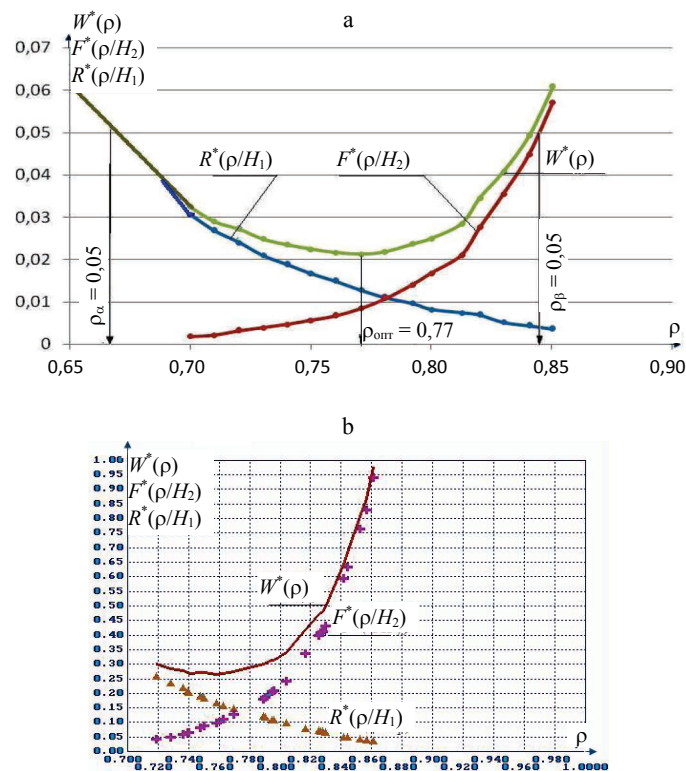


Рис. 4. Закономерности изменения фидуциальных распределений $R^*(\rho/H_1)$ и $F^*(\rho/H_2)$ и суммарного риска ошибочного решения $W^*(\rho)$ для:
а – $n_v = 5$; б – 10

Fig. 4. Regularities of alterations in the fiducial distributions $R^*(\rho/H_1)$ and $F^*(\rho/H_2)$ and the total risk of the solution $W^*(\rho)$ for:
а – $n_v = 5$; б – 10

Анализ изменения матрицы значимых статистических связей при переходе к критерию (5) рассмотрим на примере результатов расчета коэффициентов линейной (γ) и ранговой (ρ) корреляции ТЭП котельных установок энергоблоков 300 МВт [6].

Среднемесячные значения этих ТЭП приведены в табл. 5, а результаты расчетов экспериментальных значений γ_3 и ρ_3 – в табл. 6 (в верхнем треугольнике матрицы – значения γ_3 , в нижнем – ρ_3). В ячейках матрицы жирным шрифтом выделены реализации γ_3 и ρ_3 , которые превышают критические значения γ_k и ρ_k , равные для $\alpha = 0,01$ $\gamma_k = \rho_k = 0,834$. Учитывая, что при $n_v = 8$ (число рассматриваемых энергоблоков) оптимальное значение КК $\gamma_{\text{опт}} = \rho_{\text{опт}} = 0,77$ и меньше, чем $\gamma_k = \rho_k$, число значимых статистических связей возрастает.

Таблица 5

**Среднемесячные значения технико-экономических показателей
котельных установок энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе**
**Average monthly values of technical and economic indicators
of boiler plants of power units of 300 MWt on gas-oil fuel**

№ п/п ТЭП	Наименование показателя	Условные номера энергоблоков							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	Удельная паропроизводительность $H_{\text{сп}}$, т/ч	628,2	604,2	605,6	530,3	565,6	595,2	544,2	615,8
2	Удельный расход питательной воды B , т/ч	638,1	614,2	614,2	539,3	582,8	607,3	558,3	622,8
3	Температура питательной воды $T_{\text{п}}$, °С	246,2	233,8	244	241,5	230,3	242,4	233,7	248,8
4	Расход теплоты «брутто» Q_b , г/Дж/ч	418,3	404,3	405,1	360,3	382,0	399,1	368,9	411,0
5	Температура воздуха после РВП $T_{\text{в}}$, °С	284,2	277,6	280,8	281,2	278,3	286,5	281,7	284,6
6	Температура уходящих газов $T_{\text{у.г}}$, °С	102,9	115,2	108,7	105,3	128,3	120,7	117,2	110,9
7	Коэффициент избытка воздуха $K_{\text{в}}$, о. е.	1,197	1,253	1,286	1,29	1,257	1,322	1,185	1,229
8	Потери теплоты с уходящими газами $Q_{\text{у.г}}$, %	5,96	6,89	6,92	6,72	8,43	7,49	6,58	6,64
9	Присос воздуха на тракте ΔS , %	42,2	41,8	56,0	51,9	66,2	43,2	36,9	51,5
10	КПД «брутто» η_b , %	91,55	90,95	91,21	87,88	92,34	89,45	90,29	88,22
11	Доля ЭЭ на С.Н. $\mathcal{E}_{\text{сн}}$, %	2,22	2,12	2,17	2,94	2,46	2,18	2,73	1,93
12	Доля ТЭ на С.Н. $\mathcal{Q}_{\text{сн}}$, %	1,35	1,72	1,94	1,53	2,21	2,08	1,88	2,08
13	КПД «нетто» η_n , %	85,267	85,015	84,502	83,74	83,983	84,582	81,625	85,33

Таблица 6

Результаты расчетов коэффициентов линейной и ранговой корреляций между технико-экономическими показателями котельных установок энергоблоков 300 МВт

Results of calculations of coefficients of linear and rank correlations between technical and economic indicators of boiler plants of power units of 300 MWt

№ п/п ТЭП	Условный номер ТЭП												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1		0,829346	0,184618	0,83940	0,040325	0,156987	-0,06803	0,197583	0,311604	0,49926	-0,82107	0,234164	0,728649
2	0,981		0,353576	0,98932	0,341142	-0,09612	-0,54718	-0,3671	-0,46028	0,237156	-0,9043	-0,0029	0,922831
3	0,535	0,413		0,53081	0,736831	-0,71208	0,083816	-0,57543	-0,10654	-0,69539	-0,42571	-0,25423	0,554055
4	0,673	0,745	0,007		0,311216	-0,23954	-0,09306	-0,26421	-0,10778	0,142773	-0,93135	-0,03933	0,805201
5	0,510	0,447	0,299	0,109		-0,26628	0,059385	-0,34272	-0,35807	-0,63230	-0,2598	-0,01395	0,19387
6	-0,233	-0,252	-0,372	0,090	-0,204		0,179578	0,872032	0,292168	0,643937	-0,00386	0,78869	-0,28962
7	-0,296	-0,195	-0,697	-0,282	-0,056	0,204		0,503687	0,364897	-0,10643	-0,03479	0,295403	0,268613
8	-0,399	-0,338	-0,743	0,090	-0,166	0,850	0,525		0,66112	0,61288	0,041819	0,756732	-0,08455
9	-0,261	-0,14	-0,800	0,253	-0,313	0,175	0,469	0,545		0,318059	0,009087	0,460525	0,196428
10	0,145	0,157	-0,113	0,455	-0,383	0,228	-0,302	0,020	-0,025		-0,13582	0,41771	-0,11127
11	-0,821	-0,840	-0,413	-0,549	-0,132	0	0,006	0,169	0,140	-0,031		-0,27608	-0,76213
12	0,032	0,032	-0,370	0,279	0,156	0,725	0,263	0,774	0,506	-0,206	-0,159		-0,10887
13	0,844	0,896	0,411	0,755	0,089	-0,153	-0,217	-0,281	-0,168	0,268	-0,896	-0,065	

Все изменения значимых статистических связей определяют результаты ранжирования объектов. Алгоритм ранжирования приведен в [7–10].

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ нахождения статистически значимых связей технико-экономических показателей объектов электроэнергетических систем. Он рекомендуется к применению при малых объемах сопоставляемых выборок технико-экономических показателей и отсутствии приоритетов последствий ошибок первого и второго рода.

2. Способ основан на сопоставлении оценок коэффициентов корреляции, вычисленных по статистическим данным эксплуатации с оптимальным значением однотипного коэффициента корреляции.

3. Оптимальное значение коэффициента корреляции вычисляется по фидуциальным распределениям и соответствует минимальному значению суммарного риска ошибочного решения.

4. Фидуциальные распределения возможных реализаций коэффициентов корреляции для заданной величины объема выборки вычисляются по разработанным алгоритмам и программам.

5. Пример расчета иллюстрирует существенное влияние кластеров технико-экономических показателей на результаты ранжирования котельных установок энергоблоков 300 МВт на газомазутном топливе. Кластеры показателей представляются своими эквивалентными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов, А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. М.: Изд-во «Экзамен», 2004, 656 с.
2. Кендалл, М. Статистические выводы и связи / М. Кендалл, А. Стьюарт. М.: Наука, 1973. 900 с.
3. Оценка взаимосвязи технико-экономических показателей объектов ЭЭС / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Электронное моделирование. 2017. Т. 39, № 6. С. 93–106.
4. Reliability of the Estimate of Interrelation of Parameters Efficiency Their Work of Objects of Ees / E. M. Farhadzadeh [et al.] // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, № 2. P. 21–27.
5. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. М.: Физматлит, 2006. 628 с.
6. Повышение надежности и экономичности котельных установок блочных электростанций / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики: материалы Международного семинара имени Ю.Н. Руденко. С. 404–410.
7. Фархадзаде, Э. М. Автоматизированные формирования рекомендаций для повышения надежности и экономичности энергоблоков ТЭС / Э. М. Фархадзаде, Ю. З. Фарзалиев, А. З. Мурадалиев // Энергетик. 2016. № 2. С. 15–17.
8. Farhadzadeh, E. M. Criteria the Estimation Expediency of Classification Information on Reliability of the Equipment and Devices EPS / E. M. Farhadzadeh, A. Z. Muradaliyev, S. A. Abdullayeva // Reliability: Theory & Applications. 2016. Vol. 10, No 2. P. 42–47.

9. Совершенствование методов повышения надежности объектов электроэнергетических систем: переход от качественного к количественному подходу формирования решений по повышению надежности объектов электроэнергетических систем / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Электричество. 2016. № 8. С. 18–28.
10. Метод и алгоритмы расчета показателей надежности по многомерным данным / Э. М. Фархадзаде [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.

Поступила 28.04.2017 Подписана в печать 09.07.2017 Опубликована онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Orlov A. I. (2004) *Applied Statistics*. Moscow, Ekzamen Publ. 656 (in Russian).
2. Kendal M., Stuart M. (1973) *Statistical Findings and Links*. Moscow, Nauka Publ. 900 (in Russian).
3. Farkhadzade E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Rafieva T. K., Abdullaeva S. A. (2017) Evaluation of the Relationship of Technical and Economic Indicators of Objects of the Electric Power System. *Elektronnoe Modelirovanie = Electronic Modeling*, 39 (6), 93–106 (in Russian).
4. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Y. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2017) Reliability of the Estimate of Interrelation of Parameters Efficiently Their Work of Objects of Ees. *Reliability: Theory & Applications*, 12 (2), 21–27.
5. Kobzar' A. I. (2006) *Applied Mathematical Statistics*. Moscow, Fizmatlit Publ. 628 (in Russian).
6. Farkhadzade E. M., Farzaliyev Yu. Z., Muradaliyev A. Z., Rafieva T. K. (2015) Increase of Reliability and Efficiency of Boiler Plants of Block Power Plants. *Metodicheskie Voprosy Issledovaniya Nadezhnosti Bol'shikh Sistem Energetiki. Vyp. 66: Aktual'nye Problemy Nadezhnosti Sistem Energetiki: Materialy Mezhdunarodnogo Seminara im. Yu. N. Rudenko* [Methodical Problems of Research of Reliability of Big Systems of Power Engineering, Issue 66: Actual Problems of the Reliability of Energy Systems: Materials of the International Seminar. Yu. N. Rudenko]. Minsk, Belarusian National Technical University, 404–410 (in Russian).
7. Farhadzadeh E. M., Farzaliyev Yu. Z., Muradaliyev A. Z. (2016) Automated Formation of Recommendations to Improve the Reliability and Efficiency of Thermal Power Plants. *Energetik = Power & Electrical Engineering*, (2), 15–17 (in Russian).
8. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Abdullayeva S. A. (2016) Criteria the Estimation Expediency of Classification Information on Reliability of the Equipment and Devices EPS. *Reliability: Theory & Applications*, 10 (2), 42–47.
9. Farkhadzade E. M., Muradaliyev A. Z., Farzaliyev Yu. Z., Abdullaeva S. A. (2016) Improvement of Methods for Improving the Reliability of Electric Power System Facilities. (The Shift From Qualitative to Quantitative Approach of Shaping the Decisions on Increase of Reliability of Objects of Electric Power Systems). *Electrichestvo* [Electricity], (8), 18–28 (in Russian).
10. Farhadzadeh E. M., Muradaliyev A. Z., Rafiyeva T. K., Abdullayeva S. A. (2017) Method and Algorithms of Calculation of Parameters of Reliability in Accordance with Multivariate Data. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 16–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-16-29>.

Received: 28 April 2017

Accepted: 9 July 2017

Published online: 30 May 2018

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-207-219>

УДК 621.311:017

О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID

М. И. Фурсанов¹⁾, А. А. Золотой¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Усовершенствована одна из основных задач, решаемых для всех электрических сетей с разомкнутой топологией, в том числе для городских электрических сетей, а именно – задача выбора оптимальных точек размыкания. Показано, что насыщение городских сетей распределенными источниками малой генерации приводит к тому, что определяемые режимные параметры в условиях городских SMART GRID становятся наблюдаемыми. Поэтому большинство задач управления режимами, характерных для городских распределительных электрических сетей традиционного исполнения, в SMART GRID свою актуальность теряют. Основной технологической задачей является совершенствование выбора оптимальных точек размыкания сетей. Городские электрические сети ОЭС Беларуси активно насыщаются распределенными источниками малой генерации, которые могут подключаться к высоковольтным шинам потребительских трансформаторных подстанций, в том числе на стороне нагрузки, и оснащаются автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой и поддержания автономной работы. Поэтому учет таких генерирующих источников в задачах управления режимами городских электрических сетей как традиционных, так и в условиях SMART GRID становится необходимым. В статье предложены методика и алгоритм выбора оптимальных точек размыкания городских электрических сетей с учетом различных условий применения источников малой генерации: когда источник работает параллельно с электрической сетью и имеет постоянные активную и реактивную генерации или питает изолированную от сети нагрузку с учетом ограничения на генерируемую источником мощность. Решение этой задачи позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в сети в значительно большей степени, чем от внедрения любого другого эксплуатационного мероприятия. Разработанный алгоритм апробирован на примере оптимизации точек размыкания фрагмента городской распределительной сети 10 кВ. Также предложено эффективное решение задачи выбора начальных положений точек размыкания городских сетей на основе алгоритма Дейкстры, что в значительной мере сокращает время их оптимизации.

Ключевые слова: городская сеть, разомкнутая топология, оптимум, точка размыкания, распределенный источник, малая генерация, алгоритм, фрагмент, алгоритм Дейкстры

Для цитирования: Фурсанов, М. И. О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 207–219. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-207-219>

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Fursanov Mishail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

On the Choice of the Optimal Points of Opening in City Power Grids in the Conditions of the SMART GRID

M. I. Fursanov¹⁾, A. A. Zolotoy¹⁾

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

Abstract. One of the main tasks being solved for all electric networks with open topology, including city electric networks, viz. a task of the choice of optimum points of disconnection, has been improved. It is shown that saturation of urban networks with distributed sources of small-scale generation causes the fact that mode parameters being determined in the urban SMART GRID conditions become observable. Therefore, the majority of problems of mode control, typical for urban distribution electric networks of a traditional design, lose their relevance under the SMART GRID conditions. The main technological task is to improve the selection of optimal points of disconnection of networks. Urban electric networks of the Belarusian United Energy System are actively saturated with distributed sources of small-scale generation, which can be connected to high-voltage buses of consumer transformer substations, including the ones on the load side; and they are equipped with automation to ensure synchronous operation with the power system and maintain autonomous operation. Therefore, the accounting of such generating sources becomes necessary as one of the objectives of managing the modes of urban electric networks (both traditional ones and the ones in the SMART GRID conditions). In the article the technique and algorithm of choice of optimal points of disconnection of city electric networks are proposed taking into account various conditions of application of sources of small generation: when the source operates in parallel with an electric network and has constant active and reactive generation or energizes the load isolated from a network taking into account restrictions of the power generated by a source. The solution of this task makes it possible to reduce losses of power and the electricity in a network much more than because of implementation of any other operational action. The developed algorithm was tested through the example of optimization of the points of disconnection of the fragment of the urban distribution network of 10 kV. An effective solution to the problem of choosing the initial positions of the points of disconnection of urban networks based on the Dijkstra algorithm is also proposed, which significantly reduces the time of their optimization.

Keywords: city power grid, open topology, optimum, open point, distributed source, small-scale generation, algorithm, fragment, Dijkstra algorithm

For citation: Fursanov M. I., Zolotoy A. A. (2018) On the Choice of the Optimal Points of Opening in City Power Grids in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 207–219. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-207-219> (in Russian)

Одно из основных отличий SMART GRID от городских электрических сетей традиционного исполнения – наблюдаемость. В традиционных городских сетях 6–10 кВ доступной режимной информацией являются показания индукционных счетчиков активной и реактивной электроэнергии на головных участках распределительных линий за месяц, а также месячные данные цифровых приборов учета электроэнергии на вводах 6–10 кВ трансформаторов питающих подстанций 35 кВ и выше, включая получасовые графики электроэнергии [1–5]. В городских сетях 0,38 кВ традиционного исполнения доступной информацией о режиме являются только данные энергосбыта об электропотреблении абонентов [1]. В условиях SMART GRID, напротив, доступны графики временного изменения всех режимных параметров сети, которые для сетей традиционного исполнения определяются только в результате электрических расчетов.

Задачи управления режимами городских электрических сетей традиционного исполнения так или иначе сводятся к расчету режимных парамет-

ров, оперативное измерение которых технически невозможно, и затем – к формированию на их основе управляющих воздействий. В условиях SMART GRID сеть является полностью наблюдаемой и задачи управления сводятся к непрерывному поддержанию оптимального состояния режимов сети, складывающихся при постоянном изменении нагрузок потребителей и источников электроэнергии.

Управляющие воздействия в городских электрических сетях традиционного исполнения обычно формируются сезонными, так как возможность дистанционного управления электрооборудованием отсутствует. В условиях SMART GRID оперативные управляющие воздействия формируются всегда.

В последние годы городские распределительные электрические сети ОЭС Беларуси активно насыщаются распределенными источниками малой генерации. Они могут подключаться к шинам ТП, в том числе на стороне нагрузки, и оснащаются автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой и поддержания автономной работы. Поэтому учет таких источников в задачах управления режимами городских электрических сетей как традиционных, так и в условиях SMART GRID становится необходимым.

Основная задача, которую приходится решать для всех электрических сетей с разомкнутой топологией, в том числе и для городских распределительных сетей, – выбор их оптимальных точек размыкания. Решение этой задачи позволяет снизить потери мощности и электроэнергии в сети в значительно большей степени, чем от внедрения любого другого эксплуатационного мероприятия, доступного в электрических сетях данного класса. Насыщение городских сетей распределенными источниками малой генерации требует совершенствования методов определения мест их оптимального размыкания как в условиях SMART GRID, так и для сетей традиционного исполнения.

Авторами предложены методика и алгоритм определения мест оптимального размыкания (разреза) городских электрических сетей с учетом распределенных источников малой генерации. Методика разработана для следующих условий:

- источник распределенной генерации работает параллельно с электрической сетью и имеет постоянные активную и реактивную генерации;
- источник распределенной генерации обеспечивает питание изолированной от сети нагрузки с учетом ограничения на генерируемую источником мощность.

Блок-схема разработанного алгоритма приведена на рис. 1.

Решение задачи начинается с выбора в блоке 1 начальных положений точек разреза (размыкания) сети. Блок 2 выбирает текущую рассматриваемую точку размыкания.

В блоке 3 выполняется замыкание разреза в текущей точке сети и схема преобразуется к линии с двусторонним питанием, которая эквивалентруется относительно своей магистрали. Пример исходной и эквивалентной схем сети относительно магистрали $A-B$ линии с двусторонним питанием показан на рис. 2.

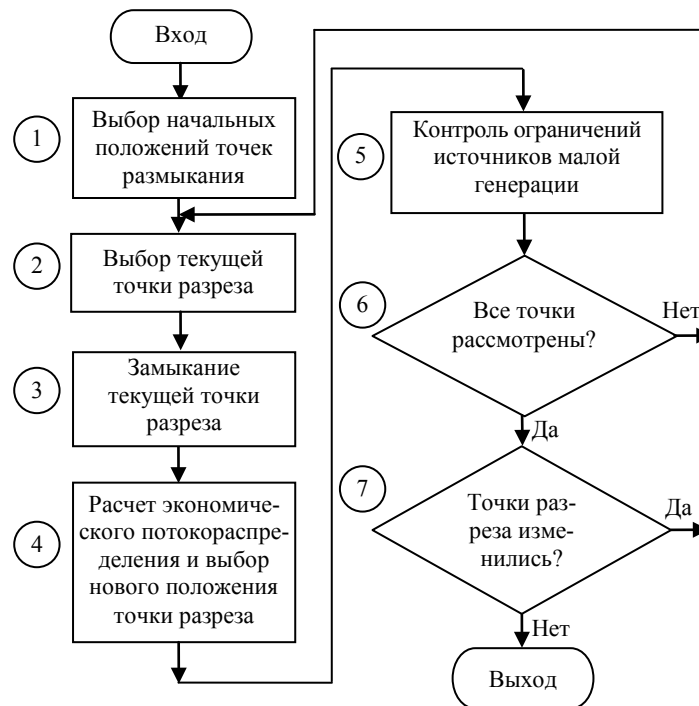


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимизации мест размыкания городских электрических сетей с учетом распределенных источников малой генерации

Fig. 1. Block diagram of the algorithm of optimization of places of disconnection of city power grids taking into account the distributed sources of small generation

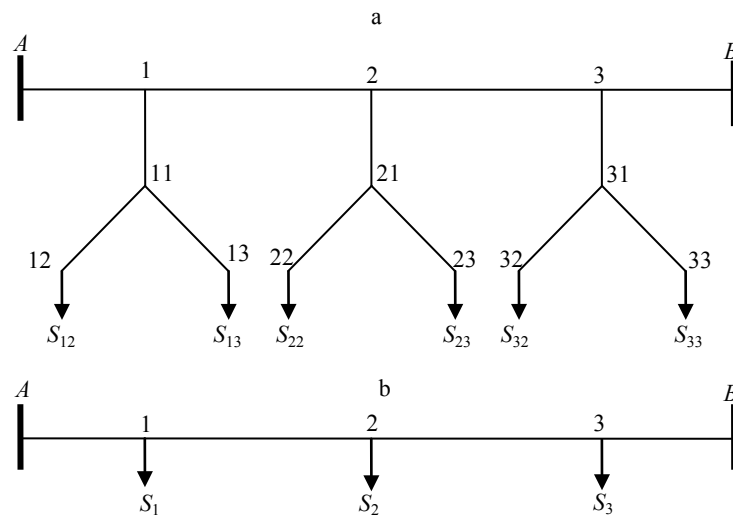


Рис. 2. Исходная (а) и эквивалентная (б) схемы сети линии с двусторонним питанием

Fig. 2. Initial (a) and equivalent (b) circuits of a two-way power line network

При эквивалентировании сети применяются допущения, традиционные для распределительных электрических сетей напряжением 10 кВ и ниже [6–8]. Например, определение потерь мощности на участках рас-

пределительных линий, подключенных к узлам 1, 2, 3 (рис. 2а), может выполняться по номинальному напряжению и полагая, что потоки мощности в начале и конце каждого участка одинаковы.

Исходя из изложенного, для схемы рис. 2 можно записать:

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= \underline{S}_{12} + \underline{S}_{13} + \left| \frac{\underline{S}_{12}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{11-12} + \left| \frac{\underline{S}_{13}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{11-13} + \left| \frac{\underline{S}_{12} + \underline{S}_{13}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{1-11}; \\ \underline{S}_2 &= \underline{S}_{22} + \underline{S}_{23} + \left| \frac{\underline{S}_{22}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{21-22} + \left| \frac{\underline{S}_{23}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{21-23} + \left| \frac{\underline{S}_{22} + \underline{S}_{23}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{2-21}; \\ \underline{S}_3 &= \underline{S}_{32} + \underline{S}_{33} + \left| \frac{\underline{S}_{32}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{31-32} + \left| \frac{\underline{S}_{33}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{31-33} + \left| \frac{\underline{S}_{32} + \underline{S}_{33}}{U_{\text{ном}}} \right|^2 \underline{z}_{3-31}.\end{aligned}$$

Блок 4 (рис. 1) производит расчет экономического потокораспределения и выбор нового положения точки размыкания сети.

Экономическое потокораспределение в сети определяется по формуле

$$\underline{S}_{A1\alpha} = \frac{\sum_i \underline{S}_i r_{iB}}{r_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где $\underline{S}_{A1\alpha}$ – экономический поток мощности на первом головном участке линии; $\underline{S}_i$ – нагрузка в i -м узле магистрали сети; r_{iB} – суммарное активное сопротивление участков плеча магистрали сети от i -го узла до второго источника питания B ; r_{Σ} – то же всех участков магистрали сети от первого источника питания до второго.

На основе анализа результатов выполненного расчета экономического потокораспределения выбирается участок сети с наименьшим потоком мощности и следующее положение точки размыкания сети переносится на данный участок.

Блок 5 выполняет проверку ограничений по допустимой нагрузке малого источника генерации в магистрали рассматриваемой схемы сети. Если нагрузка данного источника превышает допустимое для него значение, то положение текущей точки размыкания сети последовательно смещается в сторону малого источника генерации в порядке убывания потока мощности экономического потокораспределения в сети.

Блоки 2–5 работают для каждой точки возможного размыкания сети (блок 6). Когда все возможные точки размыкания сети рассмотрены, выполняется проверка (блок 7) – изменились их положения или нет. Если в результате выполнения блоков 2–5 положение хотя бы одной точки размыкания сети изменилось, то управление передается в блок 2 и процесс оптимизации положений точек размыкания сети (блоки 2–5) повторяется. Если в результате выполнения блоков 2–5 положения точек размыкания сети не изменились, то расчет заканчивается.

Предложенный алгоритм апробирован на примере оптимизации точек размыкания в фрагменте городской электрической сети 10 кВ, представ-

ленной на рис. 3. На схеме рис. 3 нанесены параметры сети и исходные режимные данные ($\underline{S}$). Знаком «*» отмечены источники малой генерации, способные работать на выделенную нагрузку, отдельно от электрической сети. В схему включены источники питания как с постоянной активно-реактивной генерацией, так и с генерацией, регулируемой под выделенную нагрузку, что позволяет произвести комплексную проверку предложенной методики для каждого случая ее применения. На схеме рис. 3 видны две точки размыкания, имеющие текущие положения в ветвях 2–21 и 4–5.

Начальное приближение положений точек размыкания сети целесообразно выбирать таким, чтобы электрические расстояния до источников питания, скорректированные по условиям исходного обеспечения допустимой нагрузки источников малой генерации, были бы по возможности равны между собой или близки друг к другу. Основные подходы к выбору начальных положений точек размыкания контуров в схемах распределительных электрических сетей 6–10 кВ рассмотрены в [9].

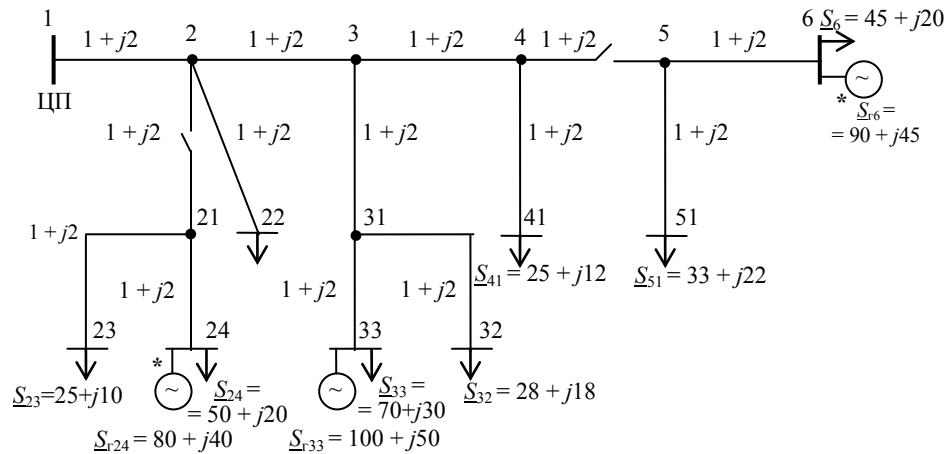


Рис. 3. Фрагмент городской распределительной электрической сети 10 кВ

Fig. 3. A fragment of the city distribution power grid networks of 10 kV

Решение задачи начинается с выбора текущего разреза сети, положение которого оптимизируется. В качестве текущего принят разрез в ветви 2–21 схемы сети. Замыкаем выбранный разрез и выполняем расчет экономического потокораспределения в схеме образовавшейся линии с двусторонним питанием, представленной на рис. 4.

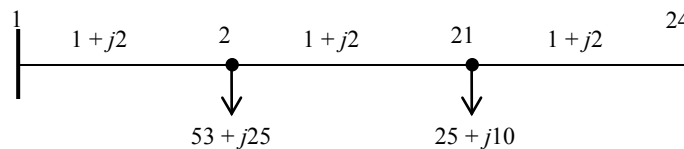


Рис. 4. Расчетная схема линии с двусторонним питанием, полученная при замыкании текущего разреза в ветви 2–21 схемы рис. 3

Fig. 4. The design scheme of the line with two-way power, obtained by closing the current section in the branch 2–21 of the circuit of fig. 3

Значение экономического потока мощности в ветви 1–2 схемы рис. 4 вычисляется по формуле (1):

$$P_{1-2} = \frac{P_2(r_{2-21} + r_{21-24}) + P_{21}r_{21-24}}{r_{1-2} + r_{2-21} + r_{21-24}} = \frac{53 \cdot 2 + 25 \cdot 1}{3} = 43,7 \text{ кВт};$$

$$Q_{1-2} = \frac{Q_2(r_{2-21} + r_{21-24}) + Q_{21}r_{21-24}}{r_{1-2} + r_{2-21} + r_{21-24}} = \frac{25 \cdot 2 + 10 \cdot 1}{3} = 20,0 \text{ квар.}$$

Экономические потоки мощности на других участках схемы:

$$\underline{S}_{2-21} = \underline{S}_{1-2} - \underline{S}_2 = (43,7 + j20) - (53 + j25) = -9,3 - j5,0 \text{ кВт} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_{21-24} = \underline{S}_{2-21} - \underline{S}_{21} = (-9,3 - j5) - (25 + j10) = 34,3 + j5,0 \text{ кВт} \cdot \text{А}.$$

Модули экономических потоков мощности на всех участках схемы:

$$|S_{1-2}| = \sqrt{P_{1-2}^2 + Q_{1-2}^2} = \sqrt{43,7^2 + 20^2} = 48,1 \text{ кВт} \cdot \text{А};$$

$$|S_{2-21}| = \sqrt{P_{2-21}^2 + Q_{2-21}^2} = \sqrt{(-9,3)^2 + (-5)^2} = 10,6 \text{ кВт} \cdot \text{А};$$

$$|S_{21-24}| = \sqrt{P_{21-24}^2 + Q_{21-24}^2} = \sqrt{34,3^2 + 5^2} = 34,7 \text{ кВт} \cdot \text{А}.$$

Видно, что наименьший экономический поток мощности получился на ветви 2–21, в которой установлен текущий разрез сети, поэтому принятое исходное текущее положение разреза в ветви 2–21 является оптимальным.

Перейдем к оптимизации текущего положения разреза в ветви 4–5. Замкнем выбранный разрез и выполним расчет экономического потокораспределения в схеме образовавшейся линии с двусторонним питанием, представленной на рис. 5.

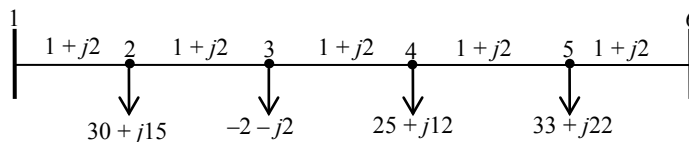


Рис. 5. Расчетная схема линии с двусторонним питанием, образовавшейся при замыкании разреза в ветви 4–5 схемы рис. 3

Fig. 5. The design scheme of the line with two-way power, formed by closing the current section in the branch 4–5 of the circuit of fig. 3

Значение экономического потока мощности в ветви 1–2 схемы рис. 5 определим по формуле (1):

$$P_{1-2} = \frac{P_2(r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}) + P_3(r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6})}{r_{1-2} + r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}} + \frac{P_4(r_{4-5} + r_{5-6}) + P_5r_{5-6}}{r_{1-2} + r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}} = \frac{30 \cdot 4 - 2 \cdot 3 + 25 \cdot 2 + 33 \cdot 1}{5} = 39,4 \text{ кВт};$$

$$Q_{1-2,3} = \frac{Q_2(r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}) + Q_3(r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6})}{r_{1-2} + r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}} +$$

$$+ \frac{Q_4(r_{4-5} + r_{5-6}) + Q_5 r_{5-6}}{r_{1-2} + r_{2-3} + r_{3-4} + r_{4-5} + r_{5-6}} = \frac{15 \cdot 4 - 2 \cdot 3 + 12 \cdot 2 + 22 \cdot 1}{5} = 20,0 \text{ квар.}$$

Экономические потоки мощности на остальных участках схемы:

$$\underline{S}_{2-3,3} = \underline{S}_{1-2,3} - \underline{S}_2 = (39,4 + j20) - (30 + j15) = 9,4 + j5,0 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_{3-4,3} = \underline{S}_{1-2,3} - \underline{S}_3 = (9,4 + j5,0) - (-2 - j2) = 11,4 + j7,0 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_{4-5,3} = \underline{S}_{3-4,3} - \underline{S}_4 = (11,4 + j7,0) - (25 + j12) = -13,6 - j5,0 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_{5-6,3} = \underline{S}_{4-5,3} - \underline{S}_5 = (-13,6 - j5,0) - (33 + j22) = -46,6 - j27,0 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Модули экономических потоков мощности в схеме:

$$|S_{1-2,3}| = \sqrt{P_{1-2,3}^2 + Q_{1-2,3}^2} = \sqrt{39,4^2 + 20^2} = 44,2 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$|S_{2-3,3}| = \sqrt{P_{2-3,3}^2 + Q_{2-3,3}^2} = \sqrt{9,4^2 + 5^2} = 10,6 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$|S_{3-4,3}| = \sqrt{P_{3-4,3}^2 + Q_{3-4,3}^2} = \sqrt{11,4^2 + 7^2} = 13,4 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$|S_{4-5,3}| = \sqrt{P_{4-5,3}^2 + Q_{4-5,3}^2} = \sqrt{(-13,6)^2 + (-5)^2} = 14,5 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$|S_{5-6,3}| = \sqrt{P_{5-6,3}^2 + Q_{5-6,3}^2} = \sqrt{(-46,6)^2 + (-27)^2} = 53,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Наименьший экономический поток мощности получился на участке 2–3, поэтому начальное положение разреза сети следует перенести из ветви 4–5 в оптимальную ветвь 2–3.

Мощность источника малой генерации в узле 6 схемы рис. 3 $\underline{S}_{г6} = 90 + j45$ кВт. При этом в узле 6 подключена нагрузка мощностью $\underline{S}_6 = 45 + j20$ кВт. Суммарная расчетная мощность нагрузки $\underline{S}_{р6}$, которая должна будет питаться от источника малой генерации в узле 6 при установке точки размыкания сети на участке 2–3, составит

$$\underline{S}_{р6} = \underline{S}_6 + \underline{S}_5 + \underline{S}_4 + \underline{S}_3 = 45 + j20 + 33 + j22 + 25 + j12 - 2 - j2 =$$

$$= 101 + j52 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Видно, что суммарная расчетная мощность нагрузки источника в узле 6 $\underline{S}_{р6}$ превышает его максимальную мощность генерации ($\underline{S}_{р6} > \underline{S}_{г6}$). Поэтому полученное положение точки размыкания сети придется перенести ближе к узлу 6 схемы на один участок, а именно – на участок 3–4, и снова вычислить суммарную расчетную мощность нагрузки, которая будет питаться от источника малой генерации в узле 6 при установке точки размыкания сети на участке схемы 3–4:

$$\underline{S}_{p6} = S_6 + S_5 + S_4 = 45 + j20 + 33 + j22 + 25 + j12 = 103 + j54 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчетная мощность нагрузки источника в узле 6 снова превышает значение $\underline{S}_{r6}$, т. е. $\underline{S}_{p6} > \underline{S}_{r6}$. Перенесем положение точки размыкания сети ближе к узлу 6 схемы еще на один участок (участок 4–5) и снова вычислим суммарную расчетную мощность нагрузки источника в узле 6

$$\underline{S}_{p6} = S_6 + S_5 = 45 + j20 + 33 + j22 = 78 + j42 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Расчетная мощность нагрузки источника в узле 6 наконец стала меньше максимальной мощности генерации ($\underline{S}_{p6} < \underline{S}_{r6}$). Это означает, что оптимальное положение точки размыкания сети с учетом ограничений по мощности источника малой генерации должна остаться на участке 4–5 схемы сети.

В результате проведенного исследования установлено, что исходные положения точек размыкания изменять не следует, поэтому дальнейшее уточнение их положения не требуется. Задача решена.

Результаты расчетов суммарных потерь активной мощности в схеме рис. 3 при возможных положениях точек размыкания сети приведены в табл. 1.

Таблица 1

Суммарные потери активной мощности в схеме рис. 3
при различных положениях точек размыкания

Total losses of active power in the circuit of fig. 3
at different positions of the opening points

Положение 1 точек размыкания	Положение 2 точек размыкания	Суммарные потери мощности
2–21	4–5	0,125
21–24	4–5	0,177
2–21	5–6	0,299
21–24	5–6	0,335

Из табл. 1 видно, что наименьшее значение суммарных потерь активной мощности в схеме соответствует точкам размыкания сети на участках 4–5 и 2–21.

Блок-схема разработанного алгоритма, реализующего выбор исходных положений точек размыкания городских распределительных сетей перед началом их оптимизации, представлена на рис. 6.

Удачный выбор начальных положений точек размыкания сети значительно сокращает время их оптимизации. При равномерном распределении нагрузок начальные положения точек размыкания схемы, выбранные на основе электрических расстояний между узлами нагрузки и источника питания, практически совпадают с их оптимальными положениями. При этом важно, чтобы решение задачи выбора начального приближения выполнялось за небольшое и заранее предусмотренное количество шагов.

Определение электрических расстояний от узлов нагрузки до источников питания схемы выполняется на основе алгоритма Дейкстры [10]. Данный алгоритм решает задачу о кратчайших путях из одной вершины

до остальных на взвешенном ориентированном графе $G = (V, E)$ с исходной вершиной s , в котором веса всех ребер неотрицательны ($u, v \geq 0$ для всех $(u, v) \in E$). Ориентированный граф $G = (V, E)$ состоит из множества вершин V и множества ориентированных ребер E . Ребра ориентированного графа представляются в виде упорядоченной пары вершин (v, w) , где вершина v является началом, а w – концом ребра.

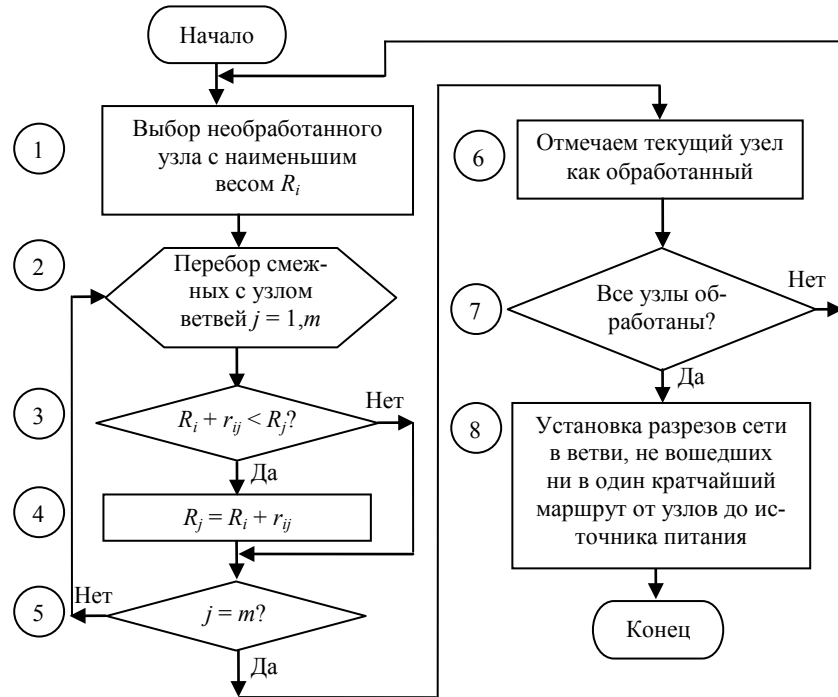


Рис. 6. Блок-схема алгоритма выбора начальных положений мест размыкания городских электрических сетей

Fig. 6. The block diagram of algorithm of the choice of initial provisions of the places of disconnection of city power grids

Весом пути $p = (v_0, v_1, \dots, v_k)$ является сумма весов ребер, входящих в этот путь:

$$w(p) = \sum_{i=1}^k w(v_{i-1}, v_i). \quad (2)$$

Вес кратчайшего пути из u в v по определению равен

$$\delta(u, v) = \begin{cases} \min w(p) : \forall p(u, v); & \text{если } \exists p(u, v); \\ \infty, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

Кратчайшим путем из вершины u к вершине v графа G является любой путь p из u в v , для которого $w(p) = \delta(u, v)$.

Любая часть кратчайшего пути сама является кратчайшим путем. Это значит, что задача о кратчайших путях обладает свойством оптимальности

для подзадач и признаком того, что к ней может быть применен метод динамического программирования или жадный алгоритм.

В процессе работы алгоритма Дейкстры поддерживается множество $S \subseteq V$, состоящее из вершин v , для которых $\delta(s, v)$ уже найдено. Алгоритм выбирает вершину $u \in V/S$ с наименьшим значением $d[u]$ верхней оценки веса кратчайшего пути из s в u , добавляет u к множеству S и производит релаксацию всех ребер, выходящих из u , после чего цикл повторяется. Релаксация ребра $(u, v) \in E$ состоит в уменьшении значения $d[v]$ до величины $d[u] + \omega(u, v)$, притом что $d[v]$ остается верхней оценкой веса. Вершины, не входящие в S , хранятся в очереди Q с приоритетами, определяемыми значениями функции d . Предполагается, что граф G задан списками смежных вершин.

Схемы городских распределительных электрических сетей обычно имеют два и более центров питания. Для приведения задачи к виду, определенному условиями применения алгоритма Дейкстры, вводится один фиктивный центр питания, в котором замыкаются все имеющиеся центры питания схемы. Фиктивный центр питания выступает в роли той вершины ориентированного графа, из которой и определяются кратчайшие пути.

Фиктивный центр питания обозначим вершиной A . Каждой вершине графа схемы назначается вес R , равный минимальному, известному на данном шаге расстоянию от этой вершины до вершины A . На каждом шаге алгоритм, обрабатывая вершину, пытается снизить ее вес. Работа завершается после обработки всех вершин схемы.

Перед началом алгоритма вес вершины A принимается равным нулю, а веса остальных вершин – бесконечности. Это отражает факт того, что расстояния от вершины A до других вершин в данный момент неизвестны. Все вершины графа помечаются как необработанные.

На каждом шаге алгоритма среди необработанных вершин выбирается вершина u , имеющая наименьший вес (рис. 6, блок 1). Рассматриваются все возможные маршруты, в которых выбранная вершина u является предпоследним пунктом (блок 2). Для каждой смежной вершины вычисляется новая длина пути, равная сумме веса выбранной вершины u и веса ребра, соединяющего вершину u с данной смежной вершиной. Если полученная длина оказывается меньше веса смежной вершины, то данный вес заменяется этой длиной (блоки 3, 4). После рассмотрения всех смежных вершин выбранная вершина u отмечается как обработанная, после чего выполняется следующий шаг алгоритма до тех пор, пока не будут обработаны все вершины графа (блок 6). Когда все вершины графа будут обработаны и найдены кратчайшие пути от каждой вершины до вершины A , устанавливаются места размыкания на ребрах графа, которые не остались не включенными ни в один кратчайший путь до вершины A (блок 8).

Сложность алгоритма, представленного на рис. 6, зависит от способа:

- нахождения вершины v ;
- хранения множества необработанных вершин;
- обновления весов вершин.

Если обозначить через n количество вершин и через m число ребер в графе G , то в простейшем случае, когда для поиска вершины с мини-

мальным $d[v]$ просматривается все множество вершин, а для хранения величин d используется несортированный массив, порядок алгоритма будет $O(n^2 + m)$. Основным цикл выполняется n раз, в цикле на нахождение минимума тратится около n операций, плюс количество релаксаций (смен весов), которое не превосходит число ребер m в исходном графе.

Для разреженных графов (где m намного меньше n) необработанные вершины можно хранить в двоичной куче, используя в качестве ключа значения d . Тогда время извлечения i -й вершины из кучи станет $\log n$, притом что время модификации $d[i]$ также возрастет до $\log n$. Поскольку цикл выполняется n раз, а количество релаксаций не больше m , скорость работы такой реализации составит $O(n \log n + m \log n)$. Если хранение необработанных вершин организовать в виде фибоначиевой кучи, для которой удаление i -й вершины в среднем происходит за время $O(\log n)$, а модификации значения $d[i]$ в среднем за $O(1)$, то время работы алгоритма составит $O(n \log n + m)$.

ВЫВОДЫ

1. Определяемые режимные параметры в условиях городских SMART GRID становятся наблюдаемыми, поэтому большинство задач управления режимами, характерных для городских распределительных электрических сетей традиционного исполнения, в условиях SMART GRID теряют свою актуальность. Основной технологической задачей является совершенствование выбора оптимальных точек размыкания сетей.

2. Разработаны методика и алгоритм выбора оптимальных точек размыкания городских электрических сетей с различными условиями эксплуатации распределенных источников малой генерации.

3. Алгоритм апробирован на примере выбора оптимальных точек размыкания в фрагменте городской распределительной сети 10 кВ.

4. Предложен эффективный способ выбора начальных положений точек размыкания городских сетей на основе алгоритма Дейкстры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечения городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.
2. Фурсанов, М. И. Об управлении режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 15–27. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27>.
3. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. М.: ИАЦ «Энергия», 2010. 208 с.
4. Методические принципы расчета и анализа разомкнутых электрических сетей с несколькими источниками питания / М. И. Фурсанов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 5–13.
5. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.

6. Воропай, Н. И. Распределенная генерация в электроэнергетических системах / Н. И. Воропай // Малая энергетика: тр. Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 11–14 окт. 2005 г. / редкол.: В. И. Гладков (гл. ред.) [и др.]. М., 2005. С. 12–14.
7. Герасименко, А. А. Передача и распределение электрической энергии / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. Ростов на/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. 720 с.
8. Фурсанов, М. И. Программно-вычислительный комплекс «GorSr» для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10 (6) кВ / М. И. Фурсанов, А. Н. Муха // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2000. № 3. С. 34–39.
9. Гапанюк, С. Г. Нахождение оптимальных точек разреза контуров в замкнутых сетях 6–10 кВ с использованием ЭВМ / С. Г. Гапанюк, Д. В. Ковальчук // Актуальные проблемы энергетики: материалы 69-й науч.-техн. конф. студ. и асп., Минск, 2014 г. / редкол.: И. П. Матвеев (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2014. С. 87–88.
10. Кратчайшие пути из одной вершины [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://comp-science.narod.ru/KPG/Deikstr.htm>. Дата доступа: 15.06.2016.

Поступила 18.01.2018 Подписана в печать 20.03.2018 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the Smart Grid. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 393–406 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406>.
2. Fursanov M. A., Zalotoy A. A. (2018) On the Management of Urban Electric Networks in the Conditions of the Smart Grid. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 15–27 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-15-27>.
3. Kobets B. B., Volkova I. O. (2010) *Innovative Development of Electric Power Industry on the Basis of SMART GRID Concept*. Moscow, “Energiya” IAC. 208 (in Russian).
4. Fursanov M. I., Zolotoy A. A., Makarevich V. V., Mukha A. N. (2009) Methodical Principles of Calculation and Analysis of Opened Power Network with Several Power Supply Sources. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 5–13 (in Russian).
5. Fursanov M. I., Zalotoy A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).
6. Voropai N. I. (2005) Distributed Generation in Electric Power Systems. *Malaya Energetika: tr. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Moskva, 11–14 Okt. 2005 g.* [Small Power Engineering: Proceedings of the International Scientific-and-Technical Conference, Moscow, 11–14 Oct., 2005]. Moscow, 12–14 (in Russian).
7. Gerasimenko A. A., Fedin V. T. (2006) *Transmission and Distribution of Electrical Energy*. Rostov-on-Don, Feniks Publ.; Krasnoyarsk, Izdatel'skie Proekty Publ. 720 (in Russian).
8. Fursanov M. I., Mukha A. N. (2000) Software and Computing Complex “GorSr” for Calculation and Optimization of Distribution (Urban) Electrical Networks 10 (6) kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 34–39 (in Russian).
9. Gapanyuk S. G., Koval'chuk D. V. (2014) Finding the Optimal Cut-Points of the Contours in Closed Networks of 6–10 kV with the Use of Computers. *Aktual'nye Problemy Energetiki: Materialy 69 Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov* [Topical Problems of Power Engineering: Proceedings of the 69th Scientific-and-Technical Conference of Bachelor and PhD Students]. Minsk, Belarusian National Technical University, 87–88 (in Russian).
10. *Shortest Paths from One Vertex*. Available at: <http://comp-science.narod.ru/KPG/Deikstr.htm>. (Accessed 15 June 2016) (in Russian).

Received: 18 January 2018

Accepted: 20 March 2018

Published online: 30 May 2018

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>

УДК 621.315.176

Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов

Ю. В. Бладыко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В механическом расчете гибких проводов распределительных устройств и воздушных линий определяются стрелы провеса и тяжения в различных режимах климатических воздействий. Сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, шлейфов, отпаяк к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету. На примере пролета с натяжными гирляндами изоляторов рассматривается действие на провод сосредоточенных нагрузок, определяется погрешность при замене сосредоточенных сил равномерно распределенной вдоль пролета нагрузкой. Показано, что сосредоточенные нагрузки нельзя заменять распределенными простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к совершенно неверным результатам. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса, коэффициентом сосредоточенных сил, коэффициентом, учитывающим наличие натяжных гирлянд изоляторов, и углом наклона пролета. При ветровой нагрузке и наличии отпаяк к электрическим аппаратам отклонения провода в двух плоскостях можно рассчитывать независимо друг от друга, если известны сосредоточенные силы в этих плоскостях. Показано уменьшение погрешности при увеличении числа малых сосредоточенных сил. Оценено влияние угла наклона пролета и наличия натяжных гирлянд изоляторов для расчета отклонений проводов распределительных устройств и воздушных линий. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где используется расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

Ключевые слова: стрела провеса, тяжение, гибкая нить, гирлянды изоляторов, уравнение состояния, пролет, эквивалентный провод, коэффициент нагрузки

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной нагрузкой с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234>

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

Address for correspondence

Bladyko Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-71-93
eie@bntu.by

Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements

Y. V. Bladyko¹⁾

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

Abstract. In the mechanical calculation of the flexible wires of substations and overhead lines, sags and tension are determined in various climatic conditions. Concentrated loads from spacers, barrier balls, stubs, taps to electrical apparatus and other elements are replaced with a load distributed over the span. On the example of a span with tension insulator springs, the action of concentrated loads on the wire is considered, the error is determined when the concentrated forces are replaced with a load one that is uniformly distributed along the span. It is shown that concentrated loads cannot be replaced with distributed ones by simple division of total loads by the span length, since this might result in completely incorrect findings. A relationship is established between the coefficient of the increase of the sag, the coefficient of concentrated forces, the coefficient that takes into account the presence of tension insulator springs, and the angle of inclination of the span. With wind load and the presence of taps to electrical apparatus, the deviations of the wire in two planes may be calculated independently of each other if the forces concentrated in these planes are known. A decrease in the error is shown with an increase in the number of small concentrated forces. The influence of the angle of inclination of the span and the presence of tension insulator springs on calculating the deviations of the wires of substations and overhead lines is assessed. A more accurate calculation of mechanical tensions and sags is possible with the use of a vector-parametric method for calculating the flexible bus of switchgears and wires of overhead lines, where the design model of wires in the form of a flexible elastic thread is used, taking into account the spatial disposition of all structural elements.

Keywords: sag, tension, flexible thread, insulator strings, equation of state, span, equivalent wire, load factor

For citation: Bladyko Y. V. Mechanical Calculation of Flexible Wires when a Concentrated Load is Being Replaced with a Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 220–234. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234> (in Russian)

В механическом расчете гибких проводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) сосредоточенные нагрузки от распорок, заградительных шаров, гирлянд изоляторов, шлейфов, отпаяк к электрическим аппаратам и других элементов заменяются распределенной по пролету нагрузкой [1]. Из сделанного в [1] заключения следует, что сосредоточенные нагрузки нельзя заменять распределенными простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к совершенно неверным результатам, однако может быть оправдано при большом числе относительно малых сосредоточенных сил, приложенных по всей длине пролета. Цель статьи – определение погрешности такой замены при наличии гирлянд изоляторов, ветровой нагрузки, а также в случае подвеса проводов на разных высотах.

В методике [1] уравнение состояния провода не отличается по структуре от обычного уравнения состояния [2], по которому рассчитываются провода ВЛ с равномерно распределенными нагрузками. Но для того чтобы уравнение было применимо для неоднородной нити, ее заменяют приведенной (эквивалентной) однородной нитью, что достигается путем вве-

дения приведенной (эквивалентной) равномерно распределенной по длине пролета нагрузки. Приведенная нагрузка определяется из условия равенства длины однородной нити с равномерно распределенной приведенной нагрузкой длине комбинированной нити с распределенными нагрузками разной интенсивности и в общем случае также длине нити с сосредоточенными нагрузками разной величины, приложенными в различных местах пролета.

Длину неоднородной (комбинированной) нити можно найти путем интегрирования дифференциального уравнения нити по участкам. Для перехода от неоднородной нити к эквивалентной однородной при любой схеме загрузки пролета определяется переходный коэффициент K , называемый коэффициентом нагрузки. Приведенная нагрузка вычисляется как произведение величины равномерно распределенной нагрузки для данного провода на коэффициент нагрузки.

При пролете до 500–700 м уравнение цепной линии заменяют параболой, при больших длинах рекомендуется использовать два слагаемых в формуле разложения для определения стрел провеса (рис. 1) и три – для определения длины провода [2].

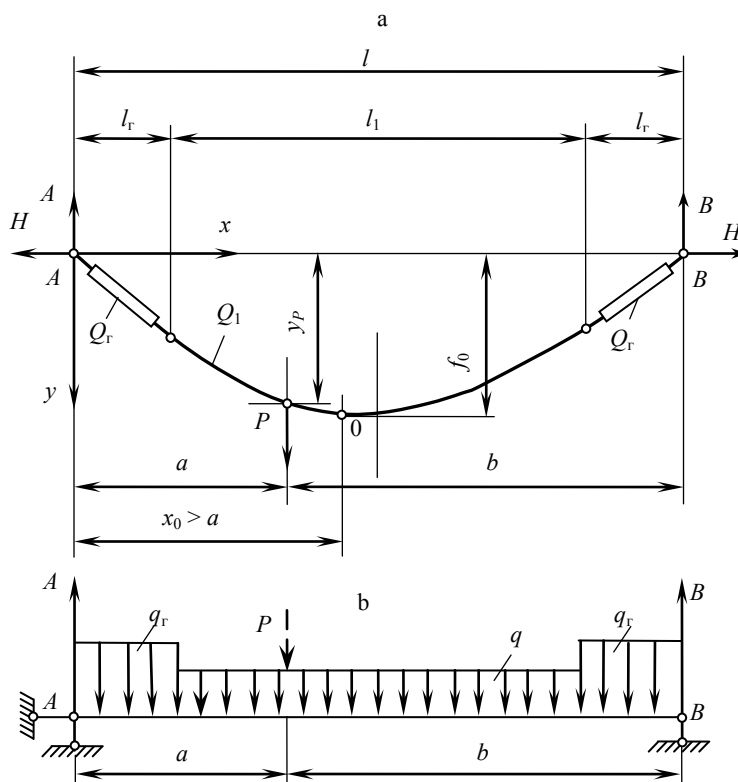


Рис. 1. Расчетная схема пролета: а – пролет с вертикальными нагрузками от провода q , гирлянд изоляторов q_r и сосредоточенной силой P ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

Fig. 1. Estimated span scheme: а – span with vertical loads from the wire q , insulator strings q_r and concentrated force P ; б – span in the form of a simple split beam with hinged pillars, loaded in the same way

Стрела провеса в любом месте пролета может быть определена по формуле

$$y = \frac{M(x)}{H}, \quad (1)$$

где $M(x)$ – балочный изгибающий момент в точке x ; H – тяжение в проводе (горизонтальная составляющая).

Ранее в [3] рассматривался пролет, состоящий из провода, нагруженного сосредоточенными нагрузками. В статье исследуем пролет с учетом конструктивных элементов.

Пролет с двумя натяжными гирляндами изоляторов

Стрелы провеса определяются на основании общей формулы (1). Опорные балочные реакции независимо от места расположения силы P вычисляются согласно рис. 1 по формулам:

$$A = \frac{1}{2}Q_1 + Q_{\Gamma} + P\frac{b}{l} = \frac{ql}{2}\left(1 + 2\frac{l}{l_{\Gamma}}\delta\right) + P\frac{b}{l};$$

$$B = \frac{1}{2}Q_1 + Q_{\Gamma} + P\frac{a}{l} = \frac{ql}{2}\left(1 + 2\frac{l}{l_{\Gamma}}\delta\right) + P\frac{a}{l},$$

где $\delta = \left(\frac{q_{\Gamma}}{q} - 1\right)\left(\frac{l_{\Gamma}}{l}\right)^2$ – коэффициент, учитывающий наличие натяжных

гирлянд изоляторов; l – длина пролета; l_{Γ} – длина натяжной гирлянды изоляторов; $Q_1 = ql_1$, $Q_{\Gamma} = q_{\Gamma}l_{\Gamma}$ – вес провода и гирлянды изоляторов; $l_1 = l - 2l_{\Gamma}$ – длина провода без учета провеса; q , q_{Γ} – погонный вес провода и гирлянды изоляторов; P – вес сосредоточенной нагрузки; a , b – расстояние до сосредоточенной силы P от опор A , B .

Рассмотрим случай приложения силы P в левой части пролета, как показано на рис. 1. На первом участке провода до точки приложения силы P имеем

$$M(x) = Ax - Q_{\Gamma}\left(x - \frac{1}{2}l_{\Gamma}\right) - \frac{1}{2}q(x - l_{\Gamma})^2$$

или

$$M(x) = \frac{qx}{2}(l - x) + \frac{ql^2}{2}\delta + P\frac{b}{l}x;$$

$$y = \frac{qx}{2H}(l - x) + \frac{ql^2}{2H}\delta + \frac{Pb}{Hl}x.$$

Ордината в точке приложения силы P (рис. 1а)

$$y_P = f_P = \frac{qa}{2H}(l-a) + \frac{ql^2}{2H}\delta + \frac{P}{H}\frac{ab}{l} = \frac{qab}{2H}\left(1 + \frac{l^2}{ab}\delta\right) + \frac{P}{H}\frac{ab}{l}.$$

При одной сосредоточенной силе, приложенной в середине пролета $a = b = 0,5l$, максимальная стрела провеса

$$f_0 = y_{P_{\max}} = \frac{ql^2}{8H}(1 + 4\delta) + \frac{Pl}{4H} = \frac{ql^2}{8H}(1 + 4\delta + 2K_P) = \frac{ql^2}{8H}K_f, \quad (2)$$

где K_f – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием сосредоточенных сил и гирлянд изоляторов,

$$K_f = 1 + 4\delta + 2K_P; \quad (3)$$

$K_P = P/Q$ – коэффициент сосредоточенных сил; $Q = ql$ – вес провода в пролете без натяжных гирлянд изоляторов и без учета провеса.

При n сосредоточенных силах суммарным весом P , равномерно распределенных вдоль пролета, максимальная стрела провеса

$$f_0(n) = \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}, \quad (4)$$

где

$$K_f(n) = 1 + 4\delta + K_P\left(1 + \frac{1}{n}\right). \quad (5)$$

Относительная погрешность от замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета

$$\delta_f = \frac{f_0(\infty) - f_0(n)}{f_0(n)} = \frac{\frac{ql^2(1 + 4\delta + K_P)}{8H} - \frac{ql^2 K_f(n)}{8H}}{\frac{ql^2 K_f(n)}{8H}} = -\frac{1}{1 + n\left(1 + \frac{1 + 4\delta}{K_P}\right)}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет оценить погрешность при любом числе сосредоточенных сил n и коэффициентах δ и K_P .

Расчеты выполнялись для следующих исходных данных: длина пролета ВЛ $l = 400$ м, провод 264/34 АCSR с погонным весом $q = 0,98$ даН/м и площадью поперечного сечения $F = 297,8$ мм², модулем упругости $E = 7400$ даН/мм², тяжение $H = 1490$ даН, погонный вес гирлянд изоляторов $q_i = 25$ даН/м, длина натяжной гирлянды изоляторов $l_i = 4$ м, суммарный вес сосредоточенных нагрузок в пролете $P = 35$ даН. Рассматривался пролет с двумя натяжными гирляндами изоляторов, с одинаковыми высотами подве-

са, без ветра и гололеда, с неизменными тяжением и температурой. Для РУ длина пролета $l = 40$ м при одинаковых остальных исходных данных. Зависимость модуля погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета ВЛ из-за замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой от числа сосредоточенных сил приведена на рис. 2, то же для пролета РУ – на рис. 3.

Как видно из рис. 2, погрешность по модулю от замены $n = 1$ сосредоточенной силы равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета ВЛ составляет 7,5 %, при $n = 3$ – до 2,7 %, при $n = 5$ – до 1,6 %, при $n = 7$ – до 1,2 % (при этом $\delta = 0,0025$; $K_p = 0,089$). При увеличении веса сосредоточенной нагрузки погрешность возрастает по модулю. Наличие гирлянд изоляторов в пролете ВЛ практически не влияет на погрешность замены сосредоточенных сил равномерной нагрузкой: она остается на том же уровне, что и без гирлянд.

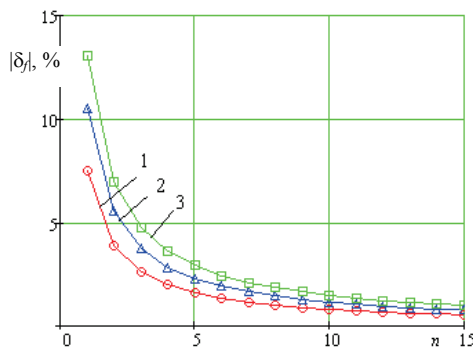


Рис. 2. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета воздушных линий с двумя натяжными гирляндами изоляторов из-за замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой от числа сосредоточенных сил: 1 – расчет по формуле (6) для $K_p = 0,089$; 2 – 0,13; 3 – 0,18

Fig. 2. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of the overhead line with two tension insulator strings due to the replacement of concentrated forces with a distributed load on the number of concentrated forces: 1 – calculation by the formula (6) for $K_p = 0,089$; 2 – 0,13; 3 – 0,18

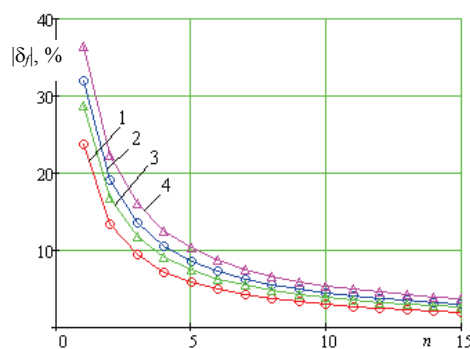


Рис. 3. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы провеса пролета распределительных устройств с двумя натяжными гирляндами изоляторов из-за замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой от числа сосредоточенных сил: 1, 3 – $\delta = 0,25$; 2, 4 – 0 (без гирлянд); 1, 2 – $K_p = 0,89$; 3, 4 – 1,3

Fig. 3. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears with two tension insulator strings due to the replacement of concentrated forces with a distributed load on the number of concentrated forces: 1, 3 – $\delta = 0,25$; 2, 4 – 0 (without insulator strings); 1, 2 – $K_p = 0,89$; 3, 4 – 1,3

Для пролета РУ (рис. 3) при $n = 1$ погрешность по модулю составляет до 23,7 %, при $n = 3$ – до 9,4 %, при $n = 5$ – до 5,9 %, при $n = 7$ – до 4,3 % (при этом $\delta = 0,25$; $K_p = 0,89$). Наличие натяжных гирлянд изоляторов снижает погрешность. При отсутствии гирлянд изоляторов и $n = 1$ погрешность по модулю возрастает до 32 %. При увеличении веса сосредоточенной нагрузки погрешность также возрастает по модулю. Таким образом, самые большие погрешности замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой будут при их малом числе.

Длина эквивалентного провода определяется при этом как

$$L = l + \frac{q^2 l^2 l_1 K^2}{24 H^2},$$

где K – коэффициент нагрузки.

После определения для всех режимов эквивалентных погонных и удельных нагрузок составляется уравнение состояния, позволяющее найти напряжение в проводе в любом режиме нагрузок, в том числе климатических. При этом следует учитывать упругое и температурное удлинения провода на длине l_1 . Тогда получим разность длин провода в двух режимах, из которых один исходный (с индексом 0):

$$\Delta L = \frac{\hat{\gamma}^2 l^2 l_1}{24 \sigma^2} - \frac{\hat{\gamma}_0^2 l^2 l_1}{24 \sigma_0^2} = \frac{l_1}{E} (\sigma - \sigma_0) + \alpha l_1 (t - t_0),$$

откуда

$$\sigma - \frac{\hat{\gamma}^2 E l^2}{24 \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\hat{\gamma}_0^2 E l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0), \quad (7)$$

где $\hat{\gamma} = \gamma K$, $\hat{\gamma}_0 = \gamma_0 K_0$ – удельные эквивалентные погонные нагрузки; $\gamma = q/F$ – удельная погонная нагрузка; $\sigma = H/F$ – напряжение в проводе; F – площадь сечения провода; E – модуль упругости провода; α – коэффициент температурного удлинения провода; t – температура провода.

Коэффициент нагрузки при одной сосредоточенной силе в любом месте пролета [1]:

$$K^2 = \frac{l_1(l + 4l_r)}{l^2} + 12 \left[\frac{Q_r l_r}{Q^2 l_1} \left(Q_1 + \frac{2}{3} Q_r + P \right) + \frac{P}{Q} \frac{ab - l_r^2}{l_1} + \left(\frac{P}{Q} \right)^2 \frac{ab}{l_1} \right]$$

или

$$K^2 = \frac{l_1(l + 4l_r)}{l^2} + 12 \left[\frac{Q_r l_r}{Q l_1} \left(\frac{l_1}{l} + \frac{2}{3} \frac{Q_r}{Q} + K_p \right) + K_p \frac{ab - l_r^2}{l_1} + K_p^2 \frac{ab}{l_1} \right]. \quad (8)$$

То же при любом числе n сосредоточенных сил

$$\begin{aligned} K^2 = \frac{l_1(l + 4l_r)}{l^2} + 12 \left\{ \frac{Q_r l_r}{Q^2 l_1} \left[Q_1 + \frac{2}{3} Q_r + P \right] + \frac{1}{Q l_1} \sum_1^n \left[P_i (a_i b_i - l_r^2) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{Q^2 l_1} \left[\sum_1^n P_i^2 a_i b_i + 2 \left(P_1 a_1 \sum_2^n P_i b_i + P_2 a_2 \sum_3^n P_i b_i + \dots + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + P_{n-2} a_{n-2} \sum_{n-1}^n P_i b_i + P_{n-1} a_{n-1} P_n b_n \right) \right] \right\}, \quad (9) \end{aligned}$$

где $a_i = li/(n + 1)$ – расстояние до опоры A i -х сосредоточенных сил при их равномерной расстановке вдоль пролета; $b_i = l - a_i = l(n + 1 - i)/(n + 1)$ –

то же до опоры B i -й сосредоточенной силы; $P_i = P/n$ – вес i -й сосредоточенной нагрузки; $P = \sum_1^n P_i$ – суммарный вес всех сосредоточенных нагрузок.

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок

Горизонтальные нагрузки на провод появляются при наличии ветра, они определяются скоростным напором и диаметром провода, при наличии гололеда – толщиной его стенки. Горизонтальные нагрузки на гирлянду изоляторов также зависят от ее размеров и скоростного напора ветра, должны зависеть от гололеда, покрывающего гирлянду [4]. Горизонтальные нагрузки от сосредоточенных сил (шлейфов, заградительных шаров, распорок, отпаяк к электрическим аппаратам) возникают при ветре, а у отпаяк при их некилевом расположении в РУ – даже при отсутствии ветра, возрастают при гололеде. Таким образом, на токопровод действуют распределенные и сосредоточенные нагрузки в двух плоскостях: по оси y – весовые, по оси z – от действия ветра и отпаяк.

Результирующая приведенная нагрузка на провод, средняя плоскость которого отклонена на угол φ от вертикальной оси y :

$$\hat{q}_\varphi = \sqrt{\hat{q}_y^2 + \hat{q}_z^2} = \sqrt{(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2},$$

где $\hat{q}_y = q_y K_y$, $\hat{q}_z = q_z K_z$ – эквивалентная погонная нагрузка на пролет от веса и ветра; q_y , q_z – погонная нагрузка на провод по осям y , z ; K_y , K_z – коэффициент нагрузки в двух плоскостях.

Длина комбинированной кривой провисания провода определяется из общей формулы. При двух гирляндах изоляторов

$$L = l + \frac{\hat{q}_\varphi^2 l^2 l_1}{24H^2}.$$

Для определения результирующей нагрузки для уравнения состояния необходимо предварительно найти ее составляющие, действующие во взаимно перпендикулярных плоскостях – вертикальной и горизонтальной. Так как вертикальные силы создают моменты только относительно оси z , а горизонтальные – относительно оси y , то составляющие балочных реакций и, следовательно, составляющие отклонений можно определить независимо друг от друга, как это делается при нахождении нагрузок на опоры.

В уравнение состояния (7) вместо γ подставляем удельные погонные нагрузки в отклоненной средней плоскости $\gamma_\varphi = q_\varphi/F$.

Отклонения провода в любом месте пролета могут быть определены по формулам, аналогичным (1):

$$y = \frac{M_z(x)}{H}; \quad z = \frac{M_y(x)}{H}, \quad (10)$$

где $M_z(x)$, $M_y(x)$ – балочный изгибающий момент в точке x относительно других координатных осей.

Стрела провеса в любой точке пролета

$$f_\phi = \sqrt{y^2 + z^2}.$$

При n сосредоточенных силах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения в двух плоскостях находятся аналогично (4) и (5):

$$y_0(n) = \frac{q_y l^2 K_{fy}(n)}{8H}; \quad z_0(n) = \frac{q_z l^2 K_{fz}(n)}{8H}, \quad (11)$$

где $K_{fy}(n)$, $K_{fz}(n)$ – коэффициент увеличения отклонений по осям y , z , обусловленный наличием сосредоточенных сил и гирлянд изоляторов:

$$K_{fy}(n) = 1 + 4\delta_y + K_{Py} \left(1 + \frac{1}{n}\right); \quad K_{fz}(n) = 1 + 4\delta_z + K_{Pz} \left(1 + \frac{1}{n}\right); \quad (12)$$

$$\delta_y = \left(\frac{q_{\Gamma y}}{q_y} - 1\right) \left(\frac{l_\Gamma}{l}\right)^2, \quad \delta_z = \left(\frac{q_{\Gamma z}}{q_z} - 1\right) \left(\frac{l_\Gamma}{l}\right)^2 - \text{коэффициенты, учитывающие на-}$$

личие натяжных гирлянд изоляторов; $K_{Py} = P_y/(q_y l)$, $K_{Pz} = P_z/(q_z l)$ – то же сосредоточенных сил; $q_{\Gamma y}$, $q_{\Gamma z}$ – погонная нагрузка на натяжную гирлянду изоляторов от веса и ветра; P_y , P_z – суммарная сосредоточенная сила по осям y , z .

Таким образом, отклонения и погрешности их расчета при замене сосредоточенных сил распределенными различны для двух плоскостей. Зависимости погрешностей замены получаются подобными рис. 2, 3.

При симметричном расположении сосредоточенных сил по длине пролета максимальные отклонения в двух плоскостях и результирующая стрела провеса будут находиться в центре пролета.

Погрешность расчета при совместном действии вертикальных и горизонтальных нагрузок связана с допущением, что гирлянды изоляторов и провод лежат в одной плоскости, что в большинстве случаев не соответствует действительности [5].

Погрешность возрастает из-за неправильного определения горизонтальных и вертикальных составляющих сосредоточенных сил от отпаек к электрическим аппаратам, которые зависят от реального их расположения в РУ [6, 7]. Точное определение возможно при применении векторно-параметрического метода расчета статики [7, 8], который реализован в компьютерных программах механического расчета [9–12].

Расположение точек подвеса провода на разных высотах

При выводе формул для пролета с разными высотами подвеса проводов (рис. 4) в [1] допускается, что левая и правая гирлянды изоляторов имеют одинаковые проекции $l_0 = l_r \cos \theta$, где θ – угол наклона пролета ($\tan \theta = h/l$); h – разность высот подвеса проводов.

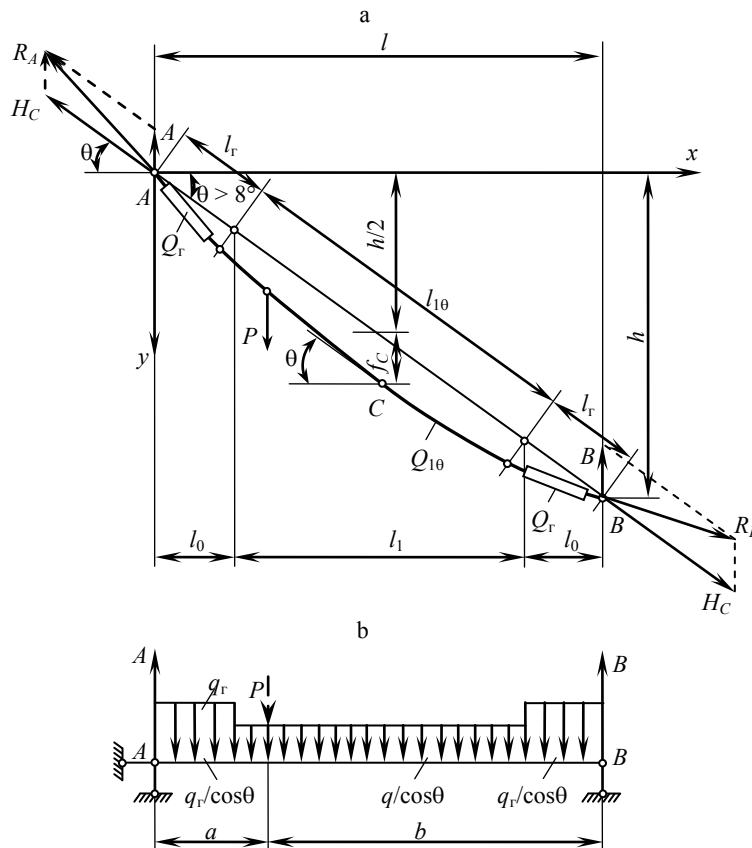


Рис. 4. Расчетная схема пролета с разными высотами подвеса проводов: а – пролет с вертикальными нагрузками от провода q , гирлянд изоляторов q_r и сосредоточенной силой P ; б – пролет в виде простой разрезной балки с шарнирными опорами, загруженной так же

Fig. 4. Estimated scheme of the span with different heights of wire suspension: а – span with vertical loads from the wire q , insulator strings q_r and with concentrated force P ; б – span in the form of a simple split beam with hinged pillars, loaded in the same way

Коэффициент нагрузки при одной сосредоточенной силе в любом месте пролета [1]

$$K^2 = \frac{l_1(l + 4l_0)}{l^2} + 12 \left\{ \frac{Q_r l_0 \cos \theta}{Q^2 l_1} \left[Q_l + \left(\frac{2}{3} Q_r + P \right) \cos \theta \right] + \right. \\ \left. + \frac{P}{Q} \frac{ab - l_0^2}{l l_1} \cos \theta + \left(\frac{P}{Q} \right)^2 \frac{ab}{l l_1} \cos^2 \theta \right\}.$$

То же при любом числе сосредоточенных сил

$$K^2 = \frac{l_1(l+4l_0)}{l^2} + 12 \left\{ \frac{Q_r l_0 \cos \theta}{Q^2 l_1} \left[Q_1 + \left(\frac{2}{3} Q_r + \sum_1^n P_i \right) \cos \theta \right] + \right. \\ \left. + \frac{\cos \theta}{Q l l_1} \sum_1^n \left[P_i (a_i b_i - l_0^2) \right] + \frac{\cos^2 \theta}{Q^2 l l_1} \left[\sum_1^n P_i^2 a_i b_i + \right. \right. \\ \left. \left. + 2 \left(P_1 a_1 \sum_2^n P_i b_i + P_2 a_2 \sum_3^n P_i b_i + \dots + P_{n-2} a_{n-2} \sum_{n-1}^n P_i b_i + P_{n-1} a_{n-1} P_n b_n \right) \right] \right\}.$$

При углах $\theta \leq 8^\circ$ можно для вычисления коэффициентов нагрузки пользоваться формулами (8), (9). При таких углах погрешность от неучета наклона не превышает 1 % ($\cos 8^\circ = 0,99$).

Уравнение состояния при $\theta > 8^\circ$

$$\frac{\sigma}{\cos \theta} - \frac{\hat{\gamma}^2 E l^2}{24 \sigma^2} \cos^2 \theta = \frac{\sigma_0}{\cos \theta} - \frac{\hat{\gamma}_0^2 E l^2}{24 \sigma_0^2} \cos^2 \theta - \alpha E (t - t_0)$$

или

$$\sigma_C - \frac{\hat{\gamma}^2 E l^2}{24 \sigma_C^2} = \sigma_{0C} - \frac{\hat{\gamma}_0^2 E l^2}{24 \sigma_{0C}^2} - \alpha E (t - t_0),$$

где $\sigma_C = H_C/F$; H_C – тяжение провода в наклонном пролете (совпадает с касательной в точке C на рис. 4); $\hat{\gamma} = \gamma K / \cos \theta$; $\hat{\gamma}_0 = \gamma_0 K_0 / \cos \theta$.

При n сосредоточенных силах суммарным весом P , равномерно распределенных вдоль пролета, максимальная стрела провеса после замены в (4) q на $q/\cos \theta$ и q_r на $q_r/\cos \theta$ определяется по формуле

$$f_0(n) = \frac{q l^2 K_f(n)}{8H}, \quad (13)$$

где

$$K_f(n) = \frac{1}{\cos \theta} + 4\delta \cos \theta + K_P \left(1 + \frac{1}{n} \right). \quad (14)$$

Относительная погрешность расчета стрел провеса от замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета

$$\delta_f = \frac{f_0(\infty) - f_0(n)}{f_0(n)} = - \frac{1}{1 + n \left(1 + \frac{1 + 4\delta \cos^2 \theta}{K_P \cos \theta} \right)}. \quad (15)$$

При увеличении угла наклона пролета ВЛ (рис. 5) погрешность снижается. Для пролета РУ (рис. 6) влияние наклона несущественно. При повы-

шении веса сосредоточенной нагрузки погрешность возрастает по модулю. Как и в других случаях, самые большие погрешности замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой будут при их малом числе.

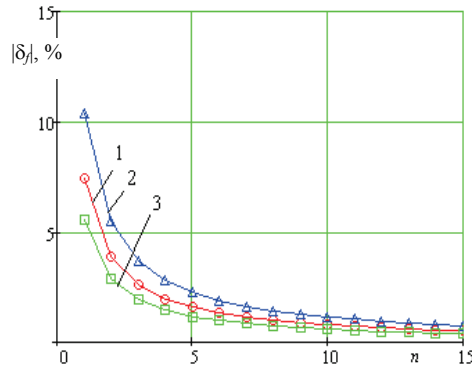


Рис. 5. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы пролета воздушных линий с разными высотами подвеса из-за замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой от числа сосредоточенных сил: 1 – $K_p = 0,089$, $\theta = 10^\circ$; 2 – $0,13$, 10° ; 3 – $0,089$, 45°

Fig. 5. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of the overhead transmission line with different suspension heights due to the replacement of concentrated forces with a distributed load on the number of concentrated forces: 1 – $K_p = 0.089$, $\theta = 10^\circ$; 2 – 0.13 , 10° ; 3 – 0.089 , 45°

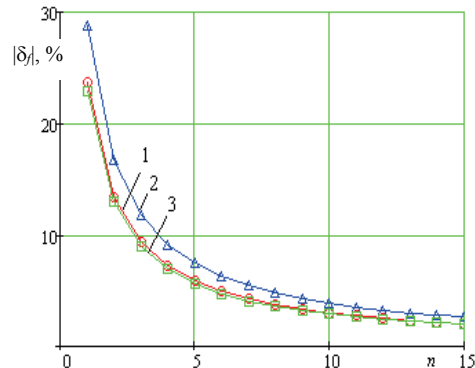


Рис. 6. Зависимость погрешности расчета максимальной стрелы пролета распределительных устройств с разными высотами подвеса из-за замены сосредоточенных сил распределенной нагрузкой от числа сосредоточенных сил: 1 – $K_p = 0,89$, $\theta = 10^\circ$; 2 – $1,3$, 10° ; 3 – $0,89$, 45°

Fig. 6. Dependence of the error in calculating the maximum sag of the span of switchgears with different suspension heights due to the replacement of concentrated forces with a distributed load on the number of concentrated forces: 1 – $K_p = 0.89$, $\theta = 10^\circ$; 2 – 1.3 , 10° ; 3 – 0.89 , 45°

Совместное действие вертикальных и горизонтальных нагрузок в наклонном пролете

В этом случае рассматривается положение провода, так же как и при одинаковых уровнях точек подвеса, в некоторой средней отклоненной плоскости, которая составляет с вертикалью угол $\hat{\phi}$, определяемый из отношения приведенных нагрузок $\text{tg} \hat{\phi} = \hat{q}_z / \hat{q}_y$. В общем случае, когда отношения нагрузок, действующих в горизонтальной и вертикальной плоскостях, неодинаковы, коэффициенты вертикальных и горизонтальных нагрузок K_y и K_z нужно определять отдельно.

После нахождения эквивалентных нагрузок во взаимно перпендикулярных плоскостях $\hat{q}_y = q_y K_y / \cos \theta$ и $\hat{q}_z = q_z K_z / \cos \theta$ определяется приведенная нагрузка

$$\hat{q}_\phi = \sqrt{\hat{q}_y^2 + \hat{q}_z^2} = \frac{1}{\cos \theta} \sqrt{(q_y K_y)^2 + (q_z K_z)^2}.$$

Тогда получается уравнение состояния следующего вида:

$$\sigma_C - \frac{\hat{\gamma}_\varphi^2 E l^2 \hat{k}_\varphi^2}{24\sigma_C^2} = \sigma_{0C} - \frac{\hat{\gamma}_{0\varphi}^2 E l^2 \hat{k}_{0\varphi}^2}{24\sigma_{0C}^2} - \alpha E (t - t_0),$$

где $\hat{\gamma}_\varphi = \hat{q}_\varphi / F$, $\hat{\gamma}_{0\varphi} = \hat{q}_{0\varphi} / F$ – приведенная нагрузка; $\hat{k}_\varphi = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi}$.

При n сосредоточенных силах, равномерно расположенных вдоль пролета, максимальные отклонения находятся аналогично формуле (11), в которой коэффициенты увеличения отклонений рассчитываются по зависимостям:

$$K_{fy}(n) = \frac{1}{\cos \theta} + 4\delta_y \cos \theta + K_{Py} \left(1 + \frac{1}{n} \right);$$

$$K_{fz}(n) = \frac{1}{\cos \theta} + 4\delta_z \cos \theta + K_{Pz} \left(1 + \frac{1}{n} \right).$$

Относительная погрешность от замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета определяется по (15).

ВЫВОДЫ

1. Сосредоточенные нагрузки нельзя заменять распределенными нагрузками простым делением суммарных нагрузок на длину пролета, так как это может привести к совершенно неверным результатам.

2. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса K_f , обусловленным наличием сосредоточенных нагрузок, коэффициентом сосредоточенных сил K_P , коэффициентом δ , учитывающим наличие натяжных гирлянд изоляторов, и углом наклона пролета θ . При ветровой нагрузке и наличии отпаяк к электрическим аппаратам отклонения провода в двух плоскостях можно рассчитывать независимо друг от друга, если известны сосредоточенные силы в этих плоскостях.

3. Получены формулы для определения погрешности расчета максимальной стрелы провеса в результате замены сосредоточенных сил равномерно распределенной нагрузкой по длине пролета как функции от числа сосредоточенных сил n и коэффициента сосредоточенных сил K_P . Показано уменьшение погрешности при увеличении числа сосредоточенных сил n и уменьшении K_P . При увеличении угла наклона пролета воздушной линии погрешность снижается. Для пролета распределительных устройств влияние наклона несущественно. Наличие натяжных гирлянд изоляторов снижает погрешность только для пролета распределительных устройств, гирлянды изоляторов незначительно влияют на погрешность расчета отклонений для пролета воздушной линии.

4. Более точный расчет механических напряжений и стрел провеса возможен при применении векторно-параметрического метода расчета гибкой ошиновки распределительных устройств и проводов воздушных линий, где применяется расчетная модель проводов в виде гибкой упругой нити с учетом пространственного расположения всех конструктивных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
2. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
4. Бладыко, Ю. В. Автоматизация расчета климатических нагрузок на провода ОРУ и ЛЭП / Ю. В. Бладыко, Юсеф Юсеф // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1985. 10 с. Деп. № 2197-эн.
5. Расчет отклонений гибкой ошиновки открытых распределительных устройств сверхвысокого напряжения / М. И. Стрелюк [и др.] // Научные и прикладные проблемы энергетики: межвед. сб. Вып. 13. Минск: Вышэйш. шк., 1986. Вып. 13. С. 86–90.
6. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
7. Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпоз. / Польская академия наук. Закопане, 1988. № 3–19. С. 173–181.
8. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
9. Стрелюк, М. И. Расчет на ЭВМ статики гибкой ошиновки РУ / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Научные и прикладные проблемы энергетики: межвед. сб. Минск: Вышэйш. шк., 1985. Вып. 12. С. 75–79.
10. Стрелюк, М. И. Программа механического расчета гибкой ошиновки РУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко. Минск, 1984. 12 с. Инв. № ГосФАП – П007594, инв. № РФАП БССР – 00143.
11. Streluk, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streluk, I. I. Sergey, Y. V. Bladyko // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf, Lublin (Poland), 7–8 Sept. Lublin: Lublin Technical University, 1995. P. 15–19.
12. Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1995. № 3–4. С. 21–29.

Поступила 03.01.2018 Подписана в печать 14.03.2018 Опубликована онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Boshnyakovich A. D. (1975) *Calculation of the Wires of Substations and of Large Transitions of Transmission Lines*. Leningrad, Energiya Publ. 248 (in Russian).

2. Idel'chik V. I. (1989) *Electrical Systems and Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 592 (in Russian).
3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-97-107>.
4. Bladyko Y. V., Yusef Yusef (1985) Automation of Calculation of Climatic Loads on the Wires of Outdoor Substations and Power Lines. Dep. No 2197-en (in Russian).
5. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. [et al.] (1986) Calculation of the Deviations of the Flexible Busbar of Switchgears of Ultrahigh Voltage. *Nauchnye i Prikladnye Problemy Energetiki: Mezhd. Sb.* [Scientific and Applied Problems of Energy. Interdepartmental Collection]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., (13), 86–90 (in Russian).
6. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions*, (8), 8–14 (in Russian).
7. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Zakopane, 10–12 Nov. 1988*. Zakopane, (3–19), 173–181 (in Russian).
8. Sergei I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Action Analysis for Ice, Wind and Electro Dynamic Loads in Spans with Arbitrary Wire Layout. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 38–44 (in Russian).
9. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Yu. V. (1985) Calculation on the Computer of Statics of a Flexible Busbars of the Switchgear. *Nauchnye i Prikladnye Problemy Energetiki: Mezhd. Sb.* [Scientific and Applied Problems of Energy. Interdepartmental Collection]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., (12), 75–79 (in Russian).
10. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Yu. V. (1984) *Program of Mechanical Calculation of the Flexible Busbars of the Switchgear in Various Types of Climatic Influences*. Accession Number GosFAP – P007594, Accession Number of RFAP of the BSSR – 00143. Minsk. 12 (in Russian).
11. Streliuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin (Poland), 7–8 Sept.* Lublin: Lublin Technical University, 15–19.
12. Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Units of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions*, (3–4), 21–29 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245>

УДК 629.7

Учет инструментальных погрешностей при контроле обмоток электрических машин с использованием квазипериодических тестовых сигналов

А. А. Шейников¹⁾, Ю. В. Суходолов²⁾, В. В. Зеленко²⁾

¹⁾Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Решение задач диагностирования обмоток электрических машин связано с необходимостью селекции квазипериодических тестовых сигналов на фоне шумов. Для выделения полезных сигналов, как правило, используют различия спектральных составов сигналов и шумов. В идеальном случае форма частотной характеристики оптимального фильтра должна совпадать с формой спектра полезного сигнала, что определяет сложность выполнения такого фильтра. Цель исследований – увеличение точности измерений и упрощение алгоритмического обеспечения измерительных систем за счет разработки математического аппарата, позволяющего однозначно определять и учитывать при обработке погрешности, обусловленные конечностью интервалов измерений. В условиях постоянного роста вычислительных возможностей средств измерений резервом повышения чувствительности методов обработки квазипериодических сигналов представляется установление однозначной зависимости между локальными вариациями временных параметров сигнала и изменениями параметров его спектра. Вариации значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения гармонических составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшему. Точность измерений предлагается увеличить за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Разработан соответствующий практике математический аппарат, позволяющий однозначно определять погрешности, обусловленные конечностью интервалов измерений квазипериодических сигналов. Автоматический учет этих погрешностей позволяет обойтись без сложной корреляционной обработки квазипериодических сигналов, требующей больших вычислительных ресурсов (время и скорость обработки данных, объем оперативной памяти), и обеспечить точность измерений.

Ключевые слова: диагностика обмоток, электрические машины, квазипериодический измерительный сигнал, гармонические составляющие спектра, спектральная плотность, базис разложения

Для цитирования: Шейников, А. А. Учет инструментальных погрешностей при контроле обмоток электрических машин с использованием квазипериодических тестовых сигналов / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, В. В. Зеленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 235–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245>

Адрес для переписки

Суходолов Юрий Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
suhodolov@bntu.by

Address for correspondence

Suchodolov Yurii V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-93
suhodolov@bntu.by

Accounting of Instrumental Errors in the Control of Windings of Electrical Machines with the Use of Quasi-Periodic Test Signals

A. A. Sheinikov¹⁾, Yu. V. Suchodolov²⁾, V. V. Zelenko²⁾

¹⁾Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The solution of problems of diagnostics of windings of electric machines is associated with the necessity of selection of quasi-periodic test signals against the background noise. In order to highlight useful signals, as a rule, the differences in spectral compositions of signals and noises are used. Ideally, the shape of the optimal filter frequency response should coincide with the shape of the spectrum of the useful signal, which determines the complexity of such a filter. The aim of the research is to increase the accuracy of measurements and simplify the algorithmic support of measuring systems by developing a mathematical tool that makes it possible to uniquely identify and take into account errors caused by the finiteness of the measurement intervals in the processing. Determining a one-to-one relationship between local variations of signal time parameters and alterations in its spectrum parameters is believed to be the reserve of increase of sensitivity of methods of processing of quasi-periodic signals in the conditions of constant growth of computing capabilities of measuring instruments. Variations in the values of the parameters of the signals lead to a violation of the original distribution of the harmonic components, some of the latter being subjected to the greatest alterations changes, and the some other – to the smallest ones. It is proposed to increase the accuracy of measurements due to the replacement the low-sensitivity registration of alterations in the time parameters of signals with the registration of alterations in the parameters of the characteristic harmonic components of the spectrum, which have a maximum sensitivity to deviations of the controlled parameter and a minimum sensitivity to deviations caused by the instability of the measuring equipment. The mathematical tool corresponding to the practice has been developed, that makes it possible to determine unambiguously the errors caused by finiteness of measurement intervals of quasi-periodic signals. Automatic accounting of these errors makes it possible to do without complex correlation processing of quasi-periodic signals that require large computing resources (time and speed of data processing, the amount of RAM) and to ensure the accuracy of measurements.

Keywords: diagnostics of windings, electrical machines, quasi-periodic measuring signal, harmonic components of the spectrum, spectral density, decomposition basis

For citation: Sheinikov A. A., Suchodolov Yu. V., Zelenko V. V. (2018) Accounting of Instrumental Errors in the Control of Windings of Electrical Machines with the Use of Quasi-Periodic Test Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3), 235–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-235-245> (in Russian)

Введение

Носителями информации о значениях физических величин в рамках измерительной системы являются измерительные сигналы. Эта информация может заключаться в совокупности отдельных мгновенных значений основного параметра сигнала, в статистических параметрах, если сигнал случаен и т. д. В импульсных измерительных системах, таких как системы тестового диагностирования обмоток электрических машин, наиболее часто используются частотные параметры сигнала. При этом для анализа и синтеза измерительных сигналов применяется спектральный метод.

Из теории преобразования Фурье следует, что отображение сигнала в частотной области справедливо для стационарного сигнала, т. е. для сигнала, который полностью определен на интервале ортогональности, и не зависит от выбранного номера этого интервала на временной оси. Считается, что спектральная характеристика такого сигнала не является функцией времени и спектр – это множество фиксированных значений амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний, составляющих временную функцию. На практике спектральный анализ применяется, во-первых, на конечном интервале времени [1] и, во вторых, связан с квазистационарными измерительными сигналами или сигналами с динамическими параметрами [2].

Математическим инструментом, имеющим преимущество перед преобразованием Фурье (в том числе и перед оконным преобразованием Фурье) при анализе реальных (конечных и нестационарных) сигналов, является вейвлет-преобразование [3], однако теория этого преобразования также содержит некоторые упрощения, обуславливающие неполное соответствие практике. Так, при вейвлет-преобразовании, равно как и при оконном преобразовании Фурье, для разложения квазипериодических сигналов используются ортогональные базисные системы, являющиеся математическими абстракциями. Динамика параметров тестовых сигналов в системах диагностики обмоток электрических машин обусловлена, прежде всего, нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров [4]. Она проявляется в нарушении периодичности и локальных вариациях одного или нескольких участков измерительного сигнала с течением времени. При разработке алгоритмов автоматического подавления «шумов», обусловленных динамикой параметров сигналов, необходимое условие – установление однозначной зависимости между локальными вариациями сигнала и изменениями значений компонентов его спектра.

Анализ путей решения задачи

В процессе исследований было установлено, что вариации значений параметров сигналов приводят к нарушению исходного распределения гармонических спектральных составляющих, при котором одни из них подвергаются наибольшему изменению, а другие – наименьшему [5]. При этом увеличение точности измерений предлагается обеспечить за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрацией изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям измеряемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров. Целесообразным при этом является применение математического аппарата, обеспечивающего работу с дискретным спектром сигнала. Так, регулируя амплитуду, период следования, длительность импульсов и время задержки, можно математически обоснованно управлять параметрами спектра (перемещать положение нулей амплитудного спектра, изменять амплитуду и чувствительность характерных

спектральных составляющих) [6]. Знание номеров характерных гармонических составляющих позволит «отстроиться» от помех, обусловленных нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров. Определение номеров гармонических составляющих, обладающих минимальной чувствительностью к нестабильности параметров измерительного сигнала, предусматривает исследование динамических особенностей его спектра путем анализа частных производных выражений для расчета амплитуд характерных гармоник [5].

Учитывая, что спектральный анализ в реальности может применяться только на конечных интервалах времени, требуется разработка математического аппарата, обеспечивающего единый подход к описанию спектров периодических и непериодических сигналов (спектров квазипериодических сигналов). Таким образом, целью исследований являются увеличение точности и обеспечение автоматизации измерений за счет замены малочувствительной регистрации изменений временных параметров сигналов, регистрации изменений параметров характерных гармонических составляющих спектра, обладающих максимальной чувствительностью к отклонениям контролируемого параметра и минимальной чувствительностью к отклонениям, обусловленным нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Кроме того, точность измерений планировалось увеличить за счет разработки математического аппарата, учитывающего погрешности, обусловленные конечностью интервалов времени измерений.

Квазипериодические сигналы – самый распространенный вид сигналов, использующихся в практике измерений, в том числе в системах тестовой диагностики обмоток электрических машин. Они занимают промежуточное положение между непериодическими и периодическими сигналами и отражают процесс преобразования спектральной плотности в дискретный спектр. Отличительной особенностью квазипериодических сигналов является их ограниченность во времени. Разный подход к описанию спектров периодического и непериодического сигналов создает определенные трудности при рассмотрении квазипериодических сигналов. Моделирование процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности предусматривает общее описание обоих типов спектров. Один из путей достижения поставленной цели – рассмотрение процесса формирования дискретного спектра из спектральной плотности при периодизации сигнала. При этом существует несколько подходов к представлению этого процесса. Так, из теоремы Котельникова [7] известно, что спектр непериодического сигнала можно получить, умножая спектр периодического сигнала на прямоугольную функцию в частотной области. Однако практически реализовать точное преобразование спектральной плотности в дискретный спектр с помощью ряда Котельникова невозможно. Дело в том, что сигнал с ограниченным спектром – это сигнал, длящийся бесконечно долго. При дискретизации такого сигнала будет получено бесконечное число отсчетов. Для восстановления исходного непрерывного сигнала, а значит, и для получения дискретного спектра этого сигнала необходимо учесть все отсчеты сигнала, что невозможно ввиду неограниченной его длительности.

Второй подход к решению поставленной задачи заключается в получении периодической последовательности импульсов, представляющей собой сумму одиночных сигналов, одинаково задержанных во времени относительно друг друга [8]. Однако рассмотрение реального сигнала как периодического приведет к ненормируемой погрешности из-за конечности длительности измерительных процессов. Соответственно необходимым является определение влияния погрешности формирования дискретного спектра в зависимости от числа повторений N при периодизации. При периодизации с увеличением числа импульсов в спектральной плотности сигнала образуется все больше нулей [8]. Поскольку каждый ноль спектральной плотности находится на строго определенной частоте, он является спектральной составляющей дискретного спектра, а сам спектр квазипериодического сигнала можно считать комбинированным, т. е. состоящим из участков спектральной плотности, разделенных спектральными составляющими с нулевой амплитудой. При увеличении числа нулей уменьшается расстояние между ними и повышается спектральная плотность в области частот, кратных частоте периодизации, т. е. формируются составляющие будущего дискретного спектра. Таким образом, при периодизации происходит процесс перерождения спектральной плотности в дискретный спектр.

Представим анализируемый сложный сигнал в виде линейной комбинации заданных функций, ограниченных по времени длительностью рассматриваемого сигнала. Известно, что наиболее удобное и имеющее физический смысл – это разложение сигнала в ряд Фурье [9] по гармоническим составляющим бесконечной длительности. Однако следует учесть, что бесконечный гармонический сигнал является математической абстракцией и не может отражать реальный процесс. В частности, такой сигнал нельзя использовать для разложения ограниченного во времени квазипериодического сигнала. При выборе базиса разложения целесообразным представляется максимальное использование преимуществ гармонического сигнала (простое математическое описание; инвариантность к линейным преобразованиям; отработанная техника генерирования гармонических функций [9]) с учетом ограничений, накладываемых практикой. Решение, одновременно удовлетворяющее обоим требованиям, – применение в качестве базиса гармонических сигналов, ограниченных во времени, часто встречающихся в реальных процессах, например, радиоимпульсов. При этом придется отказаться от спектрального метода анализа сигналов в его обычном представлении. Разложение сигнала будет производиться на радиоимпульсы с различной несущей частотой. Причем несущая частота отдельного радиоимпульса будет соответствовать частоте отдельной гармоники спектра периодического (бесконечного во времени) сигнала, разложенного в ряд Фурье. Такое разложение для удобства предлагается назвать квастром (рис. 1).

Следует заметить, что отдельная составляющая квастра имеет физический смысл, так как является радиоимпульсом, параметры которого можно измерить. Сам же квастр при этом отражает реальный процесс и соответствует практике. В связи с тем, что составляющие квастра (радиоимпульсы) не являются периодическими функциями, в частотной области они описываются спектральной плотностью. Причем спектральная плотность

каждой составляющей квастра, так же как и спектральная плотность остальных составляющих, распределена по всему диапазону частот. Кроме того, значение спектральной плотности сигнала суммы всех радиоимпульсов на определенной частоте можно рассчитать, поскольку параметры каждого радиоимпульса известны.

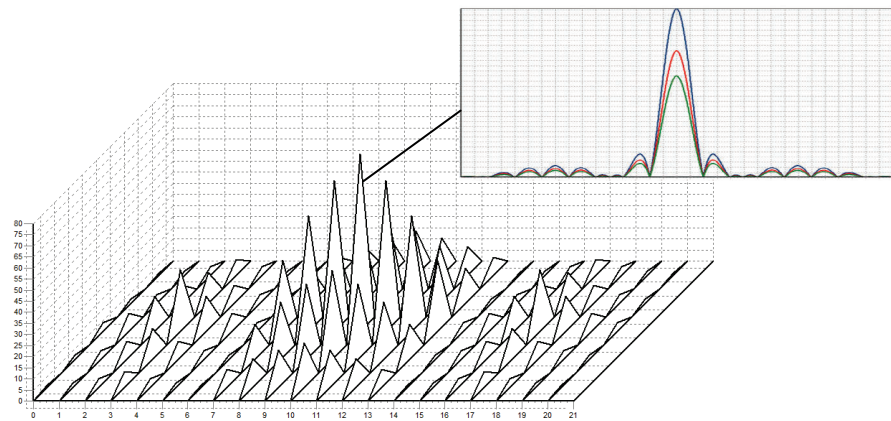


Рис. 1. Квастр измерительного сигнала

Fig. 1. Measuring signal kvastr

Таким образом, выигрыш при переходе от спектра к квастру связан с появляющейся возможностью расчета, а значит, и возможностью локализации погрешностей, обусловленных особенностями функционирования отдельных элементов измерительных контуров. Например, в практике измерений достаточно широкий класс представляют квазипериодические сигналы с нарушениями периодичности, обусловленными локальными вариациями одного или нескольких участков с течением времени. Появившаяся возможность установления однозначной зависимости между локальными вариациями сигнала и изменениями компонентов спектра позволит разработать алгоритмы автоматического подавления «шумов», обусловленных нестабильностью работы элементов измерительного контура.

Разработка математического аппарата анализа

квазипериодических измерительных сигналов в частотной области

Рассмотрим процесс разложения сигнала в квастр более подробно. Ограниченный во времени (существующий во временном интервале $[t_1, t_2]$) квазипериодический сигнал $S(t_1, t_2)$ можно записать как сумму составляющих квастра, ограниченных во времени $\varphi_k(t_1, t_2)$, которые представляют собой непериодические сигналы – радиоимпульсы, описываемые в частотной области спектральной плотностью:

$$S(t_1, t_2) = \sum_{k=0}^K C_k \varphi_k(t_1, t_2), \quad (1)$$

где C_k – коэффициент разложения, определяющий спектр квазипериодического сигнала.

Разложение единичного разнополярного прямоугольного импульса на ограниченные во времени составляющие спектра – радиоимпульсы показано, например, на рис. 2.

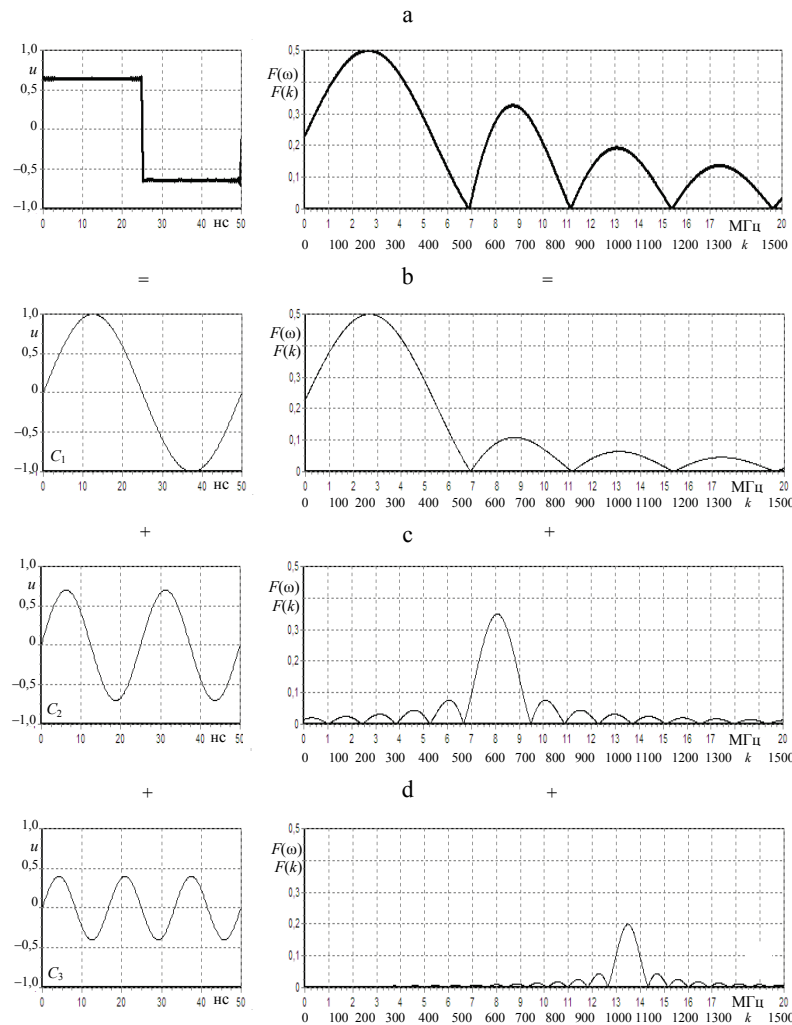


Рис. 2. Представление спектральной плотности ограниченного неперiodического сигнала суммой спектральных плотностей одиночных радиоимпульсов той же длительности с изменяющейся несущей частотой: а – разнополярный прямоугольный импульс и его спектральная плотность; б, с, d – радиоимпульсы с различной несущей частотой и их спектральные плотности

Fig. 2. Representation of the spectral density of a bounded non-periodic signal by the sum of the spectral densities of single radio pulses of the same duration with varying carrier frequency: а – a multi-polar rectangular pulse and its spectral density; б, с, d – radio pulses with different carrier frequency and their spectral densities

Для аналитического описания спектральной плотности квазипериодического сигнала через сумму спектральных плотностей одиночных радиоимпульсов рассмотрим последние более подробно.

Спектральная плотность одиночного радиоимпульса (отрезка синусоиды) рассчитывается по формуле

$$S_1(\omega) = \frac{2E\omega}{|\omega^2 - \omega_0^2|} \left| \sin\left(\frac{n\pi\omega}{\omega_0}\right) \right|, \quad (2)$$

где E – амплитуда радиоимпульса; ω , ω_0 – текущая и несущая частота; n – количество периодов гармонического колебания (определяет длительность радиоимпульса).

При периодизации сигналов, а вместе с ними и составляющих их радиоимпульсов следует учитывать, что их последовательность является частным случаем амплитудно-модулированных сигналов. Соответственно последовательность из нескольких радиоимпульсов можно рассматривать как один амплитудно-модулированный сигнал, удлиняющийся с прибавлением очередного радиоимпульса на его длительность.

Амплитудно-частотный спектр сигнала из двух радиоимпульсов, задержанных по времени на t_3 [8], представлен на рис. 3.

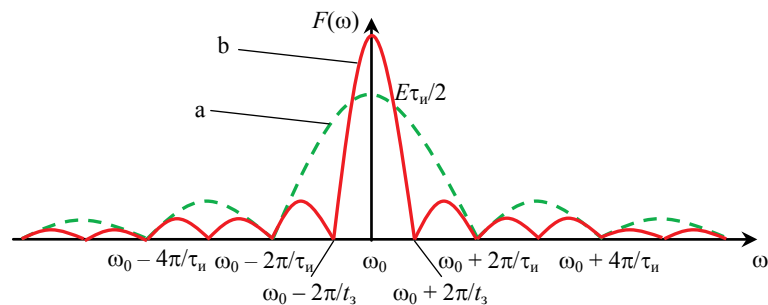


Рис. 3. Спектральные плотности: а – одиночного радиоимпульса; б – сигнала из двух радиоимпульсов

Fig. 3. Spectral densities: a – of a single radio pulse; b – of a signal of two radio pulses

Из рис. 3 видно, что при периодизации сигнала кроме нулей, определяемых длительностью импульсов τ_n , появляются нули, определяемые временем задержки между импульсами t_3 . Очевидно, что при дальнейшей периодизации количество нулей второго типа будет расти. Соответственно спектральная плотность будет все больше расщепляться на отдельные лепестки. Причем в случае постоянства периода следования импульсов T изменение длительности импульса τ_n приводит к изменению ширины спектра, а также к изменению амплитуд гармоник, но не влияет на их местоположение. Другими словами, при периодизации сигнала образуются места формирования будущих спектральных составляющих, жестко привязанные к определенным частотам спектра.

В соответствии с теоремой о смещении, спектральную плотность сигнала суммы из двух радиоимпульсов $S_2(j\omega)$, задержанных относительно

друг друга на время t_3 , можно представить как произведение спектральной плотности исходного одиночного радиоимпульса $S_1(j\omega)$ и коэффициента, учитывающего задержку между импульсами $[1 + e^{j\omega t_3}]$. Соответственно для спектральной плотности сигнала суммы из трех радиоимпульсов имеем $S_3(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + e^{j\omega 2t_3}]$ (рис. 4), а для спектральной плотности сигнала суммы из m радиоимпульсов $S_m(j\omega) = S_1(j\omega)[1 + e^{j\omega t_3} + e^{j\omega 2t_3} + \dots + e^{j\omega(K-1)t_3}]$.

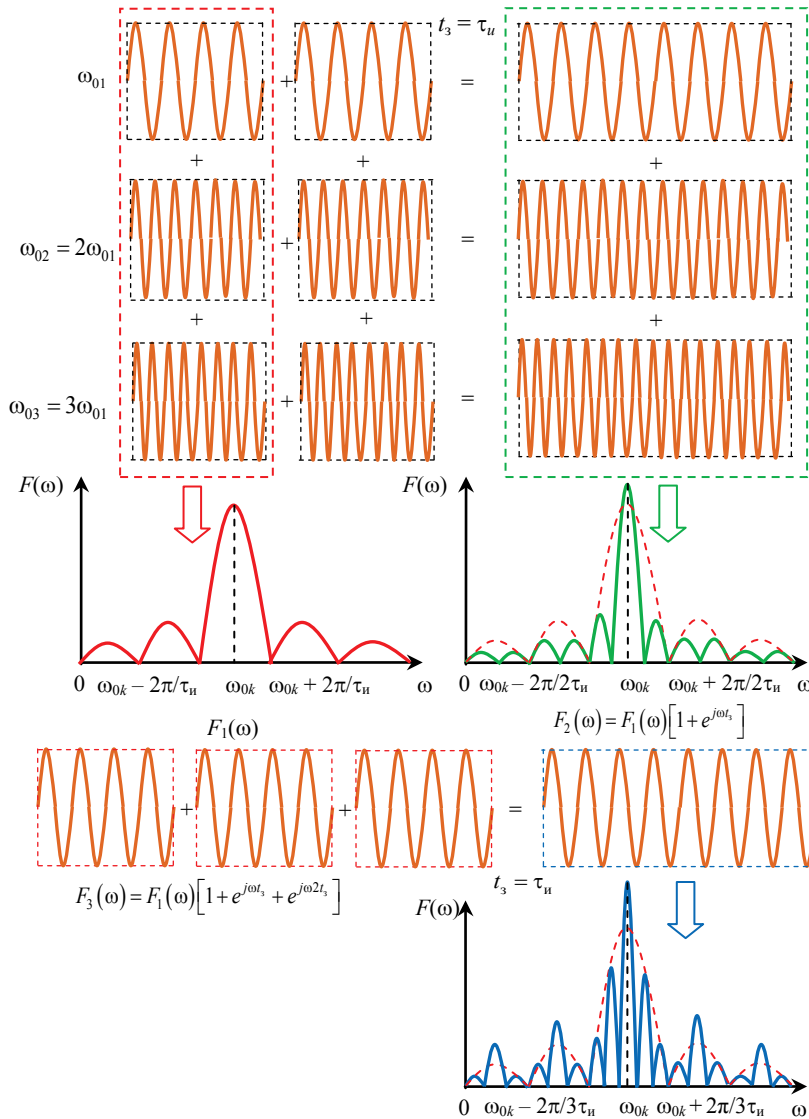


Рис. 4. Изменение формы спектральной плотности сигнала суммы задержанных по времени радиоимпульсов при увеличении их количества

Fig. 4. Alteration of the shape of the spectral density of the signal of the sum of radio pulses delayed in time with an increase in their number

Определим, воспользовавшись принципом наложения, спектральный состав последовательности радиоимпульсов, представив их в виде суммы из m радиоимпульсов, задержанных по времени на t_3 относительно друг друга:

$$S_m(\omega) = \frac{E\tau_n}{2} \left[\left| \frac{\sin\left((\omega - \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)}{(\omega - \omega_0)\frac{\tau_n}{2}} \right| \left| \frac{\sin\left(m(\omega - \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)}{\sin\left((\omega - \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)} \right| + \right. \\ \left. + \left| \frac{\sin\left(m(\omega + \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)}{\sin\left((\omega + \omega_0)\frac{\tau_n}{2}\right)} \right| \left| \frac{\sin\left(m(\omega + \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)}{\sin\left((\omega + \omega_0)\frac{t_3}{2}\right)} \right| \right]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что изменение параметров последовательности радиоимпульсов влияет на скорость формирования дискретного спектра. Путем установки параметров последовательности радиоимпульсов (подбора значений τ_n и t_3) можно максимально сократить количество периодов m при периодизации сигнала, требуемое для достижения заданной точности преобразования спектральной плотности в дискретный спектр. Кроме того, увеличение отношения сигнал/шум предлагается получить за счет обоснованного выбора характерных частотных составляющих сигнала, обладающих одновременно максимальной чувствительностью к изменению информативного параметра измерительного сигнала и минимальной чувствительностью к случайным отклонениям параметров сигнала, обусловленным нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров.

Определение номера характерной частотной составляющей сигнала предусматривает исследование динамических особенностей его спектра путем анализа частных производных выражения для расчета амплитуд его частотных составляющих [10]

$$\Delta U_{nE\omega\tau} = \frac{d|U_n|}{dE} \Delta E + \frac{d|U_n|}{d\omega} \Delta\omega + \frac{d|U_n|}{d\tau} \Delta\tau + \frac{d|U_n|}{dt_3} \Delta t_3, \quad (4)$$

где ΔE , $\Delta\omega$, $\Delta\tau$, Δt_3 – изменение параметров E , ω , τ , t_3 .

Первые три члена выражения (4) являются абсолютной погрешностью при изменении информативного параметра сигнала Δt_3 . Другими словами, несовпадения областей минимальной чувствительности к изменениям E , ω , τ и t_3 определяют возможность подавления влияния шумов, обусловленных нестабильностью функционирования элементов измерительных контуров.

ВЫВОДЫ

1. Разработан соответствующий практике математический аппарат анализа квазипериодических измерительных сигналов в частотной области, позволяющий перейти от малочувствительной регистрации изменений временных параметров измерительных сигналов к регистрации изменений параметров отдельных составляющих спектра, для которых отношение сигнал/шум имеет максимальное значение.

2. Применение математического аппарата позволит значительно упростить алгоритмическое обеспечение систем тестовой диагностики обмоток электрических машин за счет отказа от сложной корреляционной обработки сигнала, требующей больших вычислительных ресурсов (время и скорость обработки данных, объем оперативной памяти). Кроме того, практическая реализация предложенной методики позволит сократить время измерений, уменьшить мощность, вес и габариты генераторов импульсов, входивших в состав измерительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глинченко, А. С. Цифровая обработка сигналов: в 2 ч. / А. С. Глинченко. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. Ч. 1. 199 с.
2. Клаассен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Клаассен. М.: Постмаркет, 2000. 352 с.
3. Грибунин, В. Г. Введение в вейвлет-преобразование / В. Г. Грибунин. СПб.: АВТЭКС, 2009. 70 с.
4. Панфилов, В. А. Электрические измерения / В. А. Панфилов. М.: Академия, 2008. 288 с.
5. Суходолов, Ю. В. Повышение помехоустойчивости контроля межвитковой изоляции коллекторных электрических машин постоянного тока с помощью волновых затухающих колебаний / Ю. В. Суходолов, А. А. Шейников, А. Н. Малашин // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2010. № 19. С. 67–72.
6. Шейников, А. А. Измерение малых изменений параметров импульсных последовательностей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов, А. Е. Каледя // Вестник Воен. акад. Респ. Беларусь. 2016. № 1. С. 153–158.
7. Гутников, В. С. Фильтрация измерительных сигналов / В. С. Гутников. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 192 с.
8. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. М.: Дрофа, 2006. 719 с.
9. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. М.: Высш. шк., 2000. 462 с.
10. Шейников, А. А. Совершенствование метода импульсного контроля обмоток авиационных коллекторных генераторов постоянного тока / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 1. С. 24–32.

Поступила 10.10.2017 Подписана в печать 12.12.2017 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Glinchenko A. S. (2001) *Digital Signal Processing. Part 1*. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Technical University. 199 (in Russian).
2. Klaassen K. B. (2000) *Fundamentals of Measurement. Electronic Methods and Devices in Measuring Techniques*. Moscow, Postmarket Publ. 352 (in Russian).
3. Gribunin V. G. (2009) *Introduction to Wavelet-Transformation*. St.-Petersburg, AVTEKS. 70 (in Russian).
4. Panfilov V. A. (2008) *Electrical Measurement*. Moscow, Akademiya Publ. 288 (in Russian).
5. Sukhodolov Yu. V., Sheinikov A. A., Malashin A. N. (2010) Increase of Noise Immunity of Control of Inter-Turn Insulation of DC Collector Electric Machines by Means of Wave Damping Vibrations. *Sbornik Nauchnykh Statei Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Collected Papers of the Military Academy of the Republic of Belarus], (19), 67–72 (in Russian).
6. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V., Kaleda A. E. (2016) Measurement of Small Changes in Pulse Sequence Parameters, *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Herald of the Military Academy of the Republic of Belarus], (1), 153–158 (in Russian).
7. Gutnikov V. S. (1990) *Filtering of Measuring Signals*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 192 (in Russian).
8. Gonorovskii I. S. (2006) *Electronic Circuits and Signals*. Moscow, Drofa Publ. 719 (in Russian).
9. Baskakov S. I. (2000) *Radiotechnical Circuits and Signals*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 462 (in Russian).
10. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V. (2013) Improvement of a Method of the Pulse Windings Control of Aviation Direct Current Collector Generators. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 24–32 (in Russian).

Received: 10 October 2017

Accepted: 12 December 2017

Published online: 30 May 2018

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257>

УДК 621.311.6

Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов

Ю. Г. Алексеев¹⁾, А. Ю. Королёв¹⁾, В. С. Нисс¹⁾, А. Э. Паршутто¹⁾,
Е. В. Сорока¹⁾, А. С. Будницкий¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В последнее время в промышленности появилась тенденция использования методов электрохимической обработки, основанных на применении милли- и микросекундных импульсов различной полярности и амплитуды вместо постоянного тока. Применение импульсного тока позволяет во многих случаях получить необходимый эффект более дешевыми средствами и обеспечить дополнительную управляемость электрохимическим процессом за счет регулировки временных параметров импульсов тока, снизить энергетические затраты на процесс полирования и очистки поверхностей по сравнению с обработкой при постоянном токе, повысить эффективность обработки, при которой скорость сглаживания микронеровностей обрабатываемой поверхности, отнесенная к общему съему металла, значительно возрастает. Например, применение биполярных импульсов при полировании многих металлических материалов позволяет отказаться от использования дорогостоящих и вредных хромсодержащих электролитов. Применение импульсного режима при электролитно-плазменном полировании помогает добиться снижения энергопотребления и повышения эффективности процесса при сохранении высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности. Для исследования влияния временных параметров импульсов тока, а также длительности пауз между ними на характеристики поверхности деталей из различных металлических материалов в процессе электрохимической обработки и при переходе процессов в область электролитно-плазменной обработки при повышении напряжения смоделирован, разработан и изготовлен специальный источник питания, обеспечивающий возможность регулирования частоты, длительности положительного и отрицательного импульсов, а также пауз между ними в широком диапазоне. Разработанный источник питания позволяет формировать импульсы тока до 50 А при напряжении от 0 до 400 В положительной и отрицательной полярностей и способен регулировать их длительность в диапазоне от 10,0 мкс до 8,1 с при возможности изменения соотношения длительности импульсов и пауз от 1:1 до 1:9.

Ключевые слова: источник питания, биполярное импульсное электрохимическое полирование, электролитно-плазменное полирование, частота, амплитуда

Для цитирования: Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257>

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. E. Parshuto¹⁾,
E. V. Soroka¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

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

Abstract. Recently, there has been a tendency in the industry to use electrochemical processing methods based on the use of milli- and microsecond pulses of different polarity and amplitude instead of a direct current. The use of a pulsed current in many cases makes it possible to obtain the desired effect by cheaper means and to provide additional controllability of the electrochemical process by adjusting the time parameters of the current pulses. This also ensures reduction of the energy costs of the polishing and cleaning process of surfaces as compared to direct current processing and increasing the efficiency of processing when the rate of smoothing the surface microroughness referred to the total removal of the metal rises significantly. For example, the application of bipolar pulses in polishing of many metallic materials eliminates the use of expensive and hazardous chromium electrolytes. The use of pulse mode during electrolyte-plasma polishing makes it possible to achieve the reduction of energy consumption and to increase of process efficiency while maintaining high intensity, processing quality and environmental safety. In order to study the effect of pulses parameters and the duration of a pause between them on the characteristics of the surface of parts made of various metallic materials in electrochemical and electrolyte-plasma processing modes the special power supply was modeled, designed and manufactured. The power supply provides the possibility of regulation frequency, the duration of the positive and negative pulses and the duration of the pauses between them a wide range. It makes it possible to generate current pulses up to 50 A at a voltage of 0 to 400 V of positive and negative polarities and is able to regulate their duration in the range from 10.0 μ s to 8.1 s with the possibility of changing the ratio of the pulse duration and pauses from 1:1 to 1:9.

Keywords: power supply, bipolar pulse electrochemical polishing, electrolyte-plasma treatment, frequency, amplitude

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S. (2018) Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3), 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257> (in Russian)

Введение

Исследования показали, что электрохимические процессы, связанные с анодным растворением и пассивацией, развиваются не сразу, а с различной динамикой в микро- и миллисекундном диапазоне времени [1, 2]. Поэтому, варьируя амплитудой, полярностью и длительностью импульсов тока в этом временном диапазоне, можно сформировать анодный потенциал, обеспечивающий оптимальное соотношение скоростей растворения и пассивационных процессов. Длительности пауз между импульсами также оказывают влияние на протекающие процессы, при этом в паузах происходят химические процессы, а во время протекания тока – электрохимические. Для каждой пары «анодный материал – электролит определенно-го состава» скорости развития процессов разные [3]. Также отличаются

и оптимальные величины потенциалов для электрохимической обработки. Соответственно различны и амплитудно-временные параметры импульсов тока (амплитудная плотность тока, длительности импульса и паузы между импульсами), обеспечивающие, например, наивысшую скорость растворения материала или качество сглаживания микрорельефа поверхности при электрохимической полировке [4].

При сравнительно низких напряжениях (до 40–50 В) в электролите происходят обычные электрохимические процессы. Но при напряжении более 200 В вокруг анода образуется устойчивая парогозовая оболочка, характеризующаяся высокочастотными колебаниями тока при постоянном рабочем напряжении. В этой области напряжений (200–350 В) происходит процесс электролитно-плазменной обработки [5–8]. Совместное воздействие на поверхность детали химически активной среды и электрических разрядов создает эффект полирования изделий. Плотность тока уменьшается до 0,1–1,0 А/см². Сплошная парогозовая оболочка вокруг анода имеет толщину порядка 50 мкм и постоянно изменяет свою форму. При этом возникает многофазная система «металл – плазма – газ – электролит», а явления, происходящие в приэлектродной области, не описываются в рамках классической электрохимии. Импульсный режим, в том числе с применением биполярных импульсов, может применяться и для нанесения покрытий на металлы [9].

Большинство выпускаемых в настоящее время мощных источников питания, формирующих импульсы тока требуемых параметров, не позволяют получать импульсы в нужном диапазоне напряжений в биполярном режиме с возможностью раздельного управления длительностью импульсов и пауз между ними. Поэтому для исследования влияния временных параметров импульсов тока, а также длительности пауз между ними на характеристики поверхности изделий из различных металлических материалов в процессе электрохимической обработки и при переходе процессов в область электролитно-плазменной обработки при повышении напряжения смоделирован, разработан и изготовлен специальный источник питания, позволяющий регулировать частоту, длительность положительного и отрицательного импульсов, а также длительность пауз между ними в широком диапазоне.

Результаты исследований и обсуждение

Блок-схема разработанного источника питания приведена на рис. 1. Для обеспечения формирования импульсов противоположной полярности с возможностью независимой регулировки их амплитуды в схеме установлены два источника постоянного напряжения и блок управления. Блок управления источником питания отвечает за формирование импульсов положительной и отрицательной полярностей прямоугольной формы (рис. 2).

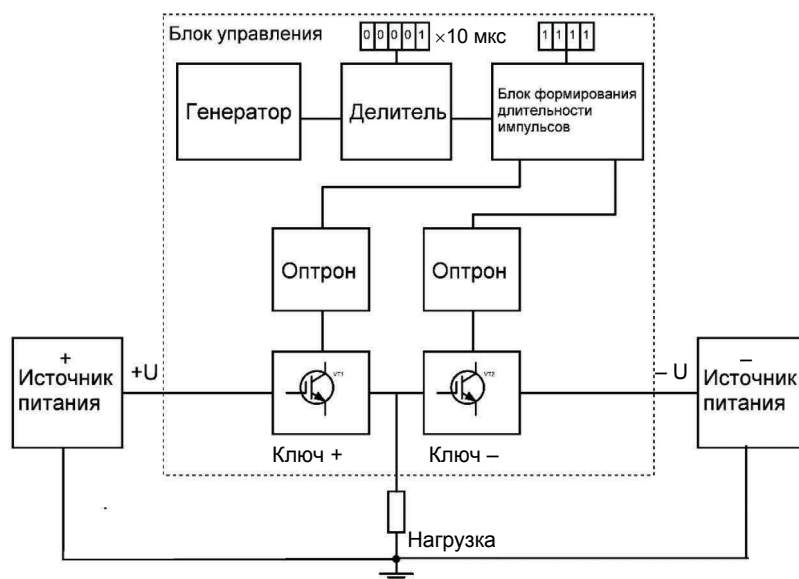


Рис. 1. Блок-схема биполярного импульсного источника питания

Fig. 1. Block diagram of a bipolar pulse power supply

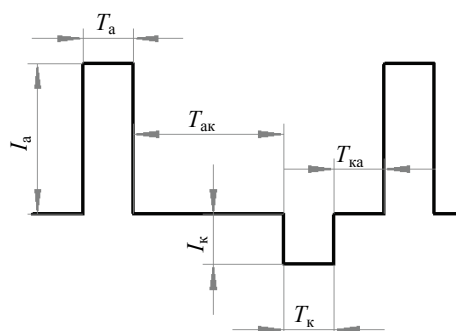


Рис. 2. Форма импульсов тока, формируемых блоком управления источником питания

Fig. 2. The shape of the current pulses generated by the power supply control unit

Функционально блок управления источником питания состоит из следующих модулей (рис. 1):

1) генератор – имеет два независимых переключаемых модуля: первый – кварцевый, стабилизированный на 2 МГц, второй – RC-генератор с возможностью плавной настройки частоты генерации;

2) цифровой делитель частоты – позволяет переключать длительность базового импульса выходного сигнала $t_{\text{вых}}$ от 10,0 мкс до 0,9 с при помощи пятиразрядного цифрового переключателя, расположенного на передней панели;

3) блок формирования длительности импульсов – позволяет с помощью четырехразрядного цифрового переключателя отдельно устанавливать множитель длительности в пределах от «1» до «9» (где «1» соответствует

периоду сигнала $t_{\text{вых}}$) следующим четырем значениям времени сигнала (рис. 2):

- длительность положительного импульса T_a ;
- длительность паузы между положительным и отрицательным импульсами T_{ak} ;
- длительность отрицательного импульса T_k ;
- длительность паузы между отрицательным и положительным импульсами T_{ka} ;

4) оптрон – необходим для гальванической развязки схемы от питания ключей и защиты управляющих блоков прибора от пробоя при неисправности ключей;

5) блок электронных ключей – позволяет включать нагрузку на заданное время (положительное или отрицательное напряжение) с амплитудным значением тока до 50 А.

Источник питания подключается к трехфазной сети 380 В/50 Гц переменного тока. Регулировка выходного положительного и отрицательного напряжения осуществляется с помощью трехфазного автотрансформатора, подключенного к первичным обмоткам трехфазного трансформатора. Получение выпрямленного напряжения большой амплитуды (до 400 В) при токе до 50 А с малыми пульсациями выходного напряжения представляет собой определенную сложность, так как для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямительного моста традиционной схемы требуются конденсаторы большой емкости (20000–50000 мкФ) при рабочем напряжении более 400 В.

Поскольку требуется обеспечить качественное выпрямленное напряжение при большой выходной мощности, использована схема трехфазного выпрямителя «шесть мостов (24 диода)». Она состоит из двух трехфазных трансформаторов. Первичные обмотки одного из них включаются «звездой», другого – «треугольником», что создает сдвиг фаз в 30°. Шесть вторичных обмоток подключаются к шести мостам (24 диода). Мосты включаются параллельно (рис. 3). Такая схема выпрямителя позволяет получить выпрямленное напряжение с наименьшими пульсациями даже без применения сглаживающих конденсаторов. При этом требуются диоды со средним током, почти вчетверо меньшим, чем в схеме Ларионова, и вдвое меньшим, чем в схеме «три параллельных полных моста». Эта схема позволяет построить выпрямитель большой мощности на элементах малой мощности [10]. Для дополнительного сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используются электролитические конденсаторы емкостью 5000 мкФ. Для ограничения импульсного тока, который возникает при зарядке конденсатора при включении источника питания, в электрическую цепь последовательно до конденсатора подключено мощное сопротивление $R1 = 0,13$ Ом. Ограничивать ток источника питания с помощью дополнительного сопротивления необходимо из-за возникающего при заряде конденсатора мощного импульса тока, который может повредить выпрямительные диоды. Для защиты источника питания от перегрузки на выходе используются защитные автоматические выключатели.

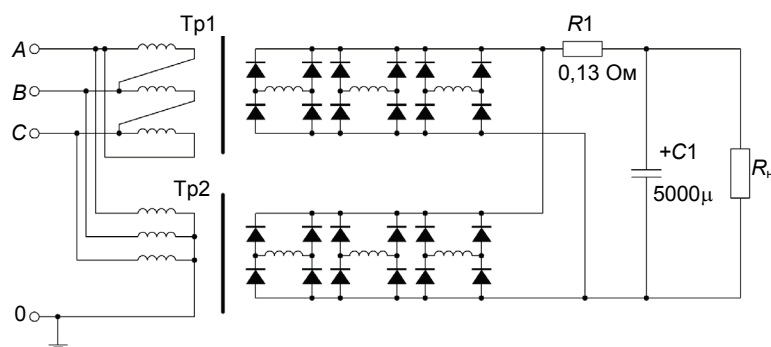


Рис. 3. Схема трехфазного выпрямителя «шесть мостов (24 диода)»

Fig. 3. Three-phase “six bridges (24 diodes)” rectifier circuit

Логика работы цифровой части электрической схемы была смоделирована на компьютерной виртуальной модели [11] в программе Multisim и собрана на быстродействующих CMOS микросхемах серии 74AC, обеспечивающих формирование требуемой длительности импульсов не менее 1 мкс. Применение моделирования с использованием упрощенных моделей компонентов цифровых микросхем и дискретных компонентов, содержащихся в базе данных, позволило исключить стадии разработки, связанные с созданием подробных виртуальных моделей элементов и их макетированием с целью проверки правильности работы цифровых логических схем.

Блок генератора частоты построен на быстродействующих цифровых CMOS микросхемах [12]. Модуль генератора состоит из двух независимых генераторов, один из которых имеет кварцевую стабилизацию частоты и построен на инверторах 74AC04, а второй имеет возможность плавной подстройки частоты и собран на триггерах Шмидта 74AC132 [13, 14]. Оба генератора могут подключаться к модулю делителя с помощью переключателя.

Делитель частоты собран на пяти двоично-десятичных реверсивных счетчиках MC74AC190 с предварительной записью информации в регистр счета и одним Д-триггером MC74AC74, обеспечивающем деление частоты на два и формирование импульсов с коэффициентом заполнения 50 %. Счетчик имеет пять разрядов и обеспечивает переключаемый коэффициент деления от 1 до 99999. Коэффициент деления устанавливается с помощью пяти цифровых кодовых переключателей, расположенных на передней панели прибора. Они формируют четырехразрядный двоичный цифровой код, который подается на информационные входы счетчиков, подключенных в режиме обратного счета. Частота и коэффициент деления подобраны так, что число, показанное на кодовых переключателях, соответствует периоду колебаний на выходе делителя в десятках микросекунд.

Схема блока формирования длительности импульсов [15] собрана с применением пяти счетчиков 74AC192, дешифратора-демультиплексора 74AC139, четырех Д-триггеров на двух микросхемах MC74AC74 и нескольких вспомогательных логических микросхем (рис. 4). Рабочий цикл

схемы состоит из четырех временных отрезков, длительность каждого из них регулируется цифровым кодовым переключателем, расположенным на передней панели прибора. Каждый из четырех кодовых переключателей задает коэффициент счета одному из четырех счетчиков, работающих в реверсивном режиме. Поскольку использованы десятичные счетчики, то схема обеспечивает формирование соотношений длительностей четырех стадий импульсов от 1:1 до 1:9. Однако схема блока дает принципиальную возможность увеличивать соотношение длительностей импульсов и пауз, наращивая разрядность счетчиков. Цифровые кодовые переключатели, задающие коэффициент счета, расположены на лицевой панели в ряд и образуют четырехразрядное число, обозначающее соотношение длительностей импульсов и пауз по порядку:

- первое число D1 – длительность положительного импульса;
- второе число D2 – длительность первой паузы (между положительным и отрицательным импульсами);
- третье число D3 – длительность отрицательного импульса;
- четвертое число D4 – длительность второй паузы (между отрицательным и положительным импульсами).

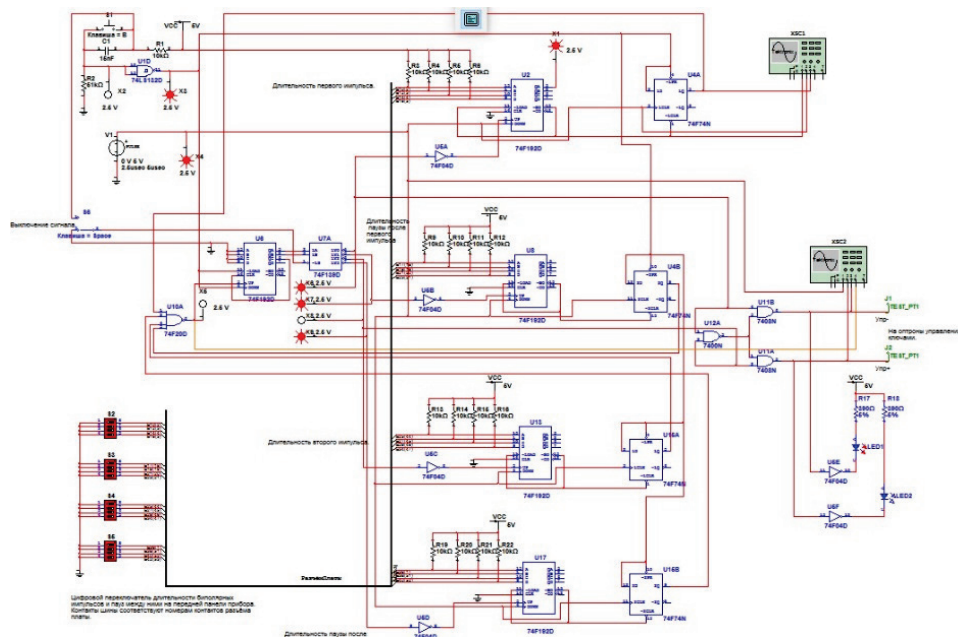


Рис. 4. Компьютерная модель блока формирования длительности импульсов

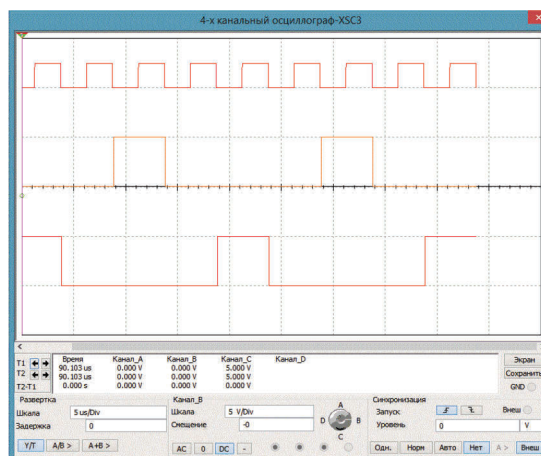
Fig. 4. Computer model of pulse duration generation unit

Длительность импульса или паузы, соответствующая значению «1», равна длительности базового импульса, установленной на пятиразрядном цифровом переключателе периода колебаний; а длительность, соответствующая значению «2», равна удвоенной длительности базового импульса колебаний генератора и т. д.

Блок формирования длительности импульсов выдает на выходе два сигнала управления на два ключа, включающие на нагрузку два источника питания разной полярности (рис. 1). Если ключи открываются одновременно, то через них идет сквозной ток, что неизбежно приводит к их выходу из строя. Для исключения такого состояния в схеме формируется обязательная неотключаемая пауза между импульсами (рис. 5), а на выходе дополнительно подключается блок логической защиты, который не позволяет попасть на управление ключами двух одновременных сигналов на отпирание.

Рис. 5. Виртуальная осциллограмма сигналов на входе (верхняя линия) и выходе (две нижние линии) блока формирования длительности импульсов

Fig. 5. Virtual oscillogram of the signals at the input (upper line) and at the output (two lower lines) of the pulse duration generation unit



Блок электронных ключей собран на мощных n -канальных IGBT-транзисторах IRGP50B60PDPBF [16]. Для непосредственного управления мощным транзистором применена специальная микросхема драйвер IGBT и MOSFET транзисторов IR2121, имеющая схему защиты ключа от перегрузки. Каждый из двух ключей имеет отдельный, гальванически не связанный с землей источник питания. Поэтому для гальванической развязки с цифровыми управляющими сигналами использованы быстродействующие оптроны HCPL-2601, которые запитаны через стабилизаторы напряжения от источников питания драйверов соответствующих ключей. Они же дают защиту цифровой части схемы от возможных неисправностей ключей, так как напряжение питания на ключах может достигать 400 В.

Общий вид разработанного экспериментального оборудования для исследования импульсных процессов биполярного электрохимического и электролитно-плазменного полирования металлических материалов, включая источник питания, представлен на рис. 6.

Разработанный источник питания позволяет формировать импульсы тока до 50 А при напряжении от 0 до 400 В обеих полярностей и способен регулировать их длительность в диапазоне от 10,0 мкс до 8,1 с при возможности регулировки соотношения длительности импульсов и пауз от 1:1 до 1:9. Например: длительность положительного импульса – 90 мкс; длительность паузы после него – 50 мкс; длительность отрицательного импульса – 10 мкс; длительность паузы между отрицательным и положитель-

ным импульсами – 10 мкс. Источник питания дает возможность исследовать электрохимические и электроплазменные процессы в электролите как в режиме постоянного тока, так и в импульсном режиме в широком диапазоне длительности импульсов.

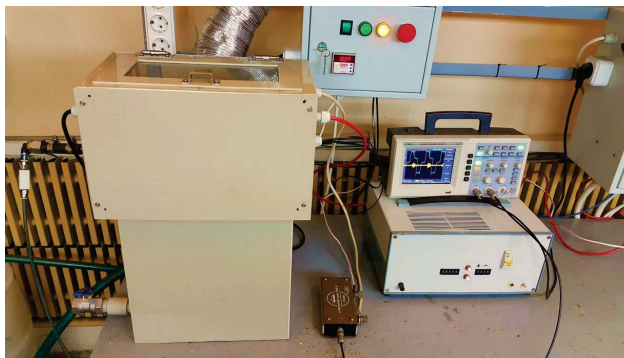


Рис. 6. Общий вид разработанного экспериментального оборудования
 Fig. 6. General view of the developed experimental equipment

Биполярный импульсный источник питания был испытан в ряде экспериментов по электрохимическому полированию образцов из различных металлов. В результате испытаний установлены некоторые особенности обработки, на возникновение которых влияют временные характеристики импульсов тока или длительность паузы между ними (рис. 7).

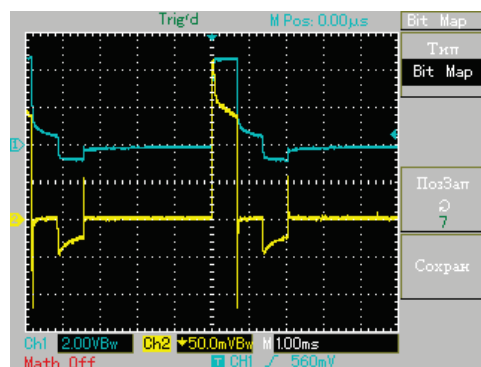


Рис. 7. Пример формы импульсов напряжения, формируемых источником питания в процессе электрохимического полирования легкоокисляемых сплавов: верхняя линия – напряжение; нижняя – ток нагрузки
 Fig. 7. Example of the shape of voltage pulses formed by a power supply during electrochemical polishing of easily oxidized alloys: upper line is voltage; lower – one is load current

Создание источника питания с микросекундным диапазоном изменения временных параметров импульсов тока большой амплитуды и большим диапазоном регулировки напряжения открывает широкие возможности для разработки и исследования принципиально новых процессов обработки в электролитах с целью как полирования поверхности, так и нанесения покрытий. Наиболее целесообразно применение разработанной технологии для обработки деталей точной механики, медицинского инструментария, имплантатов, деталей приборов. Примеры импульсного электрохимического полирования образцов из различных металлических материалов представлены на рис. 8.



Рис. 8. Примеры импульсного электрохимического полирования образцов из различных металлических материалов с применением разработанного источника питания

Fig. 8. Examples of pulsed electrochemical polishing of samples made of various metallic materials using a developed power supply

ВЫВОДЫ

1. Разработан источник питания для исследований в области импульсных электрохимических и электролитно-плазменных процессов, позволяющий формировать импульсы тока амплитудой до 50 А при напряжении от 0 до 400 В обеих полярностей и способный регулировать длительность импульсов и паузы между ними в диапазоне от 10,0 мкс до 8,1 с при возможности регулировки соотношения длительности импульсов и пауз от 1:1 до 1:9.

2. По результатам проведенных испытаний источника питания установлено, что его характеристики позволяют разрабатывать и выполнять исследования принципиально новых высокоэффективных импульсных процессов полирования металлических материалов на основе электрохимической и электролитно-плазменной обработки. Благодаря возможности формирования регулируемых по длительности и амплитуде импульсов тока большой мощности в процессе электрохимической обработки обеспечивается возможность:

- увеличить стабильность геометрических и физико-химических свойств рабочей поверхности «деталь – электролит» за счет удаления катодных отложений;
- выполнять обработку с большой эффективностью, при которой скорость сглаживания микронеровностей обрабатываемой поверхности, отнесенная к общему съему металла, значительно возрастает;
- полировать материалы в универсальных электролитах простых составов на основе солей и кислот без добавления хромового ангидрида и предварительного нагрева электролита;
- полировать труднообрабатываемые материалы в солевых растворах без применения плавиковой кислоты.

3. Принципиальные схематические решения разработанного источника питания с регулируемыми импульсами могут быть положены в основу промышленного оборудования для электрохимического полирования, глянцеваания поверхности, а также удаления заусенцев на изделиях, применяемых в приборо- и машиностроении, на изделиях медицинского назначения из различных металлических материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галанин, С. И. Электрохимическое полирование поверхности ювелирных сплавов золота импульсными токами / С. И. Галанин // Современные гальванические производства: технологии, оборудование, материалы, методы анализа: сб. тез. докл. науч.-практ. семинара, Санкт-Петербург, 6–8 июня 2007 г. СПб.: Санкт-Петерб. госуд. технол. ун-т, 2007. С. 2.
2. Галанин, С. И. Электрохимическое полирование поверхностей латуней импульсными биполярными токами / С. И. Галанин, В. О. Агафонов // Дизайн. Материалы. Технология. 2007. Т. 3, № 2. С. 84–87.
3. Breaking the Chemical Paradigm in Electrochemical Engineering: Case Studies and Lessons Learned from Plating to Polishing in Advances in Electrochemical / E. J. Taylor [et al.] // Advances in Electrochemical Science and Engineering. Wiley-VCH Scheduled Spring. 2017. Vol. 18.
4. Electrochemical Machining Using Modulated Reverse Electric Fields: U. S. pat. No 6,402,931 / C. Zhou, E. J. Taylor, J. Sun, L. Gebhart, R. Renz. Issue Jun. 11, 2002.
5. Changes on Surfaces of Electrodes in Aqueous Electrolytic Solutions at High Voltages / W. Adamitzki [et al.] // Proceedings of the 9th International Symposium on Electrochemical Machining Technology 2013. Chemnitz, 2013.
6. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 October 2006. Slovakia, Trnava, 2006. P. 6.
7. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
8. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
9. Особенности формирования электрохимических покрытий сплавами на основе олова в условиях нестационарного электролиза / И. И. Кузьмар [и др.] // Современные электрохимические технологии и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГТУ, 2017. С. 272–276.
10. Преображенский, В. И. Полупроводниковые выпрямители / В. И. Преображенский. М.: Энергоиздат, 1986. 80 с. (Библиотека электромонтера, вып. 582).
11. Чернышова, Т. И. Моделирование электронных схем / Т. И. Чернышова, Н. Г. Чернышов. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 80 с.
12. Suchenek, M. Programmable Pulse Generator Based on Programmable Logic and Direct Digital Synthesis / M. Suchenek, T. Starecki // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83, No 12. P. 124704/1–4. <https://doi.org/10.1063/1.4771921>.
13. Бирюков, С. А. Цифровые устройства на МОП-интегральных микросхемах / С. А. Бирюков. Москва: Радио и связь, 1996. 23 с. (Массовая радиобиблиотека, № 1220).
14. Shakursky, M. V. Digital Converter of Frequency Deviation Based on Three Frequency Generator / M. V. Shakursky, V. K. Shakursky, V. V. Ivanov // East-West Design & Test Symposium, IEEE 2013. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ewdts.2013.6673142>.
15. Kar, S. K. Tunable Square-Wave Generator for Integrated Sensor Applications / S. K. Kar, S. Sen // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2011. Iss. 10, vol. 60. P. 3369–3375.
16. Кирюхин, И. С. Силовая электроника фирмы HARRIS / И. С. Кирюхин, С. В. Шашков. М.: ДОДЭКА, 1999. 32 с. (Библиотека электронных компонентов, № 3).

Поступила 20.03.2018 Подписана в печать 25.04.2018 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Galanin S. I. (2007) Electrochemical Polishing of the Surface of Jewelry Gold Alloys by Pulse Currents. *Sovremennye Gal'vanicheskie Proizvodstva: Tekhnologii, Oborudovanie, Materialy, Metody Analiza: Sb. Tez. Dokladov. Nauch.-Prakt. Seminara, Sankt-Peterburg, 6–8 Iyunya 2007 g.* [Modern Electroplating Production: Technologies, Equipment, Materials, Methods of Analysis. Collection of Abstracts of Scientific and Practical Seminar. St.-Petersburg, 6–8 June]. St.-Petersburg, St.-Petersburg State Technological University, 2 (in Russian).
2. Galanin S. I., Agafonov V. O. (2007) Electrochemical Polishing of Brass Surfaces by Pulsed Bipolar Currents. *Dizain. Materialy. Tekhnologiya = Design. Materials. Technology*, 3 (2), 84–87 (in Russian).
3. Taylor E. J., Inman M. E., Garich H. M., McCrabb H. A., Snyder S. T., Hall T. D. (2017) Breaking the Chemical Paradigm in Electrochemical Engineering: Case Studies and Lessons Learned from Plating to Polishing. *Advances in Electrochemical Science and Engineering. Vol. 18*. Wiley-VCH Scheduled Spring.
4. Zhou C., Taylor E. J., Sun J., Gebhart L., Renz R. (2002) *Electrochemical Machining Using Modulated Reverse Electric Fields*. U.S. Patent No 6,402,931.
5. Adamitzki W., Meyer W., Loeser C., Nestler K., Bui H. L., Zeidler H. (2013) Changes on Surfaces of Electrodes in Aqueous Electrolytic Solutions at High Voltages. *Proceedings of the 9th International Symposium on Electrochemical Machining Technology 2013*. Chemnitz.
6. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 Oct. 2006*. Slovakia, Trnava, 6.
7. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E., Niss V. S. (2012) Model of Metal Removal in Electrolytic-Plasma Treatment of the Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
8. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (5), 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
9. Kuzmar I. I., Vasilec V. K., Kushner L. K., Hmil A. A., Giro A. M. (2017) Specific Features of Formation of Electrochemical Coverings by Alloys on the Basis of Tin in the Conditions of Non-Stationary Electrolysis. *Sovremennye Elektrokhimicheskie Tekhnologii i Oborudovanie: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Modern Electrochemical Technologies and Equipment: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian State Technological University, 272–276 (in Russian).
10. Preobrazhensky V. I. (1986) *Semiconductor Rectifiers. Electrician Library No 582*. Moscow, Energoizdat Publ. 80 (in Russian).
11. Chernishova T. I., Chernishov N. G. (2010) *Simulation of Electronic Circuits*. Tambov, Tambov State Technical University. 80 (in Russian).
12. Suchenek M., Starecki T. (2012) Programmable Pulse Generator Based on Programmable Logic and Direct Digital Synthesis. *Review of Scientific Instruments*, 83 (12), 124704/1–4. <https://doi.org/10.1063/1.4771921>.
13. Biryukov S. A. (1996) *Digital Devices on MOS-Integral Chips. Mass Radiobiblioteka No 1220*. Moscow, Radio i Svyaz' Publ. 23 (in Russian).
14. Shakurskiy M. V., Shakurskiy V. K., Ivanov V. V. (2013) Digital Converter of Frequency Deviation Based on Three Frequency Generator. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2013)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ewdts.2013.6673142>.
15. Kar S. K., Sen S. (2011) Tunable Square-Wave Generator for Integrated Sensor Applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60 (10), 3369–3375. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2128490>.
16. Kiryukhin I. S., Shashkov S. V. (1999) *Power Electronics by the HARRIS Firm. Electronic Components Library. No 3*. Moscow, DODEKA Publ. 32 (In Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>

УДК 621.039

Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR*

С. М. Дмитриев¹⁾, Д. В. Доронков¹⁾, М. А. Легчанов¹⁾, В. Д. Сорокин¹⁾,
А. Е. Хробостов¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева
(Нижний Новгород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными вариантами конструкции дефлекторов на течение потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR. Экспериментальные модели ТВС-Квадрат реактора PWR были изготовлены в полном геометрическом подобии с натурными кассетами. Исследования проводились путем моделирования течения теплоносителя в активной зоне на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. Для измерения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя использовались специальные пневмометрические датчики, позволяющие измерять полный вектор скорости в точке по трем его компонентам. При проведении исследований локальной гидродинамики теплоносителя измерялись поперечные скорости потока, а также расходы теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели ТВС-Квадрат. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину течения теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками с различными вариантами конструкции дефлекторов, а также выбрать дефлектор оптимального конструктивного исполнения. Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС-Квадрат легла в основу инженерного обоснования конструкций активных зон реакторов PWR. Рекомендации по выбору оптимальных вариантов конструкций перемешивающих дистанционирующих решеток учитывались конструкторами АО «ОКБМ Африкантов» при создании вводимых в эксплуатацию новейших ТВС-Квадрат. Результаты экспериментальных исследований используются для верификации CFD-кодов как зарубежной, так и отечественной разработки, а также программ детального поэлементного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, перемешивающая дистанционирующая решетка, гидродинамика теплоносителя

Для цитирования: Закономерности формирования потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат реактора PWR / С. М. Дмитриев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268>

Адрес для переписки

Дмитриев Сергей Михайлович
Нижегородский государственный технический
университет имени Р. Е. Алексеева
ул. Минина, 24
603950, г. Нижний Новгород,
Российская Федерация
Тел.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

Address for correspondence

Dmitriev Sergei M.
Nizhny Novgorod State Technical
University named after R. E. Alekseev
24 Minin str.,
603950, Nizhny Novgorod,
Russian Federation
Tel.: +7 831 436-23-25
dmitriev@nntu.nnov.ru

* Данная работа осуществлена в рамках выполнения базовой части Государственного задания № 12/17-01.10.

Regularities of Formation of Flow of Coolant behind the TVS-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the PWR-Type Reactor

S. M. Dmitriev¹⁾, D. V. Doronkov¹⁾, M. A. Legchanov¹⁾, V. D. Sorokin¹⁾,
A. E. Khrobostov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. This paper presents the results of experimental investigations of the influence of mixing spacer gratings with different types of deflectors on the coolant flow in the TVS-Kvadrat fuel assembly of the PWR-type reactor. Experimental model of the TVS-Kvadrat of the PWR reactor was made in complete geometric similarity with the full-scale cassettes. Studies were carried out by modeling the flow of coolant in the core with the use of an experimental stand; the latter was an aerodynamic open loop through which air is pumped. To measure the local hydrodynamic characteristics of the coolant flow, special pneumatic sensors were used that were able to measure the full velocity vector at the point by its three components. During the studies of the local fluid dynamics of the coolant, the transverse flow rates were measured; also, the coolant flow rates were measured by cells of the TVS-Kvadrat experimental model. The analysis of the spatial distribution of the projections of the absolute flow velocity made it possible to detail the pattern of the coolant flow behind the mixing spacing gratings with different variants of the deflector design, as well as to choose the deflector of the optimal design. Accumulated data base on the flow of the coolant in the TVS-Kvadrat fuel assembly formed the basis of the engineering justification of the structures of the active zones of PWR reactors. Guidelines for choosing optimal designs mixing spacing grids have been considered by designers of the "Afrikantov OKBM" JSC when they created implementations of the latest TVS-Kvadrat assemblies. The results of experimental studies are used to verify CFD-codes of both foreign and domestic origin, as well as the programs for detailed cell-by-cell calculation of active zones in order to reduce conservatism in the justification of thermal reliability.

Keywords: nuclear reactor, core, fuel assembly, mixing spacer grating, coolant hydrodynamics

For citation: Dmitriev S. M., Doronkov D. V., Legchanov M. A., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2018) Regularities of Formation of Flow of Coolant behind the TVS-Kvadrat Mixing Spacing Grid of the PWR-Type Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 258–268. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-258-268> (in Russian)

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС-Квадрат для активной зоны реакторов PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в ТВС-Квадрат использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в тепловыделяющей сборке (ТВС) для водо-водяных энергетических реакторов конструкторские решения [1].

Одним из таких решений является применение оригинальных перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР), предназначенных для интенсификации процессов тепло- и массопереноса в активной зоне реактора PWR. Особое внимание следует уделить конструкции ПДР, а именно: геометрии и расположению дефлекторов, а также выбору угла отгиба их относительно осевого направления движения потока теплоносителя. Сле-

довательно, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-Квадрат требуют поиска оптимального конструктивного решения с точки зрения таких показателей, как эффективность перемешивания потока, гидравлические потери и запас до кризиса теплоотдачи.

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, что в свою очередь обязывает к большой информативности и высокой достоверности значений локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя [2]. Для решения данной научно-технической задачи необходимо исследовать условия течения теплоносителя и выявить закономерности формирования потока в характерных ячейках ТВС. Поэтому исследования распределения гидродинамических характеристик потока в характерных областях ТВС-Квадрат за различными типами перемешивающих дистанционирующих решеток является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании теплотехнической надежности активной зоны реактора PWR.

Экспериментальный стенд

Для изучения особенностей течения потока теплоносителя в Институте ядерной энергетики и технической физики Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [3].

Принцип работы стенда заключается в том, что воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее он проходит успокоительный участок, ЭМ и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, на стенде моделируются гидродинамические условия течения потока теплоносителя [4, 5].

Исследования локальной гидродинамики в ТВС-Квадрат реактора PWR проводились на 49-стержневой модели фрагмента ТВС-Квадрат, выполненной в полном подобии натурной ТВС-Квадрат с коэффициентом геометрического подобия $K_g = 4,2$. Модель имеет длину 3 м и состоит из квадратного чехла, цилиндрических твэл-имитаторов с описанным диаметром $d = 40$ мм и исследуемых поясов ПДР.

Пояса ПДР состоят из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования твэлов. Верхние кромки пластин в местах их пересечения снабжены дефлекторами различного конструктивного исполнения. Рассматривались четыре варианта дефлекторов:

1) типа «прямой гиб» (рис. 1а). Первоначальный вариант дефлектора с углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины;

2) типа «косой гиб» (рис. 1b). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 8 % по отношению к первоначальному варианту и с профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

3) типа «обратный гиб» (рис. 1c). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 21 % по отношению к первоначальному варианту и с профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины;

4) «увеличенной площади» (рис. 1d). Усовершенствованный дефлектор типа «прямой гиб» увеличенной площадью на 28 % по отношению к первоначальному варианту и с профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины.

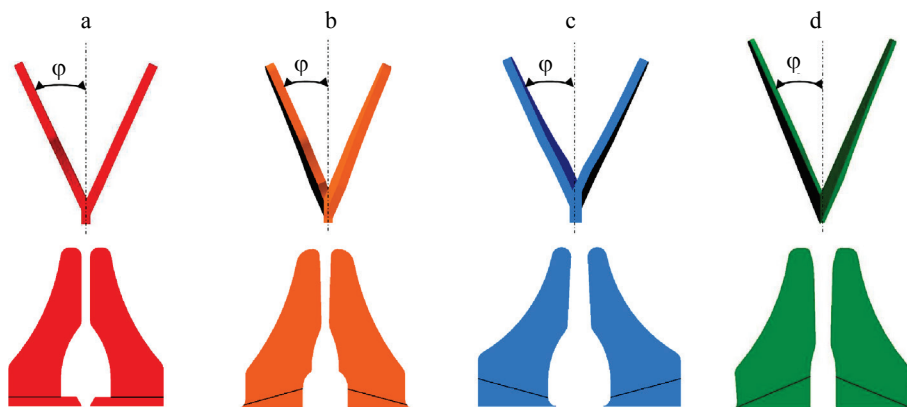


Рис. 1. Исследуемые типы дефлекторов на перемешивающих дистанционирующих решетках ТВС-Квадрат ($\varphi = 25^\circ$): 1 – дефлектор типа «прямой гиб»; 2 – типа «косой гиб»; 3 – типа «обратный гиб»; 4 – «увеличенной площади»

Fig. 1. Investigated types of deflectors on the spacer mixing gratings of TVS-Kvadrat ($\varphi = 25^\circ$): 1 – “direct bend” type deflector; 2 – “oblique bend” type deflector; 3 – “reverse bend” type deflector; 4 – “larger” type deflector

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство, базовый блок коммутации/измерения, ЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Измерение направления и величины скорости, а также давления в пространственном потоке осуществлялось пневмометрическим зондом, представляющим собой пять стальных капилляров, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях, срезанных под углом 30° . Пневмометрический зонд сконструирован таким образом, что он практически не вносит возмущения в поток и не искажает направление течения теплоносителя. Это условие обеспечивается за счет того, что поперечное сечение зонда не затесняет проходное сечение ячейки ЭМ более чем на 5,0 %. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на осях X , Y , Z не превышают 7,5 % от абсолютной скорости. Снятие показав

ний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$ [6, 7].

Обоснование представительности экспериментальных исследований

Важным этапом проведения любого экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса соответствует $Re = 4,5 \cdot 10^5$, что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления моделируется воздухом, то на основе теории гидродинамического подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается неизменным. Поэтому при изучении гидродинамики потока на моделях ТВС-Квадрат в зоне автомодельности полученные результаты экспериментов могут быть перенесены на штатные условия течения теплоносителя в активной зоне реакторов PWR. Таким образом, для обоснования представительности исследований на стенде проведены эксперименты по определению участка нижней границы зоны автомодельного течения [8, 9].

С целью нахождения нижней границы зоны автомодельности на стенде проведены исследования в диапазоне чисел Рейнольдса $(2 \cdot 10^4) - (1 \cdot 10^5)$, которые заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента сопротивления трению исследованного участка от числа Рейнольдса. Полученный массив точек аппроксимировался двумя линейными зависимостями – в переходной области турбулентного течения и в области автомодельного течения. Точка пересечения этих прямых является нижней границей области автомодельного течения по числу Рейнольдса. Согласно полученным результатам, область автомодельного течения в ЭМ начинается с $Re = 7 \cdot 10^4$.

Также необходимое условие обоснования представительности исследований – это равенство коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) штатных ПДР и ПДР модели. Анализ результатов показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток экспериментальной модели в области автомодельного течения соответствуют КГС штатных перемешивающих дистанционирующих решеток. Результаты исследований КГС перемешивающих дистанционирующих решеток модели сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Коэффициенты гидравлического сопротивления поясов
перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат**
Local hydraulic resistance coefficient of the spacer mixing gratings of TVS-Kvadrat

Тип решетки и дефлектора	Коэффициент гидравлического сопротивления решетки
Перемешивающая дистанционирующая решетка с дефлектором типа «прямой гиб»	0,95
ПДР с дефлектором типа «косой гиб»	1,01
ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»	1,03
ПДР с дефлектором «увеличенной площади»	1,07

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя была выбрана одна регулярная ячейка (рис. 2). Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейки были разделены на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости определялся для 11 сечений по длине модели.

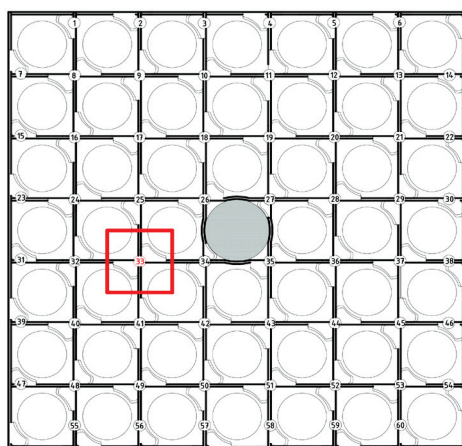


Рис. 2. Поперечное сечение экспериментальной модели

Fig. 2. Cross section of the experimental model

Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в регулярных ячейках за перемешивающей дистанционирующей решеткой ТВС-Квадрат

По результатам экспериментальных исследований локальной гидродинамики потока за различными перемешивающими дистанционирующими решетками в регулярной ячейке выявлены следующие особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат.

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов ПДР возникают локальные вихри в пределах ячеек и направленные турбулентные течения между ячейками кассеты согласно ориентации дефлекторов (рис. 3). Форма вихревой структуры, образовавшейся за ПДР, зависит от угла линиигиба дефлектора относительно верхней кромки пластины ПДР. При угле линиигиба дефлектора, равной 0 (дефлектор типа «прямой гиб»), образуются два вихря, расположенные около твэлов (рис. 3а), а при угле 15° (дефлекторы типов «косой гиб», «обратный гиб» и «увеличенной площади») образуется один вихрь в центре ячейки (рис. 3 б–д).

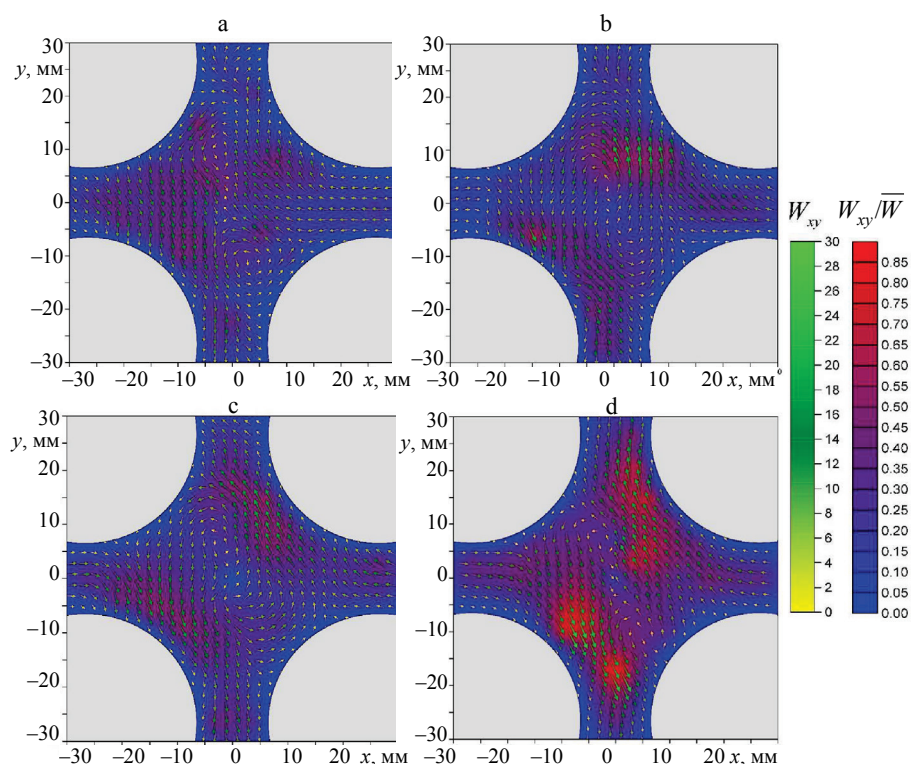


Рис. 3. Векторное поле в регулярной ячейке за исследуемыми дефлекторами перемешивающих дистанционирующих решеток модели на расстоянии $l/d_r = 1,3$ от решетки: 1, 2, 3 – векторное поле за дефлекторами типов «прямой гиб», «косой гиб», «обратный гиб»; 4 – векторное поле за дефлекторами «увеличенной площади»

Fig. 3. Vector field in the regular cell behind the investigated deflectors of the spacer mixing gratings at distance $l/d_r = 1.3$ from the grating: 1, 2, 3 – vector field behind the “direct bend” type deflector, “oblique bend”, “reverse bend”; 4 – vector field behind the “larger” type deflector

2. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными дефлекторами ПДР при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависят от профиля дефлекторов и площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат. По графикам, представленным на рис. 4, видно, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат приводит к уменьшению длины жизни вихря и росту интенсивности турбулентных течений между соседними ячейками.

3. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типов «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $l/d_r \approx 15$, для ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» – на расстоянии $l/d_r \approx 24$. За дефлекторами «увеличенной площади» на расстоянии за ПДР $l/d_r = 25$ значение поперечной скорости $W_{xy}/\bar{W} = 0,16$. Данный факт говорит о том, что увеличение площади перекрытия дефлекторами проходного сечения ячеек при-

водит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя (рис. 5).



Рис. 4. Зависимость длины жизни вихревых структур и интенсивности турбулентных течений между соседними регулярными ячейками ТВС-Квадрат от площади дефлектора

Fig. 4. The dependence of life length of vortex structures and the intensity of the turbulent flows between the adjacent TVS-Kvadrat regular cells on the area of the deflector

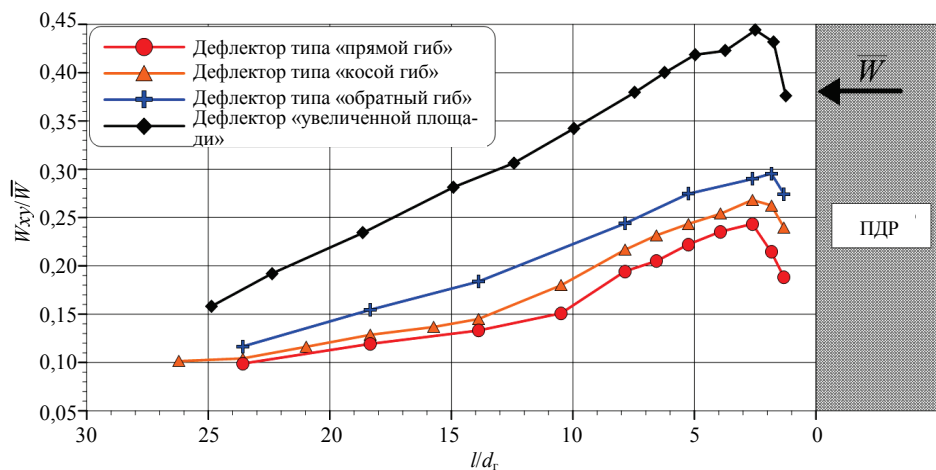


Рис. 5. Распределение относительной поперечной скорости $W_{xy}/\bar{W}$ в межтвэльных зазорах регулярной ячейки ТВС-Квадрат

Fig. 5. The distribution of the relative transverse velocity $W_{xy}/\bar{W}$ in the gaps between fuel rods of the TVS-Kvadrat regular cell

Оценка эффективности перемешивающей дистанционирующей решетки ТВС-Квадрат с различными типами дефлекторов

Для сравнения различных типов дефлекторов ПДР ТВС-Квадрат целесообразно использовать следующие параметры [10]:

1) параметр межъячейкового обмена

$$F_{mix} = \frac{1}{S} \int \frac{|v_{cross}|}{u} dy, \quad (1)$$

где S – зазор между твэлами; v_{cross} – компонента скорости теплоносителя через границу между ячейками; u – средняя скорость теплоносителя по сечению ячейки в направлении потока;

2) параметр завихренности потока

$$F_{vortex} = \frac{\int r^2 v_{lateral} u_{local} dr}{R_s \int r u_{local}^2 dr}, \quad (2)$$

где $v_{lateral}$ – тангенциальная составляющая скорости теплоносителя; u_{local} – локальная аксиальная компонента скорости теплоносителя; r – радиальное расстояние от центра до точки, в которой измеряются скорости теплоносителя; R_s – минимальное расстояние от центра ячейки до поверхности стержня.

По результатам расчета параметра завихренности потока F_{vortex} , определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в регулярной ячейке модели, определено, что при фиксированной координате l/d_r за любым из исследуемых дефлекторов данный коэффициент меняет знак (рис. 6). Это свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя. Для ПДР с дефлектором типа «косой гиб» поток начинает движение в противоположную сторону при $l/d_r \approx 5$, для ПДР с дефлектором типа «обратный гиб» и дефлектором «увеличенной площади» – при $l/d_r \approx 3$, для ПДР с дефлектором типа «прямой гиб» – при $l/d_r \approx 23$.

Расчеты параметра межъячейкового обмена между регулярными ячейками показали, что наибольшие его значения по всей длине за ПДР наблюдаются при установке на ПДР дефлекторов «увеличенной площади» (рис. 7).

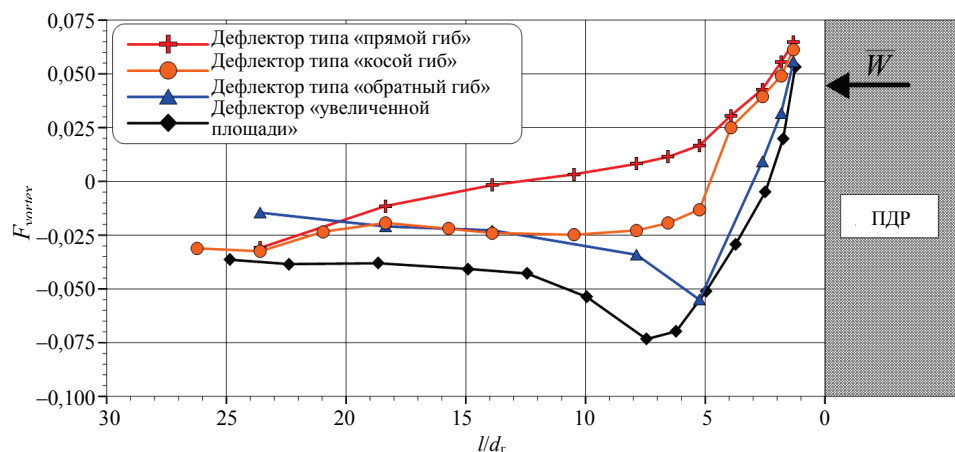


Рис. 6. Параметры завихренности потока F_{vortex} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат

Fig. 6. Intensity of vortex action of the flow F_{vortex} in the TVS-Kvadrat regular cell

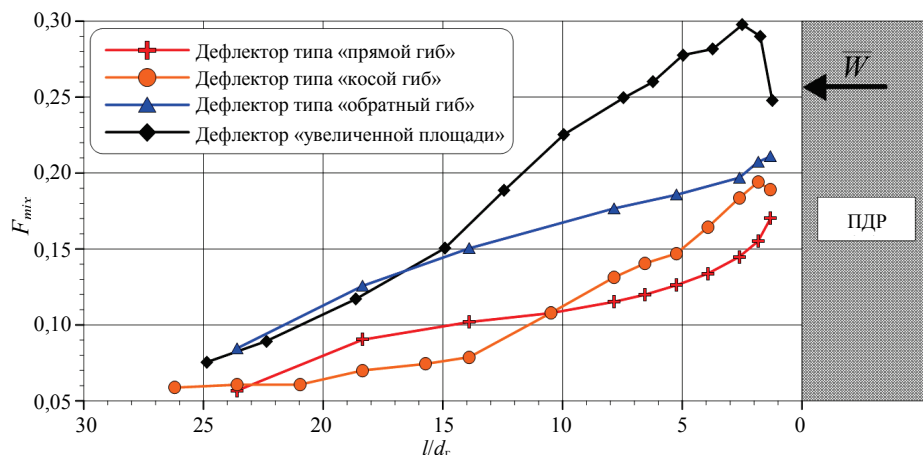


Рис. 7. Параметры межъячейкового обмена F_{mix} в регулярной ячейке ТВС-Квадрат

Fig. 7. Intercellular exchange parameters F_{mix} in the TVS-Kvadrat regular cell

ВЫВОДЫ

1. Форма вихревых структур, образовавшихся за любым из исследуемых типов deflectоров перемешивающих дистанционирующих решеток, зависит от угла линиигиба deflectора относительно верхней кромки пластины перемешивающих дистанционирующих решеток.

2. Длина жизни вихря и интенсивность направленных турбулентных течений между соседними ячейками за различными deflectорами перемешивающих дистанционирующих решеток при одинаковом угле их наклона относительно осевого направления движения теплоносителя зависят от профиля deflectоров и площади перекрытия deflectорами проходного сечения ячеек ТВС-Квадрат.

3. Увеличение площади перекрытия deflectорами проходного сечения регулярных ячеек приводит к росту длины затухания поперечных скоростей потока теплоносителя.

4. При фиксированной координате l/d_r за любым из исследуемых типов deflectоров коэффициент, определяющий интенсивность воздействия deflectоров, меняет знак, что свидетельствует об изменении направления движения поперечного потока теплоносителя.

5. Наибольшие значения параметра межъячейкового обмена по всей длине наблюдаются при установке на перемешивающих дистанционирующих решетках deflectоров «увеличенной площади».

6. Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С. М. Дмитриев [и др.]. М.: Машиностроение. 2013. 413 с.
2. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов / А. А. Баринов [и др.] // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 5. С. 270–275. <https://doi.org/10.1134/s0040363614080050>.

3. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С. М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. № 8. С. 20–27. <https://doi.org/10.1134/s0040363614080050>.
 4. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С. С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 5, вып. 3. С. 98–107.
 5. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113, вып. 5. С. 252–257.
 6. Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С. С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 4. С. 177–182.
 7. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 / О. Н. Кашинский [и др.] // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 63–67. <https://doi.org/10.1134/s0040363612070065>
 8. Жуков, А. В. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: теоретические основы и физика процесса / А. В. Жуков, А. П. Сорокин, Н. М. Матюхин. М.: Энергоатомиздат, 1989. 183 с.
 9. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гухман. М.: Высш. шк., 1973. 295 с.
 10. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О. В. Митрофанова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.
- Поступила 17.11.2017 Подписана в печать 22.01.2018 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Dmitriev S. M., Zverev D. L., Bykh O. A., Panov Yu. K., Sorokin N. M., Farafonov V. A. (2013) Basic Equipment of NPP with Thermal Neutron Shell-Type Reactors. Moscow, Mashinostroenie Publ. 413 (in Russian).
2. Barinov A. A., Dmitriev S. M., Khrobostov A. E., Samoilov O. B. (2016) Methods of Substantiation of Thermal Reliability of the Core of Thermal Water-Water Reactors. Atomic Energy, 120 (5), 335–341. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0140-9>.
3. Dmitriev S. M., Samoilov O. B., Khrobostov A. E., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Sorokin V. D. (2014) Combined Numerical and Experimental Investigations of Local Hydrodynamics and Coolant Flow Mass Transfer in Kvadrat-Type Fuel Assemblies of PWR Reactors with Mixing Grids. Thermal Engineering, 61 (8), 558–565. <https://doi.org/10.1134/s0040601514080059>.
4. Borodin S. S., Dmitriev S. M., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2014) Specific Features of Local Hydrodynamics and Mass Transfer of the Coolant in Fuel Assemblies of VVER and PWR Reactors with Mixing Gratings. Teplovye Protssessy v Tekhnike = Thermal Processes in Engineering, 5 (3), 98–107 (in Russian).
5. Dmitriev S. M., Borodin S. S., Legchanov M. A., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2013) Experimental Studies of Hydrodynamic and Mass-Transfer Properties of Coolant Flow in VVER Fuel Assemblies TVSA. Atomic Energy, 113 (5), 314–319. <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9638-6>.
6. Borodin S. S., Varentsov A. V., Dobrov A. A., Dmitriev S. M., Pronin A. N., Solntsev D. N., Sorokin V. D., Khrobostov A. E. (2015) Numerical and Experimental Investigation of the Local Hydrodynamic and Mass Transfer Characteristics of the Flow of the Heat Carrier in the Alternative Fuel Assembly of VVER Reactors with Mixing Grids. Teplovye Protssessy v Tekhnike = Thermal Processes in Engineering, (4), 177–182 (in Russian).
7. Kashinskii O. N., Lobanov P. D., Pribaturin N. A., Kurdyumov A. S., Volkov S. E. (2013) Experimental Study of the Effect of Spacer grid on the Flow Structure in Fuel Assemblies of the AES 2006 Reactor. Thermal Engineering, 60 (1), 62–66. <https://doi.org/10.1134/s0040601512070063>.
8. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Matyukhin N. M. (1989) Interchannel Exchange in Fuel Assemblies of Fast Reactors: a Theoretical Framework and Physics. Moscow, Energoatomizdat Publ. 183 (in Russian).
9. Gukhman A. A. (1973) Introduction to the Theory of Similarity. Moscow, Vysshaya Skola Publ. 295 (in Russian).
10. Mitrofanova O. V. (2010) Fluid Flow and Heat Transfer of Swirling Flows in Channels of Nuclear Power Plants. Moscow, Fizmatlit Publ. 288 (in Russian).

Received: 17 November 2017

Accepted: 22 January 2018

Published online: 30 May 2018

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-269-282>

УДК 662.995.662.61

Водотрубно-дымогарный котел: числовое компьютерное моделирование и эксперимент

А. В. Каныгин¹⁾

¹⁾Институт технической теплофизики НАН Украины (Киев, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Рассмотрено усовершенствование технологий использования природного газа в водогрейных котлах. Предложена концепция нового водотрубно-дымогарного котла, созданного на основе размещения в пространстве цилиндрической жаровой трубы-топки экранного радиального трубного пучка. Результаты числового компьютерного моделирования топочного процесса водотрубно-дымогарного котла тепловой мощностью 630 кВт сравнивались с соответствующими данными, полученными в ходе эксперимента. Анализ результатов числового компьютерного моделирования свидетельствует об эффективности установленного трубного радиального пучка: на 56 % увеличилось общее тепловосприятие топки, при этом на 22 % выросла часть теплоты, переданной конвективным теплообменом; снизился уровень температуры в топочном пространстве, при этом на 45–51 % сократилась концентрация оксидов азота. Экспериментально установлено, что наличие охлаждаемого экранного трубного радиального пучка в топке водотрубно-дымогарного котла позволяет: увеличить тепловое напряжение топочного объема на 10 %; сократить концентрацию оксидов азота и монооксида углерода в дымовых газах на 24–40 % и на 25–67 % соответственно, при этом уровень выбросов вредных веществ удовлетворяет требованиям норм Украины (ГОСТ 30735–2001); снизить избыток воздуха в топке на 3 % и повысить КПД котла на 0,5 %. Опытный образец водогрейного водотрубно-дымогарного котла (КВВД-0,63 Гн) прошел сертификационные испытания, государственную регистрацию, принят в постоянную эксплуатацию. Котел прост в изготовлении и может производиться в условиях предприятий коммунальных тепловых сетей. Надежность конструкции котла подтверждается опытом многолетней эксплуатации.

Ключевые слова: сжигание газа, диффузионное горение, жаротрубный котел, конструкция топки, оксиды азота, теплообмен, математическая модель

Для цитирования: Каныгин, А. В. Водотрубно-дымогарный котел: числовое компьютерное моделирование и эксперимент / А. В. Каныгин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 3. С. 269–282. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-269-282>

Адрес для переписки

Каныгин Александр Викторович
Институт технической теплофизики
НАН Украины
ул. Желябова, д. 2а
03057, г. Киев, Украина
Тел: +38 044 453-28-91
kanygin195@gmail.com

Address for correspondence

Kanygin Alexander V.
Institut Tehnicheskoj Teplofiziki
NAN Ukrainy
2a Zhelyabova str.,
03057, Kiev, Ukraine
Tel.: +38 044 453-28-91
kanygin195@gmail.com

Watertube Smoke Tube Boiler: Numerical Computer Simulation and Experiment

A. V. Kanygin¹⁾

¹⁾Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Abstract. The improvement of natural gas use technologies in water-heating boilers is considered. The concept of a new watertube smoke tube boiler, created on the basis of the screen radial tube bundle placement in the space of a cylindrical heat pipe-furnace. The results of numerical computer simulation of the furnace process in the 630 kW watertube smoke tube boiler are compared with the corresponding data obtained during the experiment. The analysis of the results of numerical computer simulation reveals the efficiency of the installed tube radial bundle: the total heat perception in the furnace increased by 56 %, while the growth of the part of the heat transferred by convective heat exchange occurred by 22 %; the temperature level in the furnace volume has decreased, while the concentration of nitrogen oxides has decreased by 45–51 %. It is experimentally established that the presence of the cooled screen tube radial bundle in the furnace of the watertube smoke tube boiler makes it possible: to increase heat release rate in the furnace volume by 10 %; to reduce the concentration of nitrogen oxides and carbon monoxide in flue gases by 24–40 % and 25–67 % respectively (resulting in a compliance of the level of pollutant emission to the requirements of the Ukrainian national regulations, viz. GOST 30735–2001); reduce the excess air in the furnace by 3 % and increase the efficiency of the boiler by 0.5 %. The pre-production prototype of the water-heating smoke tube boiler (KVVD-0.63 Gn) has passed the certification tests, state registration; the boiler has been adopted in permanent operation. The boiler is not complicated in manufacturing, and producible in the conditions of municipal heating network companies. The reliability of the boiler's design has been confirmed by the experience of many years of functioning.

Keywords: gas combustion, diffusion combustion, firetube boiler, furnace configuration, NO_x, heat transfer, mathematical model

For citation: Kanygin A. V. (2018) Watertube Smoke Tube Boiler: Numerical Computer Simulation and Experiment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (3) 269–282. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-269-282> (in Russian)

Введение

Основным топливом, потребляемым предприятиями коммунальной теплоэнергетики, был и остается дефицитный природный газ. Сокращение потребления газа, а также уменьшение вредных выбросов при работе газоиспользующего котельного оборудования предприятий коммунальной теплоэнергетики представляются актуальными проблемами. Благодаря внедрению технологий утилизации теплоты уходящих газов эффективность использования топлива в отопительных котлах практически достигла своего максимума. Поэтому первоочередной задачей при работе котельного оборудования становится уменьшение вредных выбросов. Одним из способов сокращения выбросов является изменение технологического процесса в топках. Разрабатывая новое оборудование, специалисты все чаще используют компьютерное моделирование технологических процессов средствами вычислительной газодинамики, что помогает исследовать локальные эффекты, сопровождающие работу котлов.

Низкая себестоимость и другие качества жаротрубных котлов способствуют их широкому распространению на предприятиях коммунальной теплоэнергетики, где большое количество отопительных котлов единичной мощностью до 1 МВт (их в Украине насчитывается более 4000) в значительной мере отработали свой ресурс. Поэтому целью исследований явилось повышение технико-экономических и экологических характеристик газовых водогрейных котлов, оснащенных жаровыми трубами-топками.

**Интенсификация конвективного топочного теплообмена
как метод подавления формирования оксидов азота в котлах.
Водотрубно-дымогарный котел**

В специальной литературе можно найти обширный материал, касающийся различных технологий подавления формирования оксидов азота при сжигании в котлах газового топлива. Как правило, мероприятия по снижению выбросов вредных веществ жаротрубными котлами сводятся к технологическим мерам, а именно к организации особых режимов горения, уменьшающих образование оксидов азота в жаровых трубах-топках. Одной из технологий снижения выбросов оксидов азота является уменьшение температуры топочной среды путем интенсификации топочного теплообмена. Изменения технологического процесса в топке за счет влияния на лучистый теплообмен связаны с технологическими сложностями. Более простым техническим решением представляется интенсификация конвективного теплообмена, что может быть осуществлено за счет увеличения площади топочных поверхностей нагрева. Такая технология использовалась котлостроителями и ранее. Например, американскими специалистами в патенте [1] предложена конструкция газогорелочного устройства, оснащенного цилиндрическим водотрубным кожухом. Горение проходит во внутренней части кожуха, а горячие газы перед попаданием в топочный объем подвергаются охлаждению в трубной системе кожуха. Утверждается, что такое техническое решение может уменьшать концентрацию NO_x в топочных газах до 19 ppm (здесь и далее концентрации NO_x и CO приведены к содержанию O_2 в газах, равному 3 %). В [2] сообщается о модернизации жаровой трубы-топки путем размещения в ее объеме металлических и керамических стержней для отвода части выделяющейся при горении теплоты. Исследования проводились в Германии. В данном случае удалось сократить выбросы NO_x примерно на 40 %. Отрицательными сторонами такого технического решения явились увеличение химического недожога из-за роста выбросов CO , а также короткая рабочая кампания стержней, размещенных в топке. В общем же случае, по данным американских специалистов, средняя концентрация NO_x для газовых жаротрубно-дымогарных котлов, не оснащенных технологиями снижения выбросов, составляет около 79 ppm [3].

Снижение выбросов оксидов азота за счет интенсификации конвективного топочного теплообмена реализовано в конструкции водотрубно-

дымогарного котла, разработанного Институтом технической теплофизики НАН Украины (ИТТФ НАНУ). Особенностью его конструкции является наличие охлаждаемого трубного пучка, радиально размещенного в пространстве цилиндрической жаровой трубы-топки (рис. 1). Наличие трубного пучка отличает водотрубно-дымогарный котел от типовых конструкций жаротрубно-дымогарных котлов, изображенных на рис. 2. Ознакомиться с описанием конструкции и техническими характеристиками водотрубно-дымогарного котла можно в [4–6].

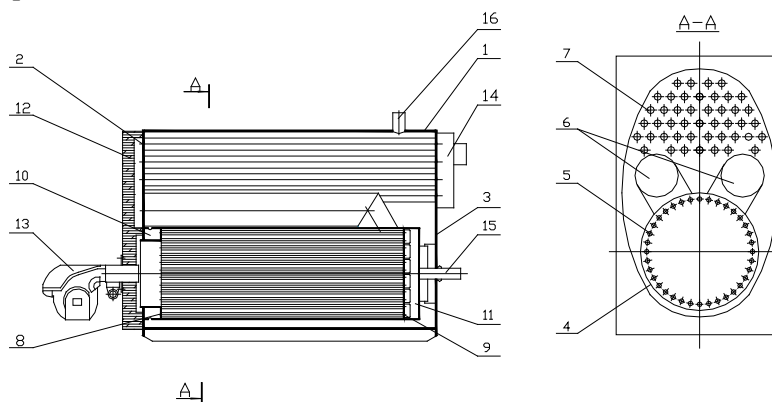


Рис. 1. Конструкция водогрейного водотрубно-дымогарного котла: 1 – корпус; 2, 3 – передняя и задняя трубная доска; 4 – жаровая труба; 5 – труба экранной системы; 6 – газоход 2-го хода; 7 – дымогарная труба; 8, 9 – передняя и задняя кольцевая трубная доска; 10, 11 – передняя и задняя кольцевая водяная камера; 12 – дверь котла с поворотной камерой; 13 – горелочное устройство; 14 – дымовая коробка; 15, 16 – патрубок обратной и прямой сетевой воды

Fig. 1. Water-heating watertube smoke tube boiler design: 1 – outer shell; 2, 3 – fore and rear tube plate; 4 – fire tube; 5 – screen system tube; 6 – second flue gas passage; 7 – smoke tube; 8, 9 – fore and rear circular tube plate; 10, 11 – fore and rear circular water chamber; 12 – boiler door with flue gas reversing chamber; 13 – burner; 14 – flue gas outlet; 15, 16 – water inlet and water outlet

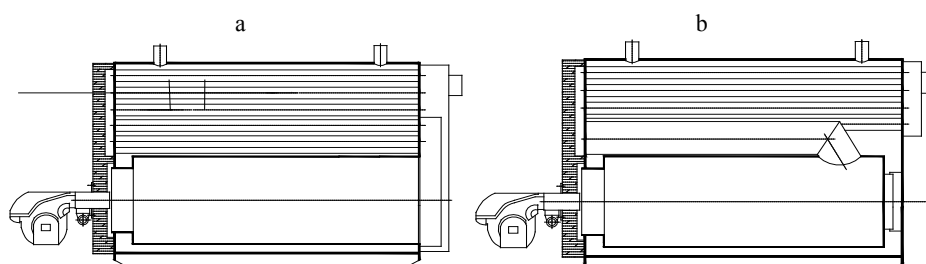


Рис. 2. Типовые конструкции газовых водогрейных жаротрубно-дымогарных котлов, оснащенных топками с транзитным движением продуктов сгорания: а – с аксиальным выходом; б – с боковым выходом

Fig. 2. Standard design of gas-fired water-heating firetube smoke tube boilers equipped with transit flue gas passage furnaces: a – with axial outlet; b – with side outlet

Оценка эффективности принятых технических решений проводилась с помощью компьютерного моделирования и эксперимента.

Числовое компьютерное моделирование топочного процесса водотрубно-дымогарного котла

Для создания расчетных моделей использовалось трехмерное моделирование в универсальном программном комплексе ANSYS FLUENT. Процессы горения газовой смеси и теплообмена, которые имеют место в жаровых трубах-топках, описываются в ANSYS FLUENT с помощью типовых моделей. Согласно указаниям [7], создание компьютерной модели топочных камер в программном комплексе начинается с определения типа горения. Моделирование процесса горения и теплообмена в жаровых трубах-топках проводится с использованием опции горения без предварительного смешивания (Non-Premixed Combustion) [8], что дает возможность моделировать диффузионное горение, имеющее место в жаровых трубах-топках, оснащенных блочными вентиляторными горелками. Основой такой опции горения является положение о моментальном термохимическом состоянии топочной среды, которое при упрощении может быть представлено как постоянное скалярное количество, называемое смесью фракций (mixture fraction). Расчет моделей топок выполнялся согласно рекомендациям раздела Using the Non-Premixed Combustion Model [7]. Математические модели, применяемые для моделирования диффузионного горения в жаровых трубах-топках при использовании ANSYS FLUENT, стандартны и состоят из:

- уравнения неразрывности;
- уравнения сохранения количества движения с тензором напряжения Рейнольдса, замкнутом на k - ε -модели турбулентности;
- модели горения с единственным постоянным скалярным количеством, которое называется «смесь фракций» и описывается через атомное массовое относительное количество;
- уравнения материального обмена и закона действующих масс, где общее количество сформировавшейся компоненты в единице объема и массовый молекулярный поток замкнуты на модели горения;
- дискретно-ординатной модели лучистого теплообмена DO;
- определения основных теплофизических характеристик (теплопроводности, вязкости, теплоемкости) как функций температуры, а также определения плотности газовой среды по закону идеального газа для смеси.

Граничные условия моделирования схематично показаны на рис. 3 и в общем случае определялись данными, входящими в тепловые расчеты топок. Основные упрощения, принятые при построении моделей топок, состояли в следующем:

- температура топочных поверхностей нагрева принята постоянной, что допустимо для водогрейного котла;
- течение дутьевого воздуха через турбулизационный диск горелки не моделировалось, а турбулизация потока за диском задавалась через опцию степени турбулентности.

Моделирование образования выбросов NO_x в программном комплексе ANSYS FLUENT проводится с помощью моделей, которые учитывают ча-

стичное содержание NO_x в дымовых газах (rate models). Поскольку горение природного газа в топке котла сопровождается формированием главным образом «термических» и «быстрых» оксидов азота, то в моделировании использовались именно эти опции. Определение концентраций радикалов кислорода ([O] Mode) проводилось с помощью метода полуравновесных концентраций (Partial Equilibrium Approach). Данный метод нахождения концентрации радикалов кислорода показал лучшую сходимость модельных количественных показателей NO_x с экспериментальными данными. Определение концентраций гидроксильного радикала ([OH] Mode) на основании рекомендаций [8] также велось по методу полуравновесных концентраций. Характерной особенностью программного комплекса ANSYS FLUENT является то, что разработчики рассматривают моделирование образования NO_x в качестве вспомогательного средства для отслеживания тенденций изменения количества образовавшихся NO_x при изменении условий технологического процесса. Точное количественное определение концентрации NO_x при моделировании не гарантируется [8].

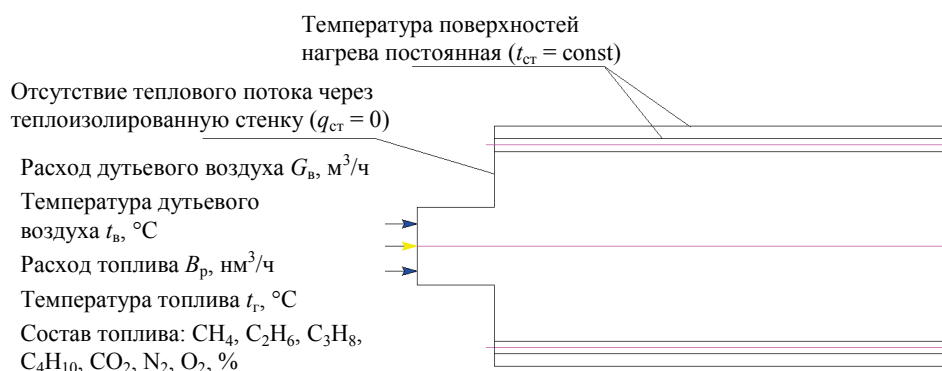


Рис. 3. Описание граничных условий компьютерного моделирования процесса теплообмена в жаровых трубах-топках в комплексе ANSYS FLUENT

Fig. 3. ANSYS FLUENT software boundary conditions for computer simulation of firetube furnace heat transfer

Разработка модели топочного устройства водотрубно-дымогарного котла тепловой мощностью 630 кВт для сравнения дополнена базой, созданной автором на основе топок жаротрубно-дымогарных котлов типовых конструкций (приведенных на рис. 2), эквивалентных по мощности и условиям работы горелок. Моделирование теплообмена нуждается в верификации выбранных опций и математических моделей. Поэтому работа проводилась в два этапа. Вначале решалось тестовое задание моделирования топочного теплообмена на примере жаровой трубы-топки котла Johnston 125HP тепловой мощностью 1,25 МВт. На втором этапе создавались модели остальных топок. Среди полученных данных обращает на себя внимание следующее. При решении тестового задания значения температуры, полученные для разных вариантов моделирования, сравнивались со значениями, полученными во время эксперимента в сходных точках топочного

объема. Результаты верификации представлены на рис. 4. Данные моделирования, которые имеют лучшую сходимость с экспериментом (максимальное расхождение с экспериментом в таком случае не превышало 8 %), получены при использовании дискретно-ординатной модели лучистого теплообмена с описанием конвективного теплообмена стандартной пристенной функцией при первом решении. Расхождение между экспериментальными данными и данными моделирования на выходе из топки в таком случае не превышало 1,5 %.

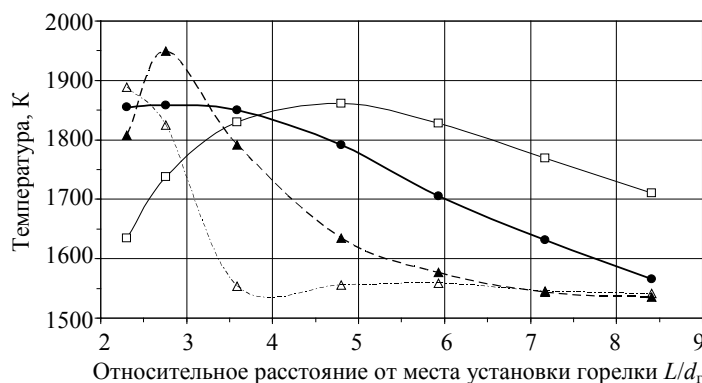


Рис. 4. Результаты моделирования топочного теплообмена при решении тестового задания в комплексе ANSYS FLUENT на примере топки котла Johnston 125hp: —●— — эксперимент; —□— — модель P-1; --▲-- — модель DO, стандартная и увеличенная дискретизация расчетных углов, первое решение; --△-- — модель DO, стандартная дискретизация расчетных углов, второе решение

Fig. 4. Results of furnace heat exchange computer simulation in ANSYS FLUENT software for the testing task solution on example of Johnston 125hp boiler's furnace: —●— — experiment; —□— — P-1 model; --▲-- — DO model, standard and increased discretization of the calculated angles, the first decision; --△-- — DO model, standard and increased discretization of the calculated angles, the second decision

Моделирование остальных топков дало следующие результаты. Имеются отличия аэродинамики и теплообмена в топке водотрубно-дымогарного котла в сравнении с другими топками. Интенсификация теплообмена в периферийных областях, вызываемая поверхностью охлаждаемого трубного пучка, приводит к быстрому охлаждению, уменьшению удельного объема дымовых газов и их движению к периферии. Как следствие, уменьшается объем зон рециркуляции, примыкающих к корню факела. В топке водотрубно-дымогарного котла появляется дополнительная зона рециркуляции, которая расположена в первой четверти топочного объема и примыкает к середине факела. Поля скорости и температуры в центральном сечении топков приведены на рис. 5.

Поле температуры топки водотрубно-дымогарного котла характеризуется более равномерным распределением. Часть теплоты, которая передается конвекцией, в тепловом балансе топки водотрубно-дымогарного котла, в сравнении с топками котлов типовых конструкций, увеличилась до 43 % (что показано на гистограмме рис. 6).

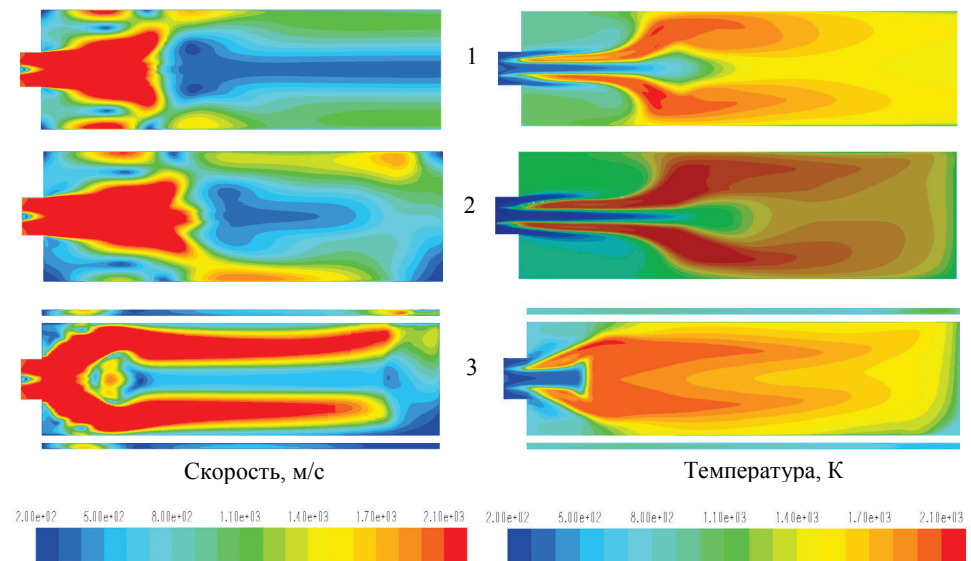


Рис. 5. Поля скорости и температуры: 1, 2 – топка с аксиальным и боковым выходом соответственно; 3 – топка водотрубно-дымогарного котла

Fig. 5. Velocity and temperature patterns: 1, 2 – furnace with axial and side outlet respectively; 3 – watertube smoke tube boiler's furnace

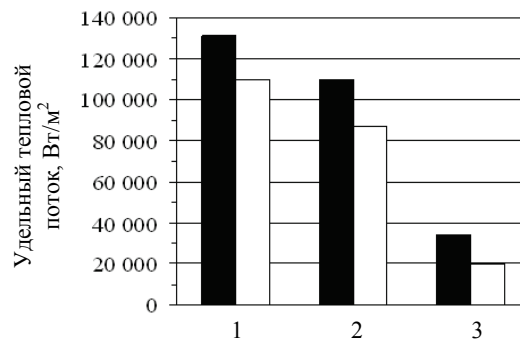


Рис. 6. Удельный тепловой поток на топочных поверхностях: 1, 2 – топка с аксиальным и боковым выходом соответственно; 3 – топка водотрубно-дымогарного котла; ■ – общий тепловой поток; □ – радиационный тепловой поток

Fig. 6. Specific heat flux on furnace heating surface: 1, 2 – furnace with axial and side outlet respectively; 3 – watertube smoke tube boiler's furnace; ■ – total heat flux; □ – radiation heat flux

Известно, что температура массового формирования «термических» оксидов азота превышает 1800 К. Снижение уровня температуры в топке водотрубно-дымогарного котла тормозит формирование оксидов азота. Проиллюстрировать интенсивность формирования «термических» оксидов азота в жаровых трубах-топках возможно путем выделения части топочного объема, в котором температура среды превышает 1800 К. Границы таких зон, полученные при работе топки на номинальной нагрузке (расход газа 72,4 м³/ч), представлены на рис. 7.

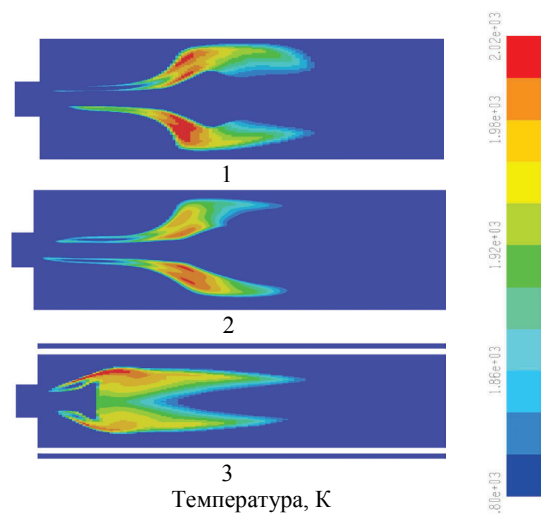


Рис. 7. Зоны высокой температуры в топках: 1, 2 – топка с аксиальным и боковым выходом соответственно; 3 – топка водотрубно-дымогарного котла

Fig. 7. High temperature zones in the furnaces: 1, 2 – furnace with axial and side outlet respectively; 3 – watertube smoke tube boiler's furnace

Анализ показывает, что в топке водотрубно-дымогарного котла зона формирования оксидов азота локализована во фронтальной части топочно-го объема. Переход водотрубно-дымогарного котла на работу при частичной нагрузке (расход газа $51,5 \text{ м}^3/\text{ч}$) характеризуется уменьшением размеров зон рециркуляции топочных газов (рис. 8). Однако перераспределение скорости практически не влияет на образование оксидов азота, что подтвердилось результатами эксперимента.

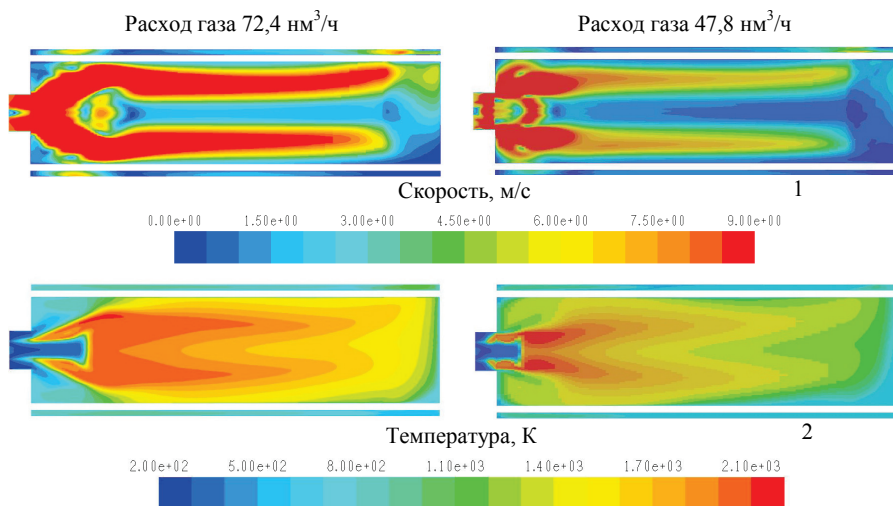


Рис. 8. Аэродинамика и температурный режим топки водотрубно-дымогарного котла при работе на разных нагрузках: 1, 2 – поле скорости и температуры соответственно

Fig. 8. Aerodynamics and thermal condition of watertube smoke tube boiler's furnace functioning at variation in load: 1, 2 – velocity pattern and temperature pattern respectively

Экспериментальные исследования водотрубно-дымогарного котла

Экспериментальная установка на базе опытного образца водотрубно-дымогарного котла тепловой мощностью 630 кВт (КВВД-0,63 Гн) была оснащена и смонтирована в г. Киеве в помещении районной котельной. Схема средств измерения этой установки представлена на рис. 9.

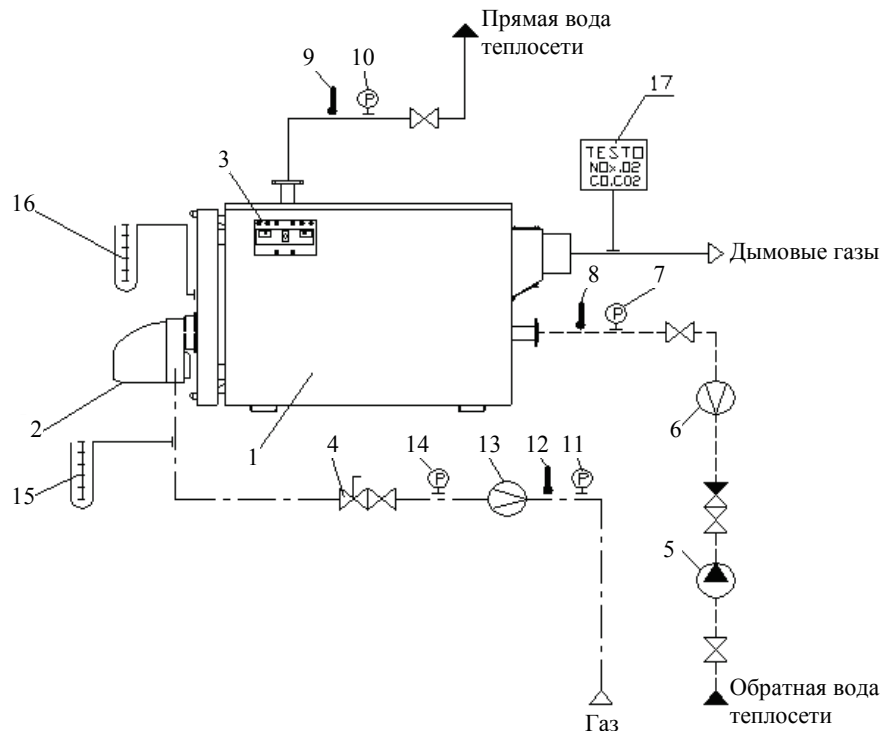


Рис. 9. Схема измерений промышленно-экспериментальной установки на базе водотрубно-дымогарного котла КВВД-0,63 Гн: 1 – котел; 2 – горелочное устройство; 3 – блок электронной котловой автоматики; 4 – комбинированный газовый блок; 5 – насос теплосети; 6 – счетчик воды теплосети; 7, 8 – давление воды и температура воды на входе в котел; 9, 10 – температура воды и давление воды на выходе из котла; 11 – давление газа перед счетчиком; 12 – температура газа; 13 – счетчик газа; 14, 15 – давление газа перед газовым блоком и перед горелочным устройством; 16 – давление дымовых газов в топке; 17 – газоанализатор

Fig. 9. The scheme of arrangement of measuring instruments of the experimental industrial unit based on watertube smoke tube pre-production prototype of the KVVD-0.63 Gn boiler: 1 – boiler; 2 – burner; 3 – boiler automated processor; 4 – gas pressure regulator; 5 – circulating pump; 6 – net flow meter; 7, 8 – water inlet pressure and water inlet temperature; 9, 10 – water outlet temperature and water outlet pressure; 11 – gas flow meter inlet pressure; 12 – gas temperature; 13 – gas flow meter; 14, 15 – gas regulator inlet pressure and burner inlet pressure; 16 – flue gas pressure in furnace; 17 – flue gas analyser

Оснащение выполнено согласно общей методике проведения испытаний котельного оборудования [9, 10]. Программой эксперимента предусматривалось исследование работы котла на частичной нагрузке (1-я ступень горения), а также форсирование режима с достижением максимальной нагрузки на 2-й ступени горения. Горелочное устройство включалось в работу, удерживало факел, и котел стабильно работал на обеих ступенях

горения. Достижение максимальной нагрузки не приводило к выходу режимных параметров за допустимые пределы, а ограничивалось техническими условиями работы горелки. Основные результаты эксперимента представлены в табл. 1, где для сравнения приведены также характеристики эквивалентного по мощности жаротрубно-дымогарного котла КВа-0,63 Гн при работе на расчетной нагрузке. За счет совершенствования конструкции жаровой трубы-топки удалось форсировать топочный режим и достичь стабильной работы котла на нагрузках, превышающих расчетные, а также несколько повысить КПД, сократить выбросы NO_x и CO.

Таблица 1

**Сравнительные характеристики водотрубно-дымогарного
и эквивалентного жаротрубно-дымогарного котлов**
**Comparative performance of watertube smoke tube
and of equivalent firetube smoke tube boilers**

Наименование параметра	Фактическое значение		
	КВД-0,63 Гн		КВа-0,63 Гн
	1-я ступень горения	2-я ступень горения	
Тепловая производительность, кВт	458	678	633
Тепловая мощность горелки, кВт	483	732	695
Расход газа расчетный (0 °С, 101,3 кПа), $\text{м}^3/\text{ч}$	47,78	72,42	68,4
Приведенная к нормальным условиям нижняя теплотворная способность газа (Q_n^p), $\text{кДж}/\text{м}^3$	36399	36399	36579
Температура уходящих газов, °С	124,4	166,4	168
Коэффициент избытка воздуха	1,21	1,08	1,12
Содержание в уходящих газах: кислорода (O_2), % двуокси углерода (CO_2), % оксида углерода (CO), ppm оксидов азота (NO_x), ppm	4 9,6 20 54	1,8 10,8 4 57	2,4 10,5 12 77
Содержание в сухих продуктах сгорания (приведенное к $\alpha = 1$), $\text{мг}/\text{м}^3$: оксидов азота (в пересчете на NO_2) оксида углерода (CO)	137 31	128 5	180 15
КПД по обратному балансу, %	94,4	92,3	92,8
Разность КПД, % абсл.	0,4	0,3	1,7

Наличие в жаровой трубе-топке радиального трубного пучка не приводит к увеличению химического недожога и значительному росту аэродинамического сопротивления, увеличение которого составило 10–15 мм вод. ст. Заметный рост гидравлического сопротивления котла также не выявлен. Общее гидравлическое сопротивление водяного тракта не превысило $0,1 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Экологические показатели водотрубно-дымогарного котла сравнивались с показателями котла «Турбомат-Дуплекс» фирмы Viessmann при работе на разных нагрузках (рис. 10).

Установлено, что переход водотрубно-дымогарного котла со 2-й ступени горения на 1-ю не приводит к значительному изменению концентрации NO_x , что подтверждает адекватность результатов компьютерного моделирования. В целом концентрация NO_x за водотрубно-дымогарным котлом на всех режимах оставалась меньше, чем за котлом «Турбомат-

Дуплекс». Усредненная зависимость КПД котла «брутто» представлена на рис. 11. Там же приведены характеристики КПД подобного оборудования, оснащенного горелками разных изготовителей.

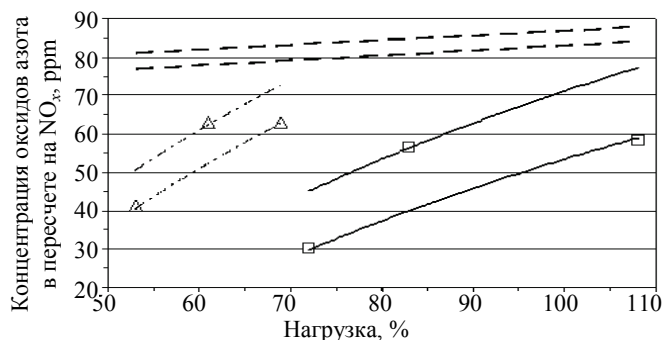


Рис. 10. Влияние нагрузки на концентрацию NO_x :

□ – котел КВВД-0,63 Гн (2-я ступень горения); Δ – котел КВВД-0,63 Гн (1-я ступень горения);
— – предел изменения концентрации NO_x , 2-я ст. ($\alpha = 1,08-1,20$);
- - - - - то же, 1-я ст. ($\alpha = 1,13-1,25$); — — — — то же, при работе котла «Турбома-Дуплекс»

Fig. 10. Load influence on NO_x concentration:

□ – the KVVD-0.63 Gn boiler (2nd firing rate); Δ – the KVVD-0.63 Gn boiler (1st firing rate);
— — — — limit of changes in concentrations of NO_x , 2nd degree ($\alpha = 1.08-1.20$); - - - - - the same, 1st rate ($\alpha = 1.13-1.25$); — — — — the same, during the “Turbomat Duplex” boiler operation

На одинаковых нагрузках КПД водотрубно-дымогарного котла несколько уступает оборудованию с наилучшими показателями, но не более чем на 1 %. На отдельных диаграммах (рис. 12) приведена концентрация NO_x и CO в уходящих газах в сравнении с другим оборудованием и действующими нормами. Тонированная часть столбцов соответствует пределам изменения концентрации. Несмотря на то что водотрубно-дымогарный котел оснащен рядовым горелочным устройством, КПД и уровень вредных выбросов отвечают уровню лучших международных стандартов.

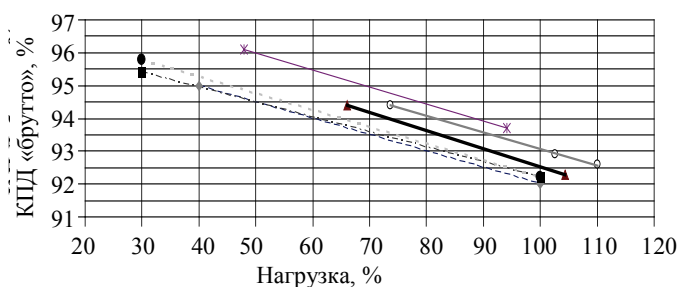


Рис. 11. Сравнение КПД «брутто» водогрейных котлов при работе на разных нагрузках:
- - ♦ - - жаротрубно-дымогарный водогрейный котел VITOMAX 200 фирмы Viessmann;
○ – водотрубный водогрейный котел КВВ-2,0 Гн; ▲ – водотрубно-дымогарный котел;
- - ■ - - жаротрубно-дымогарный водогрейный котел Logano S825L фирмы Buderus;
- - ● - - секционный чугунный водогрейный котел GE 615 фирмы Buderus;
— * — стальной котел с реверсивной топкой РИО-700

Fig. 11. Comparison of boilers thermal efficiency at variations in load:

- - ♦ - - the watertube smoke tube water-heating VITOMAX 200 boiler produced by Viessmann;
○ – the watertube water-heating KVV-2.0 Gn boiler; ▲ – watertube smoke tube boiler;
- - ■ - - the firetube smoke tube Logano S825L boiler produced by Buderus;
- - ● - - the sectional cast iron water-heating boiler GE 615 produced by Buderus;
— * — the steel boiler of RIO-700 with a reversible furnace

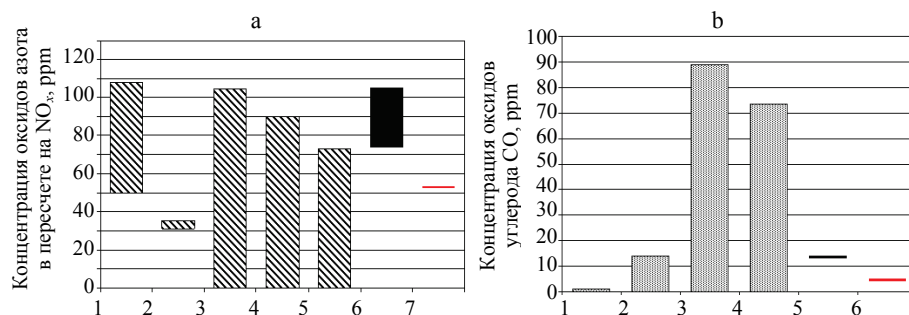


Рис. 12. Пределы изменения концентрации NO_x (a) и CO (b) при работе котлов на номинальной нагрузке: 1 – газотрувные котлы (США); 2 – газотрувные котлы фирмы Viessmann (Германия); 3 – ГОСТ 30735–2001 (Украина); 4 – DIN 4702-8 (Германия); 5 – «Arrêté du 26 août 2013» (Франция); 6 – жаротрубно-дымогарный котел КВа-0,63 Гн; 7 – водотрубно-дымогарный котел КВВД-0,63 Гн

Fig. 12. NO_x (a) and CO (b) ranges of variation in emissions from boilers functioning at nominal load: 1 – US firetube boilers; 2 – Viessmann firetube boilers (Germany); 3 – GOST 30735–2001 (Ukraine); 4 – DIN 4702-8 (Germany); 5 – the “Arrêté du 26 août 2013” (France); 6 – the KVa-0.63 Gn firetube smoke boiler; 7 – the KVVD-0.63 Gn watertube smoke tube boiler

ВЫВОДЫ

1. Путем усовершенствования жаровой трубы-топки разработана конструкция нового водотрубно-дымогарного котла с улучшенными технико-экономическими и экологическими характеристиками.

2. Анализ результатов численного компьютерного моделирования свидетельствует о том, что установка охлаждаемого экранного трубного радиального пучка в жаровую трубу-топку котла изменяет технологический режим жаровой трубы-топки, следствием чего являются:

- увеличение общего тепловосприятия топки на 56 % и рост при этом части теплоты, переданной конвективным теплообменом, на 22 %;
- уменьшение уровня температуры в топочном пространстве и сокращение концентрации оксидов азота на 45–51 %.

3. Экспериментально установлено, что наличие охлаждаемого экранного трубного радиального пучка в топке водотрубно-дымогарного котла позволяет:

- увеличить тепловое напряжение топочного объема на 10 %;
- сократить концентрацию оксидов азота и углерода в дымовых газах на 24–40 % и 25–67 % соответственно, при этом уровень выбросов вредных веществ удовлетворяет требованиям норм Украины (ГОСТ 30735–2001);
- обеспечить стабильную работу котла при снижении избытка воздуха в топке на 3,0 % и повысить КПД на 0,5 %.

4. Результаты работы подтверждают возможность использования универсального программного комплекса ANSYS FLUENT (версия 6.3) для моделирования теплообмена в жаровых трубах-топках с транзитным движением продуктов сгорания при значениях числа Бугера $<0,5$.

5. Опытный образец водогрейного водотрубно-дымогарного котла КВВД-0,63 Гн прошел сертификационные испытания, государственную регистрацию, принят в постоянную эксплуатацию. Котел прост в изготовлении и может производиться в условиях предприятий коммунальных тепловых сетей. Надежность конструкции котла подтверждается опытом многолетней эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Process and Fuel Burner with Exhaust-Gas Recirculation: pat. US 6579086 B2 USA, MPK7 F 23 C 9/00 / J. Fullemann, H. Boner, A. Allemann, M. Allemann (USA); published 17 Jun. 2003.
 2. Губарь, С. А. Методы и способы повышения тепловой и экологической эффективности жаротрубных теплогенераторов малой мощности для локального теплоснабжения: дис... канд. техн. наук: 05.23.03 / С. А. Губарь. Makeevka, 2004. 214 с.
 3. Alternative Control Techniques Document NO_x Emissions from Industrial/Commercial/Institutional (ICI) Boilers / U.S. Environmental Protection Agency. Emission Standards Division. EPA-453/R-94-022. USA, North Carolina: Research Triangle Park., 1994. 589 p.
 4. Сигал, А. И. Исследования водогрейного водотрубно-дымогарного котла / А. И. Сигал, А. В. Каныгин, Г. К. Саенко // Промышленная теплотехника. 2008. № 2. С. 48–54.
 5. Сигал, А. И. Экспериментальные исследования и опытная эксплуатация комбинированного водогрейного водотрубно-дымогарного котла / А. И. Сигал, А. В. Каныгин, Г. К. Саенко // Новости теплоснабжения. 2008. № 12. С. 38–42.
 6. Каныгин, А. В. О современных методах снижения образования оксидов азота при сжигании газа в котлах малой и средней мощности / А. В. Каныгин // Промышленная теплотехника. 2013. № 2. С. 79–86.
 7. FLUENT 6.3 Tutorial Guide [Electronic resource] / Fluent Inc. USA: Fluent Inc., 2006. Mode of Access: <http://www.hipec.wichita.edu/pdfs/fltg.pdf>.
 8. ANSYS FLUENT Theory Guide [Electronic resource] / ANSYS Inc. USA: ANSYS Inc., 2011. Mode of Access: <https://ru.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>.
 9. Расчет отчетных технико-экономических показателей электростанции и тепловой экономичности оборудования. Методические указания: ГКД 34.09.103–96. Введ. 01.03.1996. Киев: Мин-во энергетики Украины, 1996. 136 с.
 10. Методическое пособие по проведению комплексных эколого-теплотехнических испытаний котлов, работающих на газе и мазуте / под ред. И. Я. Сигала. Киев: ВНИПИТранс-Газ, Ротапринт, 1992. 213 с.
- Поступила 06.10.2017 Подписана в печать 19.12.2017 Опубликовано онлайн 30.05.2018

REFERENCES

1. Fullemann J., Boner H., Allemann A., Allemann M. (2003) Process and Fuel Burner with Exhaust-Gas Recirculation. Patent US 6579086 B2 USA.
 2. Gubar' S. A. (2004) *Methods for Improving the Thermal and Environmental Efficiency of Low Power Heat Pipe Heat Generators for Local Heat Supply*. Makeevka. 214 (in Russian).
 3. U.S. Environmental Protection Agency. Emission Standards Division. EPA-453/R-94-022. (1994) Alternative Control Techniques Document NO_x Emissions from Industrial/Commercial/Institutional (ICI) Boilers. USA, North Carolina: Research Triangle Park. 589.
 4. Sigal A. I., Kanygin A. V., Saenko G. K. (2008) Research of Water-Heating Watertube Fire Boiler. *Promyshlennaya Teplotekhnika = Industrial Heat Engineering*, (2), 48–54 (in Russian).
 5. Sigal A. I., Kanygin A. V., Saenko G. K. (2008). Experimental Studies and Trial Operation of the Combined Water-Heating Watertube Fire Boiler. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (12), 38–42 (in Russian).
 6. Kanygin A. V. (2013) On Modern Methods of Reducing the Formation of Nitrogen Oxides in the Combustion of Gas in Boilers of Low and Medium Power. *Promyshlennaya Teplotekhnika = Industrial Heat Engineering*, (2), 79–86 (in Russian).
 7. FLUENT 6.3 Tutorial Guide. USA: Fluent Inc., 2006. Available at: <http://www.hipec.wichita.edu/pdfs/fltg.pdf>.
 8. ANSYS FLUENT Theory Guide. USA: ANSYS Inc., 2011. Available at: <https://ru.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>.
 9. GKD [Industrial Guidance Document] 34.09.103–96. Calculation of the Reported Technical and Economic Indicators of the Power Plant and of Thermal Efficiency of the Equipment. Methodical Instructions. Kyiv, Ministry of Energy of Ukraine, 1996. 136 (in Russian).
 10. Sigal I. Ya. (ed.) (1992) *Guidance on Conducting an Integrated Ecological-Heat Engineering Testing of Boilers Operating on Gas and Fuel Oil*. Kyiv, VNIPITransGaz. 213 (in Russian).
- Received: 6 October 2017 Accepted: 19 December 2017 Published online: 30 May 2018