

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 59, № 5

2016

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Новаш И. В.** Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты 397
- Щербак Я. В., Семенов Ю. А.** Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока 418
- Соленков В. В., Брель В. В.** Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе 427
- Капанский А. А.** Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки 436

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Dobrego K. V.** Effect of the Fill Ventilation Window on Performance of a Natural Draft Cooling Tower Subjected To Cross-Winds
(**Доброго К. В.** Влияние вентиляционного отверстия в оросителе на тепловую работу башенной испарительной градирни в условиях ветра) 452
- Осипов С. Н.** О повышении энергетической безопасности Беларуси 464
- Штепа В. Н.** Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки 479
- Лазарев В. С., Скалабан А. В.** Основные мировые научные журналы в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» 488

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

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 26.09.2016. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз.
Дата выхода в свет . 2016. 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, 2016

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 59, No 5
2016

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

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

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection	397
Shcherbak Ya. V., Semenenko Yu. A. Analysis of the Functioning of a Combined Active Filter of a Sequential Type with Selective Links for Direct Current Traction Substation	418
Solencov V. V., Brel V. V. Influence of the Time of Disinhibition to Transients and Wear of the Friction Linings in an Asynchronous Motor	427
Kapansky A. A. Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal	436

HEAT POWER ENGINEERING

Dobrego K. V. Effect of the Fill Ventilation Window on Performance of a Natural Draft Cooling Tower Subjected to Cross-Winds	452
Osipov S. N. On Increasing Energy Security of Belarus	464
Shtepa V. N. Conceptual Bases of the Energy Efficient System of Management of Combined Units of Wastewater Treatment	479
Lazarev V. S., Skalaban A. V. The World Major Scientific Periodicals to Be Used by Researchers of "Renewable Energy, Local and Secondary Energy Resources"	488

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- S. N. ASAMBAEV (*Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan*),
W. T. WÓJCIK (*Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland*),
V. V. GALAKTIONOV (*Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, 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 Seint-Petersburg Polytechnic University, Seint-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. SAUHATS (*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. V. UŠPURAS (*Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania*),
B. M. KHROUSTALEV (*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*),
L. V. SHENETS (*Ministry of Energy of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*)

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 & Technique"

Passed for printing 26.09.2016. Dimension of paper 60×84¹/₈. Offset paper.
Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 250 copies. Date of publishing 2016. 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, 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417

УДК 621.316.925

Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрена реализация цифровых фильтров, используемых в измерительных органах тока микропроцессорных устройств релейной защиты. Приведены математические описания данных фильтров, а также программы для расчета их коэффициентов. Показано, что достоверно оценить функционирование цифровых фильтров можно только при входных воздействиях, приближенных по виду к реальным формам вторичного тока трансформатора тока, к которому подключена защита, использующая оцениваемый фильтр. Для этих целей в среде динамического моделирования MatLab–Simulink воспроизведена структурная модель энергосистемы и измерительного органа тока микропроцессорной (цифровой) защиты. Расчеты позволили установить, что при наличии в первичном сигнале тока экспоненциально затухающей апериодической составляющей магнитопровод трансформатора тока входит в насыщение даже при допустимой кратности первичного тока и номинальной вторичной нагрузке. Следствием этого являются искажение вторичного тока трансформатора тока и появление в нем высших гармоник, а также гармоник, не кратных основной. Сравнение реакций фильтров на указанные воздействия позволило выявить такие реализации фильтров, которые дают возможность определять амплитуду входного сигнала с наименьшими погрешностями. Предложены пути повышения качества фильтрации, связанные с применением оконных функций. Так, совместное использование цифровых фильтров и окна Хэмминга позволяет достичь близкого к нулю значения коэффициента усиления амплитуды сигнала в области высоких частот и практически подавить все спектральные составляющие, начиная с частоты 100 Гц. Происходящее при этом увеличение времени установления амплитуды сигнала может быть уменьшено за счет выбора наиболее оптимальных параметров всех элементов измерительного органа тока микропроцессорной защиты.

Ключевые слова: цифровой фильтр, дискретное преобразование Фурье, метод наименьших квадратов, ортогональные составляющие, окно Хэмминга, цифровая обработка сигналов, трансформатор тока, насыщение, микропроцессорная релейная защита, MatLab, Simulink

Для цитирования: Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection

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

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

Abstract. This article presents the implementation of digital filters used in digital relay protection current measuring elements. Mathematical descriptions of the considered digital filters as well as the computer programs for their coefficients calculation are described. It has been shown that in order to reliably estimate the digital filter performance its input signals waveforms must be close to the actual secondary current waveform of the current transformer to which the digital protection with the estimated digital filter is connected. For these purposes in MatLab–Simulink dynamic simulation environment the power system and the current measuring element models were developed. Performed calculations allowed to reveal that the exponentially decaying DC component which in some cases contains in primary fault current drives the current transformer core into saturation even when its nominal parameters are not exceeded. This results in distortion of the current transformer secondary current which in this case contains higher and inter-harmonics. Moreover, such harmonic content is not completely taking into account during coefficients calculation of the considered digital filters what results in signal magnitude estimation inaccuracy. Comparison of the digital filters response to the above-mentioned input signals allowed to find out such digital filter implementations which enable signal magnitude estimation with a minimum error. Ways of filtering quality improvement concerned with the window functions are proposed. Thus, the joint usage of digital filter and Hamming window allows to achieve the zero value of the signal magnitude gain factor in high-frequency range and substantially suppress all spectral components above 100 Hz. The increasing of the signal magnitude settling time in this case can be reduced by choosing the most optimal parameters of the all components of the current measuring element.

Keywords: digital filter, discrete Fourier transform, least error squares technique, orthogonal component, Hamming window, digital signal processing, current transformer, saturation, digital relay protection, MatLab, Simulink

For citation: Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 397–417 (in Russian)

Введение

Постоянное совершенствование цифровых устройств релейной защиты (РЗ) позволяет реализовывать все более сложные алгоритмы обработки контролируемых сигналов [1, 2]. При этом увеличивается частота дискретизации входных сигналов, достигая 24–64 выборок на период промышленной частоты, что, однако, не приводит к существенному повышению качества определения амплитуды сигнала цифровыми фильтрами (ЦФ). Это связано с тем, что параметры ЦФ рассчитываются применительно к простейшим входным воздействиям, форма которых существенно отличается от формы реальных аварийных сигналов.

Основные повреждения в энергосистеме – короткие замыкания (КЗ), токи которых не являются периодическими сигналами из-за наличия в них экспоненциально затухающей аperiodической составляющей. В свою очередь, информация о токах повреждения передается к устройствам РЗ через электромагнитные измерительные трансформаторы тока (ТТ), магнитопр-

воды которых входят в насыщение от данной составляющей тока КЗ, в результате чего происходит искажение формы вторичного тока ТТ. Поэтому для проверки работоспособности ЦФ в условиях, приближенных к реальным, в качестве тестового входного воздействия целесообразно использовать вторичный ток ТТ [3].

Целью настоящей работы являлось исследование работоспособности различных типов ЦФ и выбор наиболее приемлемой их реализации. Для этого разработали алгоритмы расчета коэффициентов ЦФ, а в среде MatLab–Simulink [4] создали имитационную модель для возможности получения искаженных форм сигнала вторичного тока ТТ.

Основная часть

В отличие от аналоговых, в цифровых измерительных органах устройств РЗ все операции производятся над цифровыми отсчетами (выборками) контролируемых сигналов. Основными параметрами цифрового сигнала являются число выборок на период промышленной частоты N и период дискретизации (время между двумя соседними выборками) $T = \frac{1}{f_0 N}$, где f_0 – частота основной гармоники, Гц.

Тогда аналоговому сигналу $u(t) = \sin(\omega_0 t)$ соответствует цифровой сигнал $u(nT) = \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$, где $n = 1, 2, \dots, N$ – целое число, соответствующее номеру выборки. Кроме того, цифровой сигнал принято представлять в виде

$$\begin{aligned} u(nT) &= U_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right) = U_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \cos\varphi + U_m \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \sin\varphi = \\ &= U_m^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_m^s \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_m^s = U_m \sin\varphi$, $U_m^c = U_m \cos\varphi$ – амплитуда синусной и косинусной ортогональных составляющих сигнала (1).

Входной сигнал цифровой защиты $y(nT)$ содержит полезный сигнал $u(nT)$ и помеху $e(nT)$

$$y(nT) = u(nT) + e(nT). \quad (2)$$

Назначение ЦФ заключается в выделении полезного сигнала $u(nT)$ (обычно это основная гармоника, реже – высшая, кратная основной) и в максимально возможном подавлении помехи $e(nT)$. В общем случае сигнал помехи содержит: высшие гармоники, кратные основной частоте; затухающие апериодические составляющие; затухающие и незатухающие гармонические составляющие с частотой, отличной от основной [5]. Поэтому точный учет всех составляющих помехи принципиально невозможен,

а следовательно, ЦФ всегда будет выделять полезный сигнал с ошибкой тем большей, чем больше значения выборок входного сигнала $y(nT)$ будут отличаться от полезного сигнала $u(nT)$.

Для выделения полезного сигнала широко используется метод наименьших квадратов (МНК), в котором минимизируется сумма квадратов ошибок в соответствии с выражением

$$S = \sum_{n=1}^N (y(nT) - u(nT))^2 \rightarrow \min.$$

На практике сигнал помехи обычно представляют упрощенным и учитывают в нем только основные составляющие: экспоненциально затухающую апериодическую составляющую и несколько высших гармоник, кратных основной. В зависимости от набора компонент в помехе формируются различные алгоритмы построения ЦФ, такие как: ЦФ на основе МНК [6], на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [7], а также формирователи ортогональных составляющих (ФОС) [8] и др. Рассмотрим более подробно построение перечисленных выше ЦФ.

Метод наименьших квадратов

Идентификация входного сигнала РЗ на основе МНК впервые предложена в [6]. Сигнал представляется состоящим из полезного сигнала основной гармоники и помехи в виде экспоненциально затухающей апериодической составляющей с постоянной времени τ и 3-й гармоники

$$y(nT) = U_a e^{-\frac{nT}{\tau}} + U_{m1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_1\right) + U_{m3} \sin\left(\frac{6\pi n}{N} + \varphi_3\right). \quad (3)$$

Выражение (3) отражает в первом приближении сигнал тока при КЗ в энергосистеме. Состав компонентов в нем объясняется тем, что четные гармоники не содержатся в токе повреждения, а гармоники, начиная с 5-й, существенно ослабляются аналоговым фильтром нижних частот (ФНЧ). Необходимо отметить, что еще на стадии обсуждения данной публикации авторам было указано на некоторую идеализацию модели сигнала, однако сама идея использования МНК в дальнейшем получила широкое распространение.

Экспоненциально затухающий сигнал с постоянной времени τ разлагают в ряд Тейлора

$$e^{-\frac{nT}{\tau}} = 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{n^2 T^2}{2\tau^2} - \frac{n^3 T^3}{6\tau^3} \dots$$

и используют первые три-четыре члена ряда, а гармонические сигналы представляют согласно (1). В результате для любого номера выборки $n = 1, 2, \dots, N$ выражение (3) принимает вид

$$y(nT) = U_a \left(1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{n^2 T^2}{2\tau^2} \right) + U_{m1}^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_{m1}^s \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_{m3}^c \sin\left(\frac{6\pi n}{N}\right) + U_{m3}^s \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right). \quad (4)$$

Обозначив $X_1 = U_a$; $X_2 = -\frac{U_a}{\tau}$; $X_3 = \frac{U_a}{2\tau^2}$; $X_4 = U_{m1}^c$; $X_5 = U_{m1}^s$; $X_6 = U_{m3}^c$; $X_7 = U_{m3}^s$ как неизвестные, можно записать (4) для всех номеров выборок $n = 1, 2, \dots, N$ в матричном виде $\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}$:

$$\begin{bmatrix} y(T) \\ y(2T) \\ y(3T) \\ \dots\dots\dots \\ y(nT) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{6\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{N}\right) \\ 1 & 2T & 4T^2 & \sin\left(\frac{4\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{12\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{12\pi}{N}\right) \\ 1 & 3T & 9T^2 & \sin\left(\frac{8\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{18\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{18\pi}{N}\right) \\ \dots\dots\dots \\ 1 & nT & n^2 T^2 & \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица коэффициентов (главная матрица системы); $\mathbf{X}$ – вектор-столбец неизвестных; $\mathbf{Y}$ – вектор-столбец свободных членов.

Квадратную систему линейных уравнений в матричном виде можно решить, умножив вектор-столбец свободных членов $\mathbf{Y}$ на обратную матрицу $\mathbf{A}^{-1}$

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Y}. \quad (6)$$

На практике число выборок на период основной частоты для современных защит $N = 24, 32, \dots$, т. е. число уравнений N оказывается большим числа неизвестных. Такие системы уравнений называются переопределенными, так как в них матрица коэффициентов $\mathbf{A}$ – прямоугольная с числом строк, большим числа столбцов. Для решения таких систем используют псевдообращенную матрицу $\mathbf{A}^+$ [9]

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T,$$

где $\mathbf{A}^T$ – транспонированная матрица.

Соответственно приближенное решение системы уравнений

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \mathbf{Y}. \quad (7)$$

Получение псевдообращенной матрицы является стандартной процедурой для большинства математических пакетов, например в системе MatLab – это функция `p=pinv(a)` [4]. Для рассматриваемого примера файл-программа на языке программирования MatLab для вычисления псевдообращенной матрицы:

```
f=50;% Промышленная частота, Гц
N=24;% Число выборок за период
T=1/(N*f);% Период дискретизации
k=3;% Номер высшей гармоники
for n=0:N-1;
    a(n+1,1)=1;
    a(n+1,2)=n*T;
    a(n+1,3)=T^2*n^2;
    a(n+1,4)=sin(2*pi*n/N);
    a(n+1,5)=cos(2*pi*n/N);
    a(n+1,6)=sin(2*pi*k*n/N);
    a(n+1,7)=cos(2*pi*k*n/N);
end;
x=pinv(a);% Получение псевдообращенной матрицы
x_cos=x(4,:);% Коэффициенты  $a_{cn}$ 
x_sin=x(5,:);% Коэффициенты  $a_{sn}$ .
```

В результате матрица коэффициентов $\mathbf{A}_{[24 \times 7]}$ размером 24 строки на 7 столбцов преобразуется в матрицу $\mathbf{A}^+_{[7 \times 24]}$, причем 4-я и 5-я строки этой матрицы представляют собой коэффициенты a_{cn} и a_{sn} цифровых фильтров для выделения косинусной и синусной ортогональных составляющих основной гармоники по выражениям:

$$u_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} y(nT);$$

$$u_{sn} = \sum_{n=1}^N a_{sn} y(nT). \quad (8)$$

Амплитуда сигнала основной гармоники для произвольной выборки n определяется как

$$U_{m1n} = \sqrt{u_{sn}^2 + u_{cn}^2}.$$

Дискретное преобразование Фурье

Невозможность точного учета всех аварийных составляющих в сигнале повреждения позволяет предложить минимально возможную по составу элементов модель сигнала, в которой содержится только основная гармоника

$$y(nT) = U_{m1}^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_{m1}^s \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right).$$

В этом случае рассчитанные по аналогии с моделью (4) коэффициенты ЦФ полностью совпадают с коэффициентами при ортогональных составляющих дискретного преобразования Фурье

$$u(nT) = u_c(nT) + ju_s(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right], \quad (9)$$

где k – номер выделяемой гармоники.

Выражение (9) удобно представить в виде

$$u(nT) = \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) A_c(nT) + j \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) A_s(nT), \quad (10)$$

где $A_c(nT)$, $A_s(nT)$ – коэффициент косинусного и синусного фильтров Фурье.

В практике построения алгоритмов функционирования зарубежных микропроцессорных токовых защит широко используются косинусные фильтры (КФ) [1, 10], коэффициенты которых определяются из действительной части (9)

$$A_c(nT) = \frac{2}{N} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right). \quad (11)$$

Наследуя все преимущества ДПФ, косинусный фильтр является практически нечувствительным к аperiodическим составляющим сигнала.

Формирователи ортогональных составляющих

В рассмотренных выше моделях сигналов количество уравнений превышало число неизвестных. Однако если зафиксировать на конечном интервале наблюдения (окно данных) длительностью порядка одного периода промышленной частоты четное число выборок сигнала L , то можно сформировать квадратную матрицу размером $L \times L$ и находить коэффициенты ЦФ по (6) путем определения обратной матрицы $\mathbf{A}^{-1}$. В этом случае модель сигнала строится с учетом того, что экспоненциально затухающая аperiodическая составляющая представляется двумя членами ряда Тейлора, и тогда на основную и высшие гармоники в каждой строке матрицы коэффициентов приходится $M = L - 2$ элемента [8]. Поскольку каждая гармоника

сигнала записывается в виде двух ортогональных составляющих, для четного L максимальная гармоника в сигнале имеет номер $M/2$

$$y(nT) = \sum_{n=0}^{L-1} \left[U_a - U_a \frac{nT}{\tau} + \sum_{k=1}^{M/2} \left(U_{m1}^c \sin\left(\frac{\pi nk}{N}\right) + U_{m1}^s \cos\left(\frac{\pi nk}{N}\right) \right) \right]. \quad (12)$$

Файл-программа для расчета коэффициентов ФОС на языке программирования MatLab с выводом результатов в рабочую область показан ниже. В отличие от вышеприведенной программы для определения обратной матрицы используется оператор $x = \text{inv}(a)[4]$.

```
L=24;% Число выборок – четное
T=0.02/24;% Время между двумя соседними выборками
N=0.02/T;% Число выборок за период основной частоты
50 Гц
for n=0:L-1;% Формирование матрицы коэффициентов
a(n+1,1)=1;% Апериодическая
a(n+1,L)=n*T;% составляющая
for k=2:2:L-2;
a(n+1,k)=sin(pi*n*k/N);% Гармоники от 1-й
a(n+1,k+1)=cos(pi*n*k/N);% до (L-2)/2
end;
end;
x=inv(a);% Вычисление обратной матрицы
x_cos=x(2,:);% Вывод коэффициентов фильтра
x_sin=x(3,:);% В рабочую область MATLAB.
```

Особенностью расчета коэффициентов ФОС является то, что число выборок за период основной частоты N может быть как целым (если $NT = 0,02$ с), так и действительным (если $NT \neq 0,02$ с). Такая возможность выбора времени T между соседними отсчетами сигнала позволяет варьировать коэффициенты ЦФ для получения наиболее оптимальной амплитудно-частотной (АЧХ) и переходной характеристик [11]. В фильтрах, основанных на ДПФ, число выборок L всегда равно числу выборок за период основной частоты N и принимается целым и четным из ряда 16, 20, 24 и т. д.

Если не учитывать экспоненциально затухающую аperiодическую составляющую в сигнале, т. е. положить в вышеприведенной программе члены $a(n+1,1)=0$ и $a(n+1,L)=0$, то полученные коэффициенты ФОС x_cos и x_sin будут совпадать с коэффициентами синусного и косинусного фильтров ДПФ.

Совершенствование элементной базы микропроцессорных устройств РЗ позволяет учитывать в модели сигнала все большее число высших гармоник, даже тех, влияние которых существенно ослабляется аналоговым ФНЧ. Все это отрицательно сказывается на точности вычисления коэффициентов ЦФ и, в конечном счете, на качестве фильтрации. Поэтому целе-

сообразно включать в модель сигнала гармоники не выше 7–8-й, а остальные принимать равными нулю.

Тестовые воздействия

Основные критерии, по которым оценивается качество фильтрации, – время установления истинного значения выходного сигнала ЦФ и его максимальная колебательность. Все рассмотренные выше ЦФ представлялись парой ортогональных составляющих. Из каждой пары выбирали один фильтр с наилучшими показателями качества фильтрации основной гармоники (со значениями коэффициентов для $N = 24$), приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты цифровых фильтров
Digital filters coefficients

№ выборки	КФ	ФОС	МНК	Окно Хэмминга
1	0,0833	0,0000	–0,1407	0,0800
2	0,0805	0,1638	–0,0690	0,0971
3	0,0722	–0,0112	–0,0129	0,1470
4	0,0589	0,1423	0,0146	0,2260
5	0,0417	–0,0417	0,0200	0,3284
6	0,0216	0,1049	0,0229	0,4464
7	0,0000	–0,0833	0,0420	0,5714
8	–0,0216	0,0618	0,0823	0,6940
9	–0,0417	–0,1250	0,1301	0,8053
10	–0,0589	0,0244	0,1603	0,8968
11	–0,0722	–0,1555	0,1511	0,9619
12	–0,0805	0,0028	0,0969	0,9957
13	–0,0833	–0,1667	0,0127	0,9957
14	–0,0805	0,0028	–0,0727	0,9619
15	–0,0722	–0,1555	–0,1315	0,8968
16	–0,0589	0,0244	–0,1505	0,8053
17	–0,0417	–0,1250	–0,1363	0,6940
18	–0,0216	0,0618	–0,1085	0,5714
19	0,0000	–0,0833	–0,0859	0,4464
20	0,0216	0,1049	–0,0733	0,3284
21	0,0417	–0,0417	–0,0571	0,2260
22	0,0589	0,1423	–0,0123	0,1470
23	0,0722	–0,0112	0,0830	0,0971
24	0,0805	0,1638	0,2346	0,0800

Вторую ортогональную составляющую определяли путем явного или вычисляемого сдвига выходного сигнала ЦФ на угол $\pi/2$. Явный сдвиг реализуется путем задержки сигнала основной гармоники на $N/4$ отсчетов (N – четное число) и всегда приводит к увеличению времени установления выходного сигнала ЦФ.

Для вычисления второй ортогональной составляющей гармонического сигнала по известной первой можно использовать две выборки – текущую u_n и предыдущую u_{n-1} , зафиксированные через период дискретизации T [8]. Тогда амплитуда сигнала определяется по выражению

$$U_{mkn} = \frac{\sqrt{u_n^2 + u_{n-1}^2 - 2u_n u_{n-1} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}}{\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}, \quad (13)$$

где k – номер выделяемой гармоники.

К достоинствам использования (13) следует отнести минимальную задержку в один период дискретизации T при определении амплитуды полезного сигнала, а также принципиальную невозможность обращения знаменателя в нуль. Однако при отклонении частоты контролируемого сигнала от номинальной определение его амплитуды при помощи ЦФ сопровождается погрешностями. Результат определения амплитуды синусоидального сигнала $u(t) = \sin(2\pi ft)$ с частотой $f = 48$ Гц приведен на рис. 1. Амплитуда сигнала изменяется во времени с колебаниями двойной частоты и наибольшей погрешностью, не превышающей величины

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

Если по условиям функционирования ЦФ такие колебания амплитуды являются недопустимыми, то можно использовать большее число выборок сигнала, но при этом усложняется расчетное выражение и увеличивается время определения амплитуды. Поэтому в дальнейшем (13) будет применяться для всех фильтров, а сами ЦФ станут именоваться по названию алгоритма их реализации – соответственно МНК, КФ и ФОС.

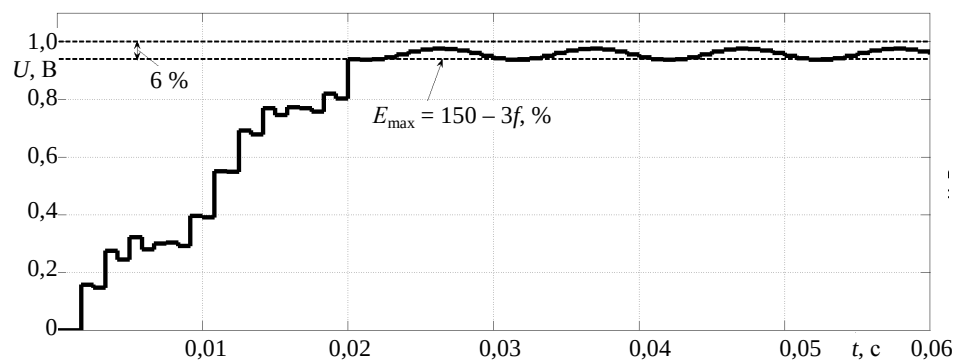


Рис. 1. Определение амплитуды синусоидального сигнала частотой 48 Гц цифровым фильтром, настроенным на частоту 50 Гц

Fig. 1. 48 Hz sine signal magnitude estimation by digital filter tuned to 50 Hz

Распространенным тестовым воздействием на ЦФ является сигнал основной гармоники, наложенный на затухающую экспоненту. Такой сигнал

в первом приближении имитирует простейший переходный процесс в энергосистеме.

На рис. 2 приведена реакция трех фильтров (МНК, КФ и ФОС) на воздействие вида

$$y(nT) = e^{-\frac{nT}{\tau}} + \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad (14)$$

где $N = 24$; $\tau = 0,05$ с; $T = 0,02/N$.

По истечении переходного процесса, который длится один период промышленной частоты, все фильтры правильно определяют амплитуду основной гармоники.

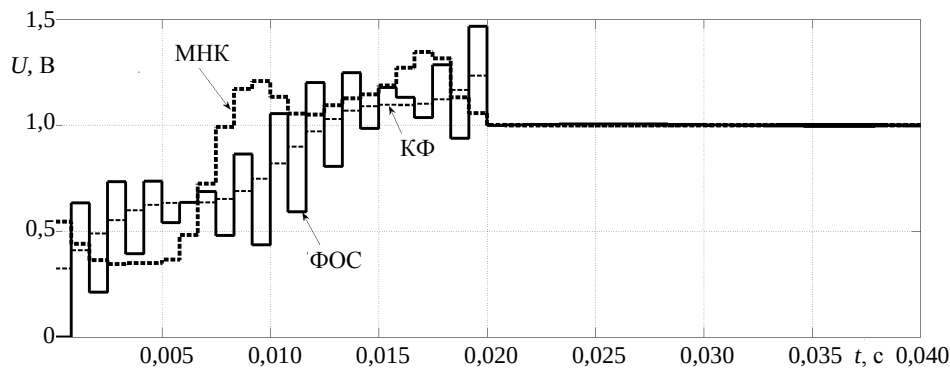


Рис. 2. Определение амплитуды основной гармоники сигнала цифровыми фильтрами:
МНК – метод наименьших квадратов; КФ – косинусный фильтр;
ФОС – формирователь ортогональных составляющих

Fig. 2. Signal fundamental component magnitude estimation by digital filter:
МНК – least error squares; КФ – cosine filter; ФОС – orthogonal components former

В действительности информация о параметрах функционирования энергосистемы передается в устройства релейной защиты через измерительные трансформаторы тока. Поэтому проверку работоспособности ЦФ целесообразно проводить сигналом, приближенным по своей форме к вторичному току ТТ, который можно получить, используя методы математического моделирования.

С использованием блоков системы Simulink–SimPowerSystems [4] разработана модель фрагмента электрической сети и основных элементов измерительного органа тока цифровой защиты [12], представленная на рис. 3.

Приведем описание структурных элементов модели на рис. 3.

1. *Трехфазная группа трансформаторов тока (ТТ)*. Математическая модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в «звезду с нулевым проводом» содержит уравнения трех однофазных ТТ [13]. После выражения неизвестных геометрических параметров магнитной системы ТТ через его паспортные данные и принятую характеристику намагничивания [14] система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, в общем случае примет следующий вид (для ТТ с $I_{2ном} = 5$ А, обмотка класса 10Р) [15, 16]:

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

где $I_{1\text{НОМ}}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{\text{НОМ}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{\text{НОМ}}$ – номинальное активное сопротивление вторичной нагрузки ТТ; R_H – действительное активное сопротивление вторичной нагрузки ТТ; R_0 – активное сопротивление нулевого провода; i_0 – мгновенное значение тока, протекающего в нулевом проводе ТТ; $B_m = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; i_1, i_2 – мгновенное значение первичного и вторичного токов ТТ соответственно.

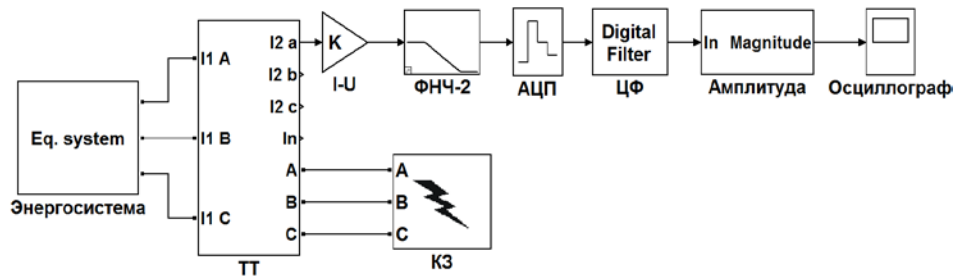


Рис. 3. Структура модели
Fig. 3. Simulation model structure

2. **Энергосистема**, в которой задаются: номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}}$, ток трехфазного КЗ $I_{\text{КЗ}}$ и эквивалентная постоянная времени энергосистемы τ (по умолчанию $\tau = 0,05$ с).

3. **Блок задания КЗ (КЗ)** используется для моделирования времени наступления и вида КЗ. Во всех расчетах рассматривается трехфазное КЗ.

4. **Входной преобразователь ($I \rightarrow U$)**, который обеспечивает преобразование входного вторичного тока ТТ в пропорциональное напряжение заданного уровня.

5. **Антиализинговый ФНЧ второго порядка (ФНЧ-2)**. В соответствии с теоремой Котельникова – Шеннона сигнал, подаваемый на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), должен предварительно проходить через ФНЧ для подавления спектральных компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Таким образом, для основной гармоники ($f = 50$ Гц) граничная частота $f_g = 25N$ должна быть подавлена как минимум на порядок, т. е. коэффициент передачи на этой частоте должен быть $K < 0,1$. Данное условие позволяет из выражения для АЧХ звена второго порядка выбрать частоту среза f_c (Гц) ФНЧ: $f_c = f_g \sqrt{K} = 25N \sqrt{K}$. Длительность переходного процесса для этого звена составляет $t_n \approx 3T/\zeta$.

При аппроксимации частотной характеристики фильтра по Баттерворту постоянная времени принимает значение $T = \frac{1}{2\pi f_c}$, а параметр затухания $\zeta = 0,5\sqrt{2}$. Если принять коэффициент передачи на граничной частоте $K = 0,09$, то длительность установления амплитуды сигнала можно приблизительно оценить как $t_n \approx 5/N$ периодов основной частоты. При этом коэффициент передачи на частоте 50 Гц равен единице, т. е. основная гармоника сигнала не ослабляется фильтром.

6. **АЦП** с квантованием по времени $T = 0,02/N$, равным периоду дискретизации сигнала.

7. **ЦФ**, в котором осуществляется определение основной гармоники сигнала. Параметры блока – предварительно рассчитанные коэффициенты фильтров, например из табл. 1.

8. **Блок определения амплитуды (Амплитуда)** основной гармоники, реализованный в соответствии с (13).

Параметры элементов модели

Для получения входных сигналов ЦФ использовали модель ТТ с номинальным первичным $I_{1\text{ном}} = 300$ А и вторичным $I_{2\text{ном}} = 5$ А токами, номинальной предельной кратностью $K_{\text{ном}} = 20$, действительное активное сопротивление нагрузки R_n принимали меньше номинального активного сопротивления вторичной нагрузки ТТ $R_{\text{ном}}$. Ток трехфазного КЗ при эквивалентной постоянной времени энергосистемы $\tau = 0,05$ с принимали $I_{\text{кз}} = 5000$ А, т. е. заведомо меньше максимально допустимого тока по условиям работы данного ТТ в заданном классе точности, определяемом $K_{\text{ном}}$.

Зависимости функции времени вторичного тока ТТ (сплошная линия) и приведенного к вторичной стороне первичного тока (штриховая линия) представлены на рис. 4.

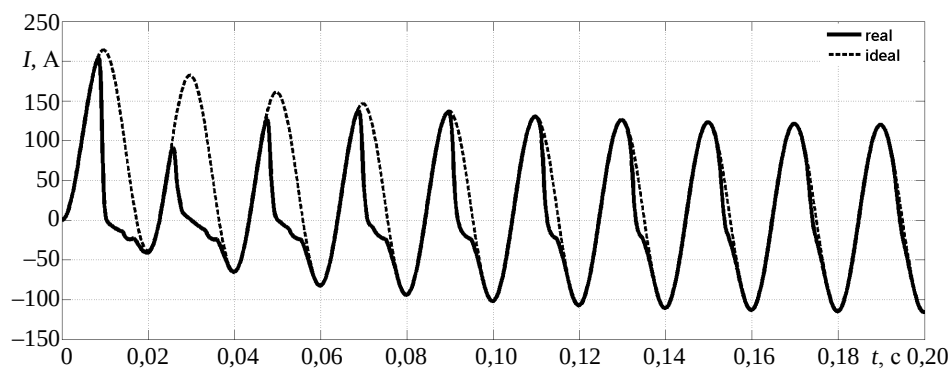


Рис. 4. Вторичный ток трансформатора тока (сплошная линия) и приведенный к вторичной стороне первичный ток (пунктирная линия)

Fig. 4. Current transformer secondary current waveform (solid line) and scaled primary current (dashed line)

Наличие экспоненциально затухающей аperiodической составляющей во входном сигнале тока, даже при допустимых кратностях первичного тока ТТ, приводит к насыщению его магнитопровода и искажению формы вторичного тока. Гармонический состав токов на входе и выходе ТТ за пять периодов промышленной частоты представлен на рис. 5.

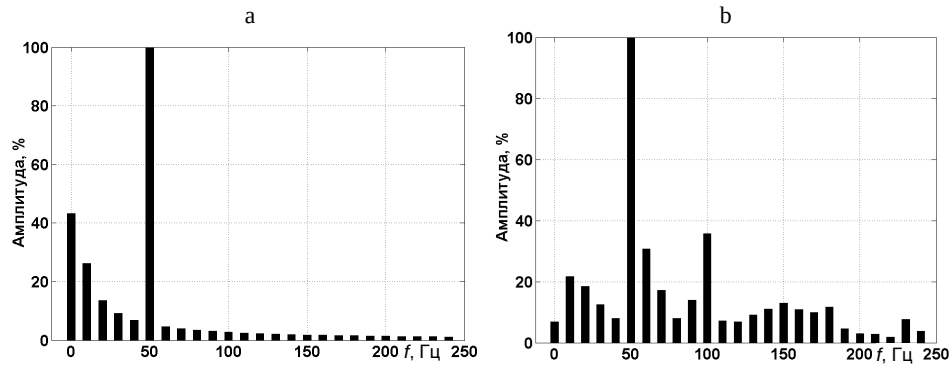


Рис. 5. Спектры сигнала на входе (а) и выходе (б) трансформатора тока

Fig. 5. Harmonic content of the current transformer input (a) and output (b) signal

Спектр экспоненциального сигнала вида $y(t) = U_a e^{-\frac{t}{\tau}}$ находится с помощью одностороннего преобразования Фурье [17]

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} U_a e^{-\frac{t}{\tau}} e^{j\omega t} dt = \frac{U_a}{\frac{1}{\tau} + j\omega},$$

где ω – угловая частота.

Модуль этой функции дает спектр амплитуд (спектральную плотность) сигнала

$$A(\omega) = \frac{U_a \tau}{\sqrt{\omega^2 \tau^2 + 1}}.$$

Амплитудный спектр имеет вид убывающей функции, которая содержит непрерывный спектр частот $\omega = 0 \dots \infty$. Приведенный на рис. 5 дискретный спектр сигнала с шагом 10 Гц объясняется тем, что гармонический анализ проводился за время в пять периодов промышленной частоты, за которое из сигнала можно выделить минимальную частоту $f_{\min} = 1/(5 \cdot 0,02) = 10$ Гц. При этом большая часть энергии сигнала, несущей информацию о переходном процессе, сосредоточена в частотном диапазоне вблизи нулевой частоты, т. е. ЦФ должен как минимум подавлять экспоненциально затухающую аperiodическую составляющую. Признаком правильности расчета коэффициентов ЦФ является равенство нулю их суммы (табл. 1)

$$\sum_{n=1}^N a_n = 0.$$

По-иному экспоненциально затухающая апериодическая составляющая влияет на вторичный ток ТТ. Вследствие насыщения стали магнитопровода ТТ, уровни некоторых спектральных составляющих вторичного тока в разы превышают уровни соответствующих составляющих первичного тока. В конечном счете это приводит к тому, что форма кривой вторичного тока существенно отличается от синусоидальной. Причем в первые несколько периодов сигнал настолько искажен, что величина амплитуды вторичного тока (рис. 4) становится значительно меньше приведенного к вторичной стороне первичного тока, что недопустимо затягивает время установления выходного сигнала. Характерной особенностью искаженного вторичного тока является наличие в нем интергармоник (гармоник, не кратных основной), которые не учитываются ни в одной из рассмотренных моделей сигналов.

Изменение во времени амплитуды основной гармоники (50 Гц) и двух составляющих входного сигнала с наибольшими амплитудными спектрами из рис. 5b (2-й гармоники с частотой 100 Гц и интергармоники с частотой 60 Гц) показано на рис. 6. По мере затухания апериодической составляющей, которое длится $t \approx 3\tau$ с, сигнал основной гармоники стремится к установившемуся значению, равному амплитуде входного сигнала, а сигналы с частотами 60 и 100 Гц уменьшаются до нуля.

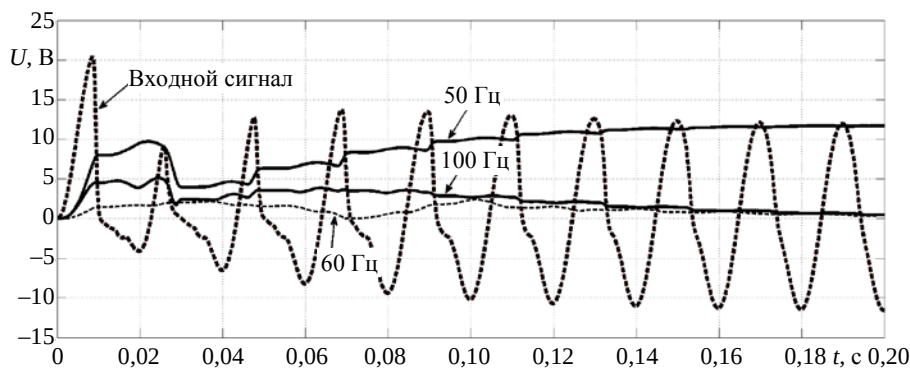


Рис. 6. Определение цифровыми фильтрами амплитуд гармонических компонентов искаженного сигнала

Fig. 6. Distorted signal harmonic components magnitude estimation by digital filter

Однако влияние этих сигналов на конечный результат фильтрации будет различным. Если допустить, что сигналы проходят через ЦФ отдельно, то 2-я гармоника полностью подавляется фильтром, а интергармоника, хотя и ослабленная, будет участвовать в формировании выходного сигнала.

Необходимо отметить, что путем математического и физического моделирования одиночных электромагнитных ТТ установлено, что их преоб-

разовательные свойства в линейных режимах работы достаточно точно отображаются передаточной функцией полосового частотного фильтра [17]. Поэтому спектр вторичного тока ТТ вблизи нулевой частоты ослабляется самим ТТ (рис. 5b), что при прочих равных условиях облегчает работу ЦФ.

Таким образом, ТТ обеспечивает передачу неискаженного вторичного тока к цепям РЗ только в случае гармонического характера тока повреждения, величина которого $I_{кз} \leq K_{ном} I_1$, и при величине вторичной нагрузки, равной или менее номинальной. Поэтому ЦФ должен не столько отстраиваться от экспоненциально затухающей апериодической составляющей тока повреждения, сколько адекватно функционировать при искаженном вторичном токе ТТ.

Переходный процесс в рассматриваемых фильтрах МНК, КФ и ФОС при определении амплитуды основной гармоники сигнала, пропорционального вторичному току ТТ, при исключении из структуры модели (рис. 3) ФНЧ-2 представлен на рис. 7а. ЦФ на основе МНК демонстрирует наихудшие показатели качества и не может быть рекомендован к использованию в цифровых устройствах РЗ. Повышенные биения выходного сигнала ФОС существенно ослабляются, если сигнал предварительно проходит через аналоговый ФНЧ-2 (рис. 7b). Наиболее достоверно амплитуда основной гармоники вторичного тока ТТ определяется КФ.

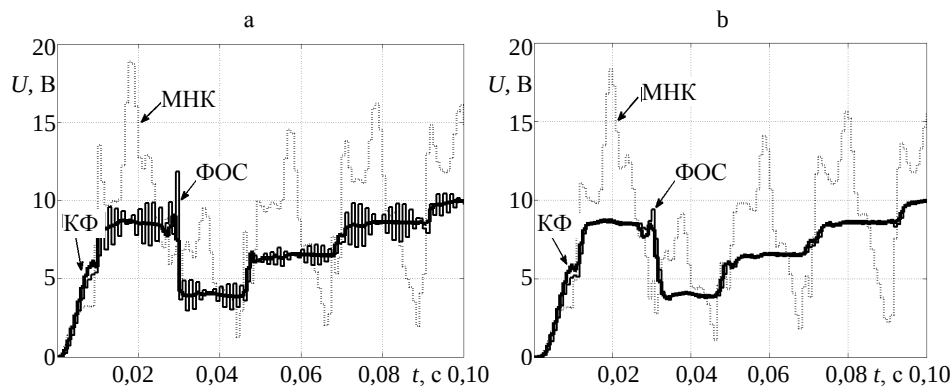


Рис. 7. Переходный процесс в цифровом фильтре без (а) и с использованием фильтра нижних частот (б)

Fig. 7. Transient response of digital filter without (a) and with low-pass filter (b)

В модели сигналов, использующихся для расчета коэффициентов МНК и ФОС, входит экспоненциально затухающая апериодическая составляющая, которая учитывается несколькими членами ряда Тейлора. В результате проведенных расчетов установлено, что чем больше членов ряда учитывается в модели сигнала, тем хуже качество фильтрации. Так, в МНК учитываются три члена ряда Тейлора, в ФОС – два, а в КФ – апериодическая составляющая отсутствует. Это объясняется тем, что в псевдообращенной или обратной матрице члены в строках, соответствующих коэффициентам

вида $\frac{nT}{\tau}$ и $\frac{n^2T^2}{2\tau^2}$, получаются на несколько порядков больше коэффициентов ЦФ, что вносит погрешность в их расчет. Причем это свойство не проявляется на идеализированных сигналах вида (14), но оказывает существенное влияние на результаты фильтрации при наличии в сигналах интергармоник.

Существенно повысить качество фильтрации искаженных сигналов помогают оконные функции. Любой ЦФ основной гармоники имеет АЧХ, подобную изображенной на рис. 8а, АЧХ ФОС. Такая АЧХ содержит главный лепесток, в центре которого располагаются выделяемая частота (50 Гц), и боковые лепестки, обращающиеся в нуль только на частотах, кратных основной. При этом интергармоники, которые располагаются между подавляемыми частотами, будут значительно усиливаться. Обработка сигнала с помощью оконных функций заключается в уменьшении (в пределах до 0) амплитуд всех боковых лепестков.

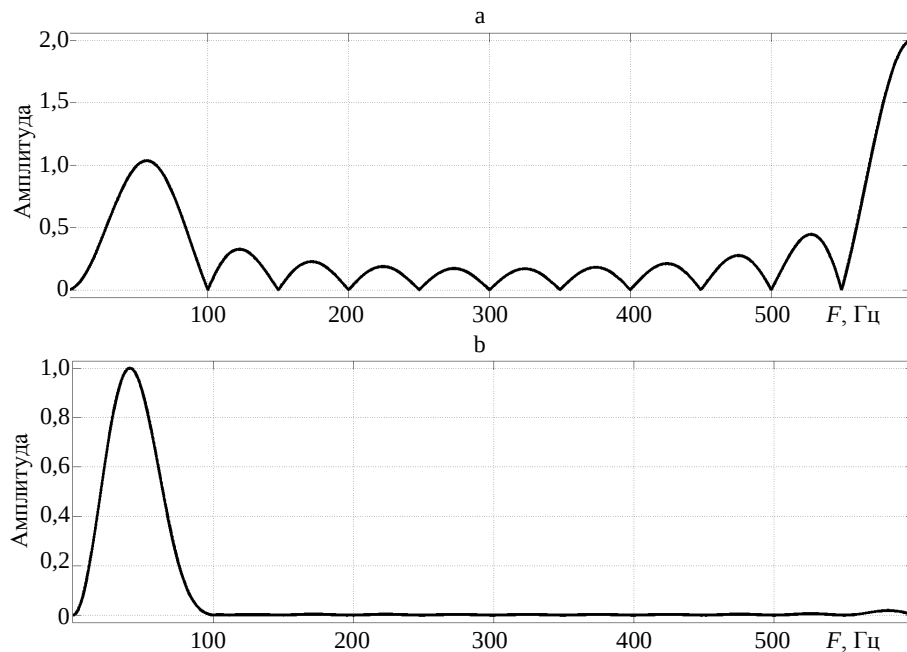


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики: а – формирователя ортогональных составляющих; б – то же совместно с окном Хэмминга

Fig. 8. Frequency response: а – orthogonal components former; б – orthogonal components former with Hamming window

Для этих целей широко используются косинусные окна, представляющие собой сумму нескольких гармонических составляющих, периоды которых укладываются на длине окна целое число раз [18]. Наиболее простым и эффективным является окно Хэмминга, коэффициенты которого вычисляются как:

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right).$$

Окно Хэмминга представляет собой ЦФ, включающийся последовательно с основным ЦФ измерительного органа тока представленной на рис. 3 модели. Поэтому контролируемый сигнал претерпевает двойную фильтрацию – оконной функцией и основным ЦФ. Математически такая операция называется дискретной линейной сверткой $s(n)$ двух векторов дискретных сигналов: коэффициентов ЦФ $a(n)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) и коэффициентов окна Хэмминга $w(n)$ ($n = 0, 1, \dots, M-1$), причем в общем случае $N \neq M$. Для вычисления линейной свертки сигналы $a(n)$ и $w(n)$ сдвигают друг относительно друга, почленно перемножают и складывают

$$s(n) = \sum_{m=0}^n a(n)w(n-m), \quad n = 0, 1, \dots, (N+M-2).$$

В MatLab дискретная свертка вычисляется с помощью функции `conv`, для чего предварительно формируются два вектора коэффициентов. Например, для 24 коэффициентов ФОС и окна Хэмминга (табл. 1) она выглядит так:

```
a=[0.0 0.1638 ... 0.1638]% 24 коэффициента ФОС
w=[0.08 0.0971 ... 0.08]% 24 коэффициента окна Хэмминга
s=conv(a,w).
```

Длина выходного вектора S на единицу меньше суммы элементов обоих векторов, т. е. в приведенном примере 47 коэффициентов. В результате все боковые лепестки оказываются подавленными и АЧХ ФОС совместно с оконным преобразованием принимает вид, как на рис. 8b. Рис. 9 позволяет оценить эффект от оконного преобразования: форма выходного сигнала комбинированного фильтра (ФОС совместно с окном Хэмминга) оказывается более гладкой (кривая 2), но время его установления существенно дольше, чем у ФОС (кривая 1).

Поэтому если для целей РЗ допустимо иметь время обработки контролируемого сигнала более одного периода промышленной частоты, то применение оконных функций оказывается эффективным. Кроме того, если использовать меньшее число коэффициентов оконной функции по сравнению с числом выборок, т. е. принять $M < N$, то быстродействие комбинированного фильтра увеличится. На рис. 9 этому случаю соответствует кривая 3, для которой используются 24 коэффициента ФОС и восемь коэффициентов окна Хэмминга.

В общем случае на динамику измерительного органа тока оказывают влияние три фильтра: ФНЧ-2, выбранный цифровой фильтр и оконная функция. Причем если время установления сигнала в любом из выбранных ЦФ фиксировано и примерно равняется одному периоду промышленной частоты, то длительность переходных процессов в аналоговом фильтре и

окне Хэмминга напрямую связана с качеством фильтрации: чем дольше преобразование, тем лучше фильтрация. Поэтому, варьируя частоту среза ФНЧ и размер оконной функции, можно добиться оптимальных динамических характеристик измерительного органа тока цифровой защиты.

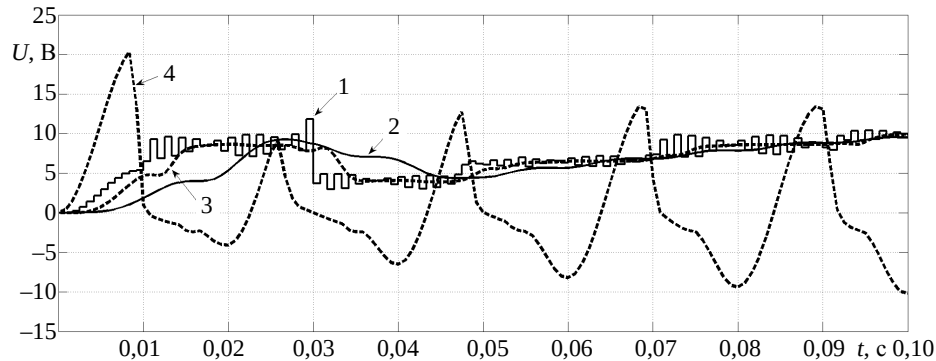


Рис. 9. Определение цифровыми фильтрами амплитуды основной гармоники искаженного сигнала: 1 – формирователь ортогональных составляющих без аналоговой фильтрации; 2 – дискретная свертка формирователя ортогональных составляющих и окна Хэмминга длиной в 24 отсчета; 3 – то же длиной в 8 отсчетов; 4 – искаженный аварийный сигнал, пропорциональный вторичному току трансформатора тока

Fig. 9. Distorted signal fundamental component magnitude estimation by digital filters: 1 – orthogonal components former without analog pre-filtering; 2 – discrete linear convolution of orthogonal components former and Hamming window (24 samples); 3 – discrete linear convolution of orthogonal components former and Hamming window (8 samples); 4 – fault signal which is proportional to the current transformer distorted secondary current

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы расчета коэффициентов цифровых фильтров для микропроцессорных устройств релейной защиты.
2. В среде имитационного динамического моделирования MatLab–Simulink разработана структура модели энергосистемы и измерительного органа тока для проверки работоспособности цифровых защит.
3. Установлено, что из рассмотренных цифровых фильтров наилучшие показатели качества в условиях воздействий, приближенных к реальным, демонстрируют косинусный фильтр и фильтр на основе формирователей ортогональных составляющих. Для минимизации времени установления выходного сигнала рекомендуется вычислять его амплитуду по двум выборкам в соответствии с выражением (13).
4. Рассмотрены пути улучшения качества фильтрации сигнала, в частности использование оконных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rebizant, W. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski // Springer. London, 2011. 316 с.

2. Phadke, A. G. *Computer Relaying for Power Systems* / A. G. Phadke, J. S. Thorp. 2 edition. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2009. 325 p.
3. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу токовых защит / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 1. С. 5–9.
4. Дьяконов, В. П. *MatLab и Simulink для радиоинженеров* / В. П. Дьяконов. М.: ДМК-Пресс, 2011. 975 с.
5. Шнейерсон, Э. М. *Цифровая релейная защита* / Э. М. Шнейерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
6. Sachdev, M. S. A New Algorithm for Digital Impedance Relays / M. S. Sachdev, M. A. Baribeau // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1979. No 6. P. 2232–2240.
7. Phadke, A. G. Synchronized Phasor Measurements and their Applications / A. G. Phadke, J. S. Thorp // Springer Science & Business Media. 2008. 248 p.
8. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
9. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон: пер. с англ. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 232 с.
10. Schweitzer III, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer III, D. Hou // WESCANEX 93. "Communications, Computers and Power in the Modern Environment". Conference Proceedings. IEEE, 1993. P. 15–23.
11. Романюк, Ф. А. Аналого-цифровая частотная фильтрация входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1994. № 3–4. С. 7–12.
12. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2015. Т. 1. С. 115–139.
13. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. Минск: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. 174 с.
14. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. М.: Энергия, 1980. 210 с.
15. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 5. С. 23–38.
16. Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink / F. Romanyuk [et al.] // *Przegląd Electrotechniczny*. 2015. Vol. 91, No 11. P. 292–295.
17. Ванин, В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В. К. Ванин, Г. М. Павлов. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
18. Сергиенко, А. Б. *Цифровая обработка сигналов* / А. Б. Сергиенко. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.

Поступила 31.05.2016 Подписана в печать 10.08.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Rebizant W., Szafran J., Wiszniewski A. (2011) *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. London, Springer. 316.
2. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. 2 edition. Chichester, England, John Wiley & Sons. 325 p.
3. Romaniouk F. A., Tishechkin A. A., Roumiantsev V. Yu., Novash I. V., Bobko N. N., Glinsky E. V. (2010) Influence of Current Transformer Saturation on Operation of Current Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (1), 5–9 (in Russian).

4. Dyakonov V. P. (2011) *MatLab and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK-Press. 975 (in Russian).
5. Sheyerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
6. Sachdev M. S., Baribeau M. A. (1979) A New Algorithm for Digital Impedance Relays. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6), 2232–2240. DOI: 10.1109/TPAS.1979.319422.
7. Phadke A. G., Thorp J. S. (2008) *Synchronized Phasor Measurements and their Applications*. Springer Science & Business Media. 248.
8. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor-Based Protection of Electrical Installations*. Minsk, Tekhnoprint. 133 (in Russian).
9. Lawson Ch., Henson R. (1986) *Numerical Solution of Problems of the Method of Least Squares*. Moscow, Nauka. 232 (in Russian).
10. Schweitzer III E. O., Hou D. (1993) Filtering for Protective Relays. *WESCANEX 93. "Communications, Computers and Power in the Modern Environment". Conference Proceedings. IEEE*, 15–23. DOI: 10.1109/WESCAN.1993.270548.
11. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu. (1994) Analog-to-Digital Frequency Filtering of the Input Signals of Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (3–4), 7–12 (in Russian).
12. Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu.V. (2015) Promising Implementation Technologies of Microprocessor-Based Protections of the Lines of Distribution Grids. V. V. Klubovich *Prospective Materials and Technology. Vol. 1*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 115–139 (in Russian).
13. Romanyuk F. A., Novash V. I. (1998) *Information Support of Computing Experiment in Relay Protection and Automation of Power Systems*. Minsk, VUZ-YUNITI. 174 (in Russian).
14. Korolyev Ye. P., Liberzon E. M. (1980) *Calculations of Permissible Loads in the Current Circuits of Relay Protection*. Moscow, Energiya. 210 (in Russian).
15. Novash I. V., Rumiantsev Y. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], (5), 23–38 (in Russian).
16. Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P. (2015). Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab–Simulink. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (11), 292–295. DOI: 10.15199/48.2015.11.67.
17. Vanin V. K., Pavlov G. M. (1991) *Relay Protection on the Elements of Computers*. Leningrad, Energoatomizdat. 336 (in Russian).
18. Sergiyenko A. B. (2011) *Digital Signal Processing*. St.-Petersburg, BHV-Petersburg. 768 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-418-426

УДК 621.314

Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока

Я. В. Щербак¹⁾, Ю. А. Семененко¹⁾

¹⁾Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Приведены результаты исследований комбинированного активного фильтра последовательного типа с непрерывной системой управления для тяговых подстанций постоянного тока. В рассматриваемой структуре пассивный апериодический LC -фильтр работает совместно с активным, принцип действия которого основан на формировании по каналу обратной связи системы автоматического регулирования напряжения компенсации переменной составляющей выходного напряжения подстанции. Предложена структура системы управления комбинированного активного фильтра последовательного типа, особенностью которой является использование двух параллельно работающих цепей обратной связи. Первая формирует сигнал для компенсации переменной составляющей в широком диапазоне частот. Вторая построена с применением селективных звеньев, которые настроены на низкочастотные, в том числе неканонические, гармоники напряжения с большими амплитудами. В результате аналитических исследований получено выражение передаточной функции системы управления активного фильтра последовательного типа с селективным звеном. Построенные логарифмические амплитудно-частотные характеристики комбинированного активного фильтра без селективного звена и с ним наглядно показали более высокую эффективность подавления неканонических гармоник во втором случае. Для подтверждения достоверности результатов аналитических исследований системы управления активного фильтра разработана его имитационная модель в среде MatLab. Проведенный анализ комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями показал, что его применение целесообразно на тяговой подстанции для улучшения качества питающей электрической подвижной состав энергии постоянного тока, при этом также достигается необходимый уровень электромагнитной совместимости тяговой сети с системами железнодорожной автоматики и связи.

Ключевые слова: система управления, передаточная функция, система автоматического регулирования, пассивный фильтр, электромагнитная совместимость

Для цитирования: Щербак, Я. В. Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока / Я. В. Щербак, Ю. А. Семененко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 418–426

Адрес для переписки

Щербак Я. В.
Украинский государственный университет
железнодорожного транспорта
пл. Фейербаха, 7,
61050, г. Харьков, Украина
Тел.: +380 57 730-19-21
slider2012@i.ua

Address for correspondence

Shcherbak Ya. V.
Ukrainian State University
of Railway Transport
7 Feyierbaha area,
61050, Kharkov, Ukraine
Tel.: +380 57 730-19-21
slider2012@i.ua

Analysis of the Functioning of a Combined Active Filter of a Sequential Type with Selective Links for Direct Current Traction Substation

Ya. V. Shcherbak¹⁾, Yu. A. Semenenko¹⁾

¹⁾Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkov, Ukraine)

Abstract. The results of the studies of the combined active filter of a sequential type with a continuous control system for direct current traction substation traction are presented. In the structure under consideration the aperiodic passive *LC*-filter operates in conjunction with the active one, the operation principle of the latter is being based on the formation of the channel feedback system of automatic voltage regulation of compensation of the variable component of the output voltage of the substation. The structure of a control system of a combined active filter of the series type has been proposed, which specific feature is the use of two parallel running circuits of feedback. The first one generates a signal for compensation of the variable component in a wide range of frequencies. The second one is built with the use of selective links that are configured to low frequency, including the non-canonical harmonic voltage with large amplitude. As a result of analytical studies the expression of the transfer function of the control system of the active filter of the series type with selective link has been obtained. The logarithmic amplitude-frequency characteristics of the combined active filter with and without selective link that had been determined clearly demonstrated the higher efficiency of suppression of the non-canonical harmonics in the second case. In order to confirm the reliability of the analytical results of the control system of the active filter a simulation model in MatLab has been developed. The analysis of the combined active filter of the series type with selective links demonstrated that its use is expedient for quality improvement of the supply the electric rolling stock with direct current energy, also achieving the desired level of electromagnetic compatibility of traction network with systems of railway automatics and communications.

Keywords: control system, transfer function, automatic control system, passive filter, electromagnetic compatibility

For citation: Shcherbak Ya. V., Semenenko Yu. A. (2016) Analysis of the Functioning of a Combined Active Filter of a Sequential Type with Selective Links for Direct Current Traction Substation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 418–426 (in Russian)

Введение

Для надежного функционирования средств железнодорожной связи и систем автоматики, где все шире используются микропроцессорные устройства, требуется существенно снижать негативное влияние тягового тока на рельсовые цепи, воздушные линии и другие средства указанных систем. Причиной таких влияний выступают гармоники переменной составляющей напряжения и тока тяговой сети, источником которых являются выпрямительные установки тяговых подстанций, а также подвижной состав с импульсным потреблением электрической энергии [1, 2].

В системах электроснабжения электрического транспорта постоянного тока на подстанциях в качестве сглаживающих устройств традиционно применяют детерминированные режекторные цепочки пассивных фильтров [2, 3], которые собираются из дорогостоящих реакторов силовых конденсаторов и дросселей большой массы и габаритных размеров. К тому же они не обеспечивают достаточно эффективного подавления гармоник. Сегодня возникает потребность в применении более эффективных методов

решения проблемы подавления мешающих гармоник выпрямленного напряжения в широком диапазоне частот, в первую очередь это относится к неканоническим гармоникам (субгармоникам). Использование комбинированных активных методов фильтрации, которые реализуются применением соединенных по определенной схеме пассивного и активного фильтров [4–10], позволяет подавлять до необходимого уровня переменную составляющую выходного напряжения тяговой подстанции постоянного тока во всем диапазоне частот.

Основная часть

Выходное напряжение m -пульсного преобразователя характеризуется широким спектром гармоник с частотами, которые определяются в общем виде по формуле

$$f_q = f_c m q, \quad (1)$$

где f_c – частота напряжения сети, питающей выпрямитель; m – эквивалентная пульсность схемы выпрямления; $q = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер гармонической составляющей.

Кроме указанных гармоник, переменная составляющая выходного напряжения выпрямителя содержит еще и так называемые неканонические гармоники, амплитуда которых зависит от несимметрии напряжения питающей сети, а также собственной несимметрии трансформатора и выпрямительной установки. Частоты неканонических гармоник кратны частоте питающей сети и равны 50, 100, 150, 200 Гц и т. д. [4–6].

Для анализа работы комбинированного активного фильтра (АФ) последовательного типа рассмотрим его схему, приведенную на рис. 1.

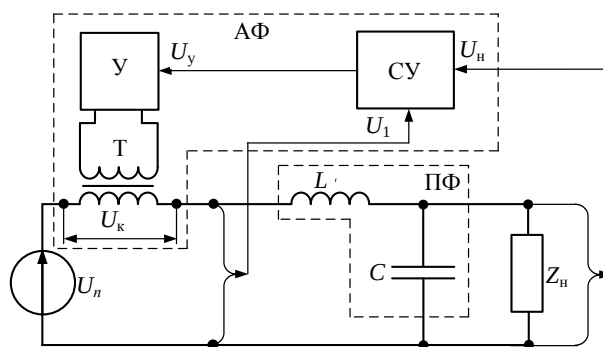


Рис. 1. Комбинированный активный фильтр последовательного типа с непрерывной системой управления

Fig. 1. A combined active filter of a sequential type with continuous control system

Предлагаемый комбинированный фильтр имеет пассивную ПФ и активную АФ составляющие. Пассивная состоит из реактора L и конденсатора C , которые образуют апериодический LC -фильтр. Активная часть состоит из усилителя $У$, трансформатора $Т$ и системы управления $СУ$. Пас-

сивный фильтр предназначен для снижения амплитуд высокочастотных гармонических составляющих напряжения выпрямителя, а для эффективного подавления низкочастотных канонических и неканонических гармоник используется активный фильтр. Подавление переменной составляющей U_n осуществляется внесением через трансформатор Т (рис. 1) в цепь реактора L напряжения компенсации U_k , которое получено усилением сформированного системой управления сигнала U_y .

Структура СУ предлагаемого комбинированного АФ представляет собой две параллельно работающие цепи, первая из которых состоит из датчика переменной составляющей $G_1(p)$ и корректирующего звена $G_2(p)$ (рис. 2). Вторая цепь – одно или несколько селективных звеньев $G_3(p)$, настроенных на требующие более эффективного подавления низкочастотные гармоники напряжения выпрямителя с большими амплитудами.

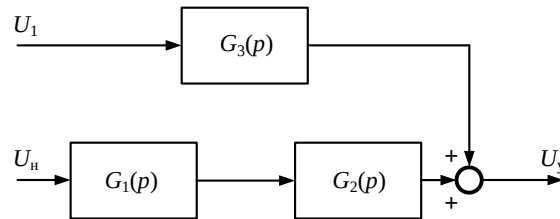


Рис. 2. Структурная схема системы управления комбинированного активного фильтра последовательного типа

Fig. 2. Block diagram of the control system of a combined active filter of a sequential type

Передающая функция СУ предлагаемого комбинированного АФ

$$W(p) = G_1(p)G_2(p) + G_3(p), \quad (2)$$

где $G_1(p)$, $G_2(p)$, $G_3(p)$ – передаточные функции, определяемые как:

$$G_1(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1};$$

$$G_2(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_4 p + 1};$$

$$G_3(p) = \frac{T_0 p}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}. \quad (3)$$

Подставив соотношения (3) в (2) и преобразовав их, получим выражение передаточной функции СУ комбинированного АФ

$$W(p) = \frac{T_1 p (T_3 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_4 p + 1)} + \frac{T_0 p}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{T_1 T_3 T_0^2 p^4 + (2\xi T_1 T_3 T_0 + T_1 T_0^2 + T_0 T_2 T_4) p^3 +}{T_2 T_4 T_0^2 p^4 + (T_2 T_0^2 + T_4 T_0^2 + 2\xi T_2 T_4 T_0) p^3 +} \rightarrow \\
&\rightarrow \frac{+ (T_1 T_3 + 2\xi T_1 T_0 + T_0 T_4 + T_0 T_2) p^2 + (T_1 + T_0) p}{+ (T_0^2 + 2\xi T_2 T_0 + 2\xi T_4 T_0 + T_2 T_4) p^2 + (2\xi T_0 + T_2 + T_4) p + 1}.
\end{aligned} \quad (4)$$

Для согласования и упрощения записи передаточной функции СУ введем коэффициенты $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$. После этого уравнение (4) примет следующий вид:

$$W(p) = \frac{A_1 p^4 + A_2 p^3 + A_3 p^2 + A_4 p}{A_5 p^4 + A_6 p^3 + A_7 p^2 + A_8 p + 1}, \quad (5)$$

где $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$ – коэффициенты, определяемые следующими зависимостями:

$$A_1 = T_1 T_3 T_0^2; \quad A_2 = 2\xi T_1 T_3 T_0 + T_1 T_0^2 + T_0 T_2 T_4;$$

$$A_3 = T_1 T_3 + 2\xi T_1 T_0 + T_0 T_4 + T_0 T_2; \quad A_4 = T_1 + T_0;$$

$$A_5 = T_2 T_4 T_0^2; \quad A_6 = T_2 T_0^2 + T_4 T_0^2 + 2\xi T_2 T_4 T_0;$$

$$A_7 = T_0^2 + 2\xi T_2 T_0 + 2\xi T_4 T_0 + T_2 T_4; \quad A_8 = 2\xi T_0 + T_2 + T_4.$$

Для перехода от операторного к комплексному виду записи передаточной функции системы управления подставляем в уравнение (5) вместо оператора Лапласа p произведение $j\omega$. Также преобразуем его к виду, необходимому для расчета логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) СУ комбинированного АФ

$$W(j\omega) = \frac{\omega A - j\omega A - \omega A + j\omega A}{\omega A - j\omega A - \omega A + j\omega A + 1}. \quad (6)$$

Для построения ЛАЧХ СУ комбинированного АФ коэффициент передачи (дБ) рассчитан в соответствии с уравнением

$$K(\omega) = 20 \lg \sqrt{\frac{(\omega^4 A_1 - \omega^2 A_3)^2 + (j\omega A_4 - j\omega^3 A_2)^2}{(\omega^4 A_5 - \omega^2 A_7 + 1)^2 + (j\omega A_8 - j\omega^3 A_6)^2}}. \quad (7)$$

ЛАЧХ СУ комбинированного фильтра, представленные на рис. 3, подтверждают увеличение коэффициента передачи СУ при использовании селективного звена, настроенного на неканоническую гармонику частотой 100 Гц.

Для проверки и подтверждения достоверности результатов аналитических исследований комбинированного АФ разработали имитационную модель в среде MatLab (рис. 4). В данной компьютерной модели блок Substation имитирует работу источника трехфазного напряжения и шестипульсную схему мостового выпрямителя. Вторичная обмотка трансформатора Т, служащего для гальванической развязки силовой части схемы и усилителя signal, включена последовательно с реактором пассивного LC-фильтра.

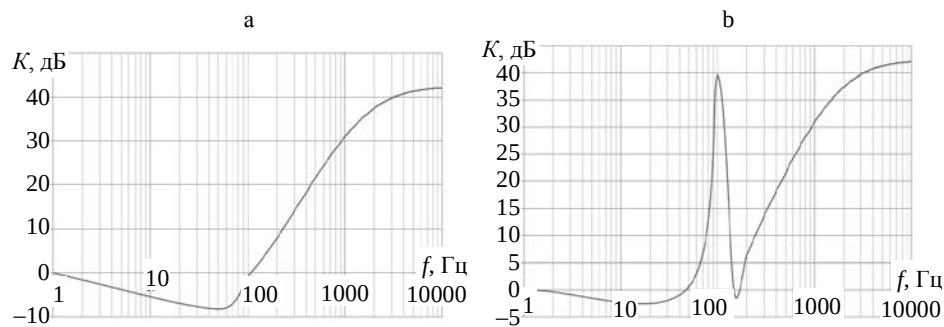


Рис. 3. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики системы управления комбинированного активного фильтра без селективного звена (а) и с учетом его действия (b)

Fig. 3. Logarithmic frequency response characteristics of a control system of a combined active filter without a selective link (a) and based on its action (b)

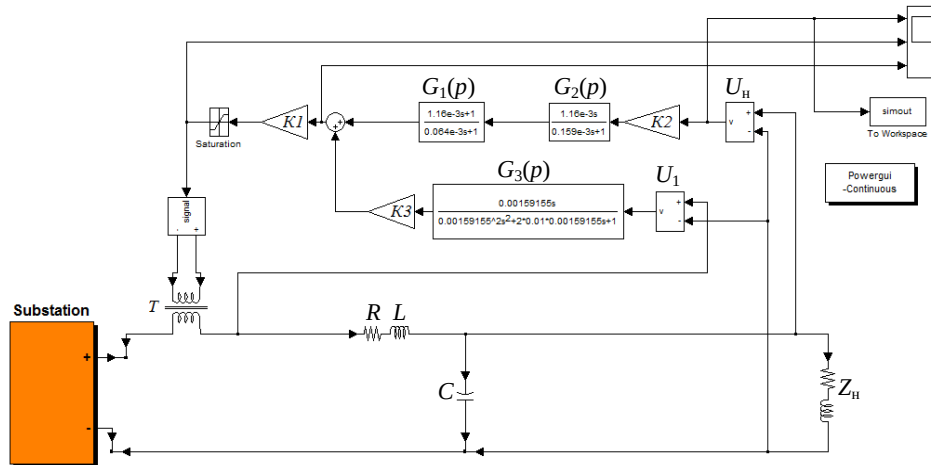


Рис. 4. Модель комбинированного активного фильтра последовательного типа в среде MatLab

Fig. 4. Model of a combined active filter of a sequential type in MatLab

Осциллограммы выходного напряжения и диаграммы его спектрального состава при активно-индуктивной нагрузке тяговой подстанции постоянного тока представлены на рис. 5.

Показатели переменной составляющей и коэффициента пульсаций напряжения (THD) при различных вариантах фильтрующих устройств приведены в табл. 1.

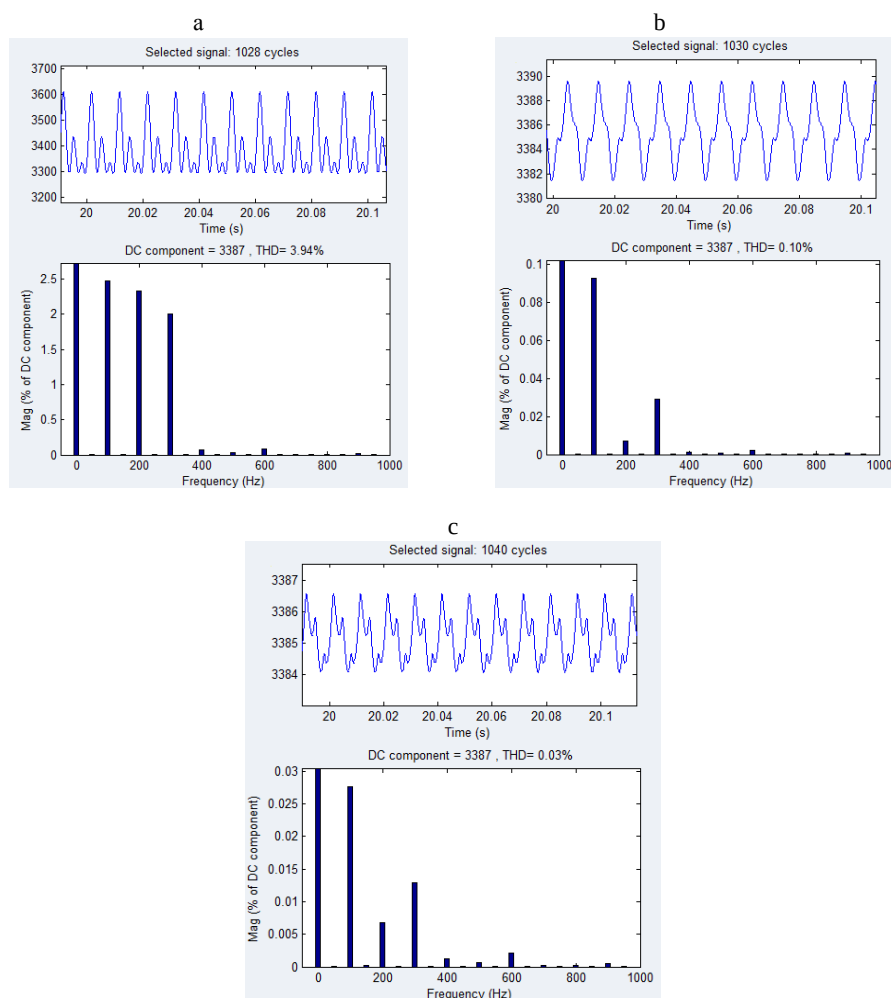


Рис. 5. Осциллограммы и спектральный состав выходного напряжения при использовании: а – пассивного LC-фильтра; б – пассивного LC-фильтра и активного фильтра; в – пассивного LC-фильтра и активного фильтра с селективным звеном 100 Гц

Fig. 5. Waveforms and spectral composition of the output voltage using: а – LC-passive filter; б – LC-passive filter and an active filter; в – LC-passive filter and an active filter with a selective link 100 Hz

Таблица 1

Сравнительные показатели разных видов фильтрующих устройств тяговой подстанции

Comparable figures of different kinds of filtering devices of a traction substation

Фильтр	Сравнительный показатель, %			THD
	$U_f = 100$	$U_f = 200$	$U_f = 300$	
ПФ	2,500	2,300	2,000	3,94
ПФ + АФ	0,900	0,010	0,030	0,10
ПФ + АФ с селективным звеном	0,027	0,006	0,014	0,03

ВЫВОД

Проведенный анализ комбинированного активного фильтра последовательного типа показал, что применение его целесообразно для улучшения качества электрической энергии постоянного тока, которое достигается за счет компенсации гармоник выпрямленного напряжения тяговой подстанции в широком диапазоне частот, в том числе и неканонических гармонических составляющих. Таким образом, обеспечивается необходимый уровень электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с электрическим подвижным составом и средствами железнодорожной сигнализации, централизации, блокировки и автоматики, а также со смежными электроустановками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Heydt, G. T. Second Harmonic Components in Power System Voltages and Currents / G. T. Heydt, Y. Liu // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. Vol. 20, No 1. P. 521–523.
2. Щербак, Я. В. Активна фільтрація вихідної напруги тягової підстанції постійного струму / Я. В. Щербак, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. 2011. № 127. С. 146–151.
3. Щербак, Я. В. Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції / Я. В. Щербак, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. 2013. № 142. С. 137–143.
4. Семененко, Ю. О. Дослідження роботи силового активного фільтра послідовного типу // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті / Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. 2014. № 143. С. 244 с.
5. Семененко, Ю. О. Дослідження роботи комбінованого активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування / Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. 2015. Т. 1, № 151. С. 87.
6. Lundquist, J. On Harmonic Distortion in Power Systems [Electronic Resource] / J. Lundquist. Sweden, Göteborg: Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, 2001. 147 p.
7. Design Considerations for Maintaining DC Side Voltage of Hybrid Active Power Filter with Injection Circuit / A. Luo [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, № 1. P. 75–84.
8. Dán, A. Filtering of Harmonics Generated by Thyristor Controlled AC Traction Systems / A. Dán, J. Kisvölcsy, Gy. Varjú // Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems, Winnipeg, 6–7 Oct., 1986. P. 404–413.
9. Ludbork, A. Harmonic Filtered for Notch Reduction / A. Ludbork // IEEE IAS 21th Annu. Denver. 1993. P. 1043–1047.
10. Williams S. M. Discrete Controlled Harmonic and Reactive Power Compensator / S. M. Williams, R. G. Hoft // Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). 1988. Vol. 35, № 6. P. 881–887.

Поступила 25.01.2016 Подписана в печать 23.03.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Heydt G. T., Liu Y. (2005) Second Harmonic Components in Power System Voltages and Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (1), 521–523. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839746.

2. Shcherbak Ya. V., Semenenko Yu. A. (2011) The Active Filtering of Output Voltage of DC Traction Substation. *Zb. Nauk. Prats Ukr. Derzh. Akad. Zaliznich. Transp.* [Collected Scientific Works of the Ukrainian State Academy of the Railway Transport], (127), 146–151 (in Ukrainian).
3. Shcherbak Ya. V., Semenenko Yu. A. (2013) Analysis of Dynamic Characteristics of Traction Substation Combined Filter. *Zb. Nauk. Prats Ukr. Derzh. Akad. Zaliznich. Transp.* [Collected Scientific Works of the Ukrainian State Academy of the Railway Transport], (142), 137–143 (in Ukrainian).
4. Semenenko Yu. A. (2014) Study of the Power Active Sequential Filter. *Zb. Nauk. Prats Ukr. Derzh. Akad. Zaliznich. Transp.* [Collected Scientific Works of the Ukrainian State Academy of the Railway Transport], (143), 244 (in Ukrainian).
5. Semenenko Yu. A. (2015) The Study of the Functioning of the Combined Active Sequential Filter with Impulse Control System. *Zb. Nauk. Prats Ukr. Derzh. Akad. Zaliznich. Transp.* [Collected Scientific Works of the Ukrainian State Academy of the Railway Transport], 1 (151), 87 (in Ukrainian).
6. Lundquist J. (2001) *On Harmonic Distortion in Power Systems*. Göteborg, Sweden, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology. 147 p.
7. Luo A., Shuai Z. K., Shen Z. J., Zhu W. J., Xu X. Y. (2009) Design Considerations for Maintaining DC Side Voltage of Hybrid Active Power Filter with Injection Circuit. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (1), 75–84. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2005501.
8. Dán A., Kisvölcsy J., Varjú G. (1986) Filtering of Harmonics Generated by Thyristor Controlled AC Traction Systems. *Proc. II International Conference on Harmonics in Power Systems*, Winnipeg, 6–7 October, 1986, 404–413.
9. Ludbork A. (1993) Harmonic Filtered for Notch Reduction. *IEEE IAS 21th Annu. Denver*, 1043–1047.
10. Williams S. M., Hoft R. G. (1988) Discrete Controlled Harmonic and Reactive Power Compensator. *Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 35 (6), 881–887 DOI:10.1109/IAS.1988.25164.

Received: 25 January 2016 Accepted: 23 March 2016 Published online: 26 September 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-427-435

УДК 621.313.333

Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе

В. В. Соленков¹⁾, В. В. Брель¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель,
Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Время и путь торможения электропривода с частыми пускотормозными режимами, содержащего асинхронный двигатель с встраиваемым комбинированным тормозным устройством, зависят от того, в какой момент времени происходит растормаживание электромагнита. При этом учитываются другие немаловажные критерии: износостойкость тормозного устройства и плавность торможения электропривода. В общем случае такой асинхронный двигатель содержит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, электромеханический нормально-замкнутый тормоз, электромагнитную муфту скольжения и схему управления. Представлены механические характеристики торможения асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством при различных моментах растормаживания электромагнита. Приведена математическая модель и представлены переходные процессы в таком двигателе. Формирование моделей для исследования на ЭВМ осуществляли на языке программирования Fortran 2008. Расчет системы дифференциальных уравнений производили методом Рунге – Кутты. Растормаживание электромеханического тормоза при различной скорости привело к разным значениям времени и путей торможения. Показаны графики зависимости пути и времени торможения при различных моментах растормаживания электромагнита. Оптимальным моментом включения электромеханического тормоза, обеспечивающим малые путь и время торможения, является момент при скорости $\omega_{\text{вкл}} = 0,6\text{--}0,8$ от номинальной. При этом допустимое число торможений для фрикционной накладки (по сравнению с механическим торможением) увеличится в 1,6–2,8 раза. Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных математических моделей и выявленных закономерностей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тормоз, муфта скольжения, путь и время торможения, фрикционные накладки

Для цитирования: Соленков, В. В. Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе / В. В. Соленков, В. В. Брель // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 427–435

Адрес для переписки

Соленков Виталий Владимирович
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48а, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-18-27
kaf_toe@gstu.by

Address for correspondence

Solencov Vitaly V.
P. O. Sukhoi State Technical University
of Gomel
48a, build. 2, October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-18-27
kaf_toe@gstu.by

Influence of the Time of Disinhibition to Transients and Wear of the Friction Linings in an Asynchronous Motor

V. V. Solencov¹⁾, V. V. Brel¹⁾

¹⁾P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Time and the stopping distance of the electric drive with frequent starting-and-braking modes that contain embedded asynchronous motor with a recessed combined braking device depend on the moment of an electromagnet disinhibition. At the same time other important criteria are taken into the account, i.e. wear resistance of the brake device and the smoothness of the deceleration of the electric drive. In general such an asynchronous motor contains asynchronous engine with squirrel-cage rotor, electromechanical normally-closed brake, electromagnetic slip clutch and control circuit. The mechanical characteristics of the deceleration of asynchronous motor with recessed combined brake device at different moments of an electromagnet disinhibition are presented. The mathematical model is featured and the transients in such a motor are presented. Formation models for computer research were carried out in the Fortran 2008 programming language. Calculation of the system of differential equations was fulfilled by the Runge – Kutta method. The deceleration of the electromechanical brake at various speeds caused different time values and stopping distances. The plots of stopping distance and the braking time at various moments of an electromagnet disinhibition are demonstrated. The optimum moment of switching on an electromechanical brake, providing small stopping distance and the braking time is the time when the speed $\omega_{\text{вкл}} = 0,6\text{--}0,8$ of the nominal. In this case the acceptable number of brake applications for friction linings (compared with mechanical braking) will increase by 1.6–2.8 times. The pilot study confirmed the validity of the obtained mathematical models and discovered patterns.

Keywords: asynchronous motor, brake, slip clutch, path and deceleration time, friction linings

For citation: Solencov V. V., Brel V. V. (2016) Influence of the Time of Disinhibition to Transients and Wear of the Friction Linings in an Asynchronous Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 427–435 (in Russian)

Введение

Время и путь торможения электропривода с частыми пускотормозными режимами, содержащего асинхронный двигатель с встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ), зависят от того, в какой момент времени происходит растормаживание электромагнита [1]. При этом учитываются другие немаловажные критерии: износостойкость тормозного устройства и плавность торможения электропривода. В связи с этим есть необходимость исследовать влияние момента растормаживания электромагнита на электромеханические переходные процессы и выявить оптимальные условия эксплуатации АД с ВКТУ в электроприводах с частыми пускотормозными режимами.

Основная часть

В общем случае АД с ВКТУ содержит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, электромеханический нормально замкнутый тормоз, электромагнитную муфту скольжения и схему управления [1]. Формирование тормозной механической характеристики происходит следующим

образом. После отключения двигателя от сети форсирующее напряжение подается на электромагнитную муфту скольжения. Двигатель начинает тормозиться электромагнитным полем, создаваемым вихревыми токами в тормозном диске, который жестко связан с валом двигателя. Чем больше скорость вращения вала двигателя, тем больший тормозной момент создает электромагнитная муфта. В процессе торможения скорость вала замедляется, и при достижении заданной скорости включения $\omega_{\text{вкл}}$ схема управления размыкает электромеханический тормоз. С этого момента на вал двигателя действует суммарный тормозной момент от муфты и от электромеханического тормоза. Скорость включения $\omega_{\text{вкл}}$ определяется необходимой тормозной механической характеристикой электропривода и задается изначально в схеме управления. Требуемая тормозная механическая характеристика для электропривода определяется в ходе исследования или экспериментально.

Механические характеристики торможения АД с ВКТУ при различных скоростях включения ($\omega_{\text{вкл}} = 0,25; 0,50; 0,75$ от номинальной) электромеханического тормоза представлены на рис. 1. Различные механические характеристики приводят к разным видам переходных процессов в АД с ВКТУ и к разной степени износа фрикционных накладок электромеханического тормоза.

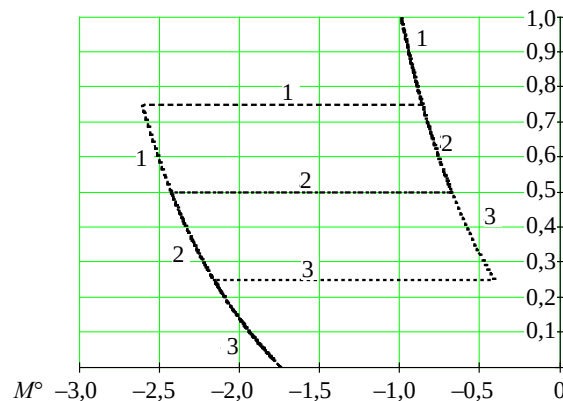


Рис. 1. Механические характеристики торможения асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством при различных скоростях включения $\omega_{\text{вкл}}^\circ$: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25 от номинальной

Fig. 1. Mechanical braking characteristics of asynchronous motor with an embedded combined braking device at various switching speeds $\omega_{\text{вкл}}^\circ$: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25 out of the nominal one

При аналитическом исследовании переходных процессов в тормозных электродвигателях [2] возникают серьезные трудности, обусловленные нелинейностью уравнений при переменной угловой скорости ротора ω_r . В то же время известно, что наиболее эффективным инструментом для решения подобных уравнений является ЭВМ. Она позволяет быстро и с до-

статочной степенью точности решать систему нелинейных уравнений асинхронного двигателя при варьировании параметров в широких пределах. Поэтому для исследования переходных процессов использовали метод математического моделирования на ЭВМ.

Известные уравнения, записанные в ортогональной системе координат α, β , неподвижной относительно несимметричной части АД с ВКТУ [1], выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} + r_1 i_{s\alpha} + \frac{2}{3} u_3; \\ u_{s\beta} &= \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + r_1 i_{s\beta}; \\ 0 &= \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + r_2' i_{r\alpha}' + \omega_p \psi_{r\beta}; \\ 0 &= \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + r_2' i_{r\beta}' - \omega_p \psi_{r\alpha}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{x_m}{\omega_0} p (i_{r\alpha}' i_{s\beta} - i_{s\alpha}' i_{r\beta}'); \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} W_s &= \frac{3}{2} r_1 \int_0^t (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt; \\ W_r &= r_2' \int_0^t (i_{r\alpha}'^2 + i_{r\beta}'^2) dt, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \psi_{s\alpha} &= \omega_0^{-1} (x_s i_{s\alpha} + x_m i_{r\alpha}'); \\ \psi_{s\beta} &= \omega_0^{-1} (x_s i_{s\beta} + x_m i_{r\beta}'); \\ \psi_{r\alpha} &= \omega_0^{-1} (x_r i_{r\alpha}' + x_m i_{s\alpha}); \\ \psi_{r\beta} &= \omega_0^{-1} (x_r i_{r\beta}' + x_m i_{s\beta}); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$x_s = x_1 + x_m$ — полное индуктивное сопротивление обмотки статора;
 $x_r = x_2' + x_m$ — то же приведенной обмотки ротора; x_1, x_2' — индуктивные сопротивления рассеяния статорной и приведенной роторной обмоток;
 x_m — то же взаимоиנדукции.

Учитывая рекомендации [2] относительно наиболее удобной формы записи уравнений асинхронного двигателя и соответствующей ей структурной схемы модели, преобразуем (1), (2). Для этого решим уравнения системы (4) относительно $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}', i_{r\beta}'$. Далее, подставив полученные выражения в (1) и (2) и произведя преобразования, получим иную форму записи этих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{sa}}{dt} &= u_{sa} - \omega_0 \alpha'_s \psi_{sa} + \omega_0 \alpha'_s k_r \psi_{ra} - \frac{2}{3} u_3; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - \omega_0 \alpha'_s \psi_{s\beta} + \omega_0 \alpha'_s k_r \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} &= -\omega_0 \alpha'_r \psi_{ra} + \omega_0 \alpha'_r k_s \psi_{sa} - \omega_p \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= -\omega_0 \alpha'_r \psi_{r\beta} - \omega_0 \alpha'_r k_s \psi_{s\beta} + \omega_p \psi_{ra}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$M = \frac{3}{2} p \omega_0 \frac{k_r}{\sigma \chi_s} (\psi_{ra} \psi_{s\beta} - \psi_{sa} \psi_{r\beta}), \quad (6)$$

где коэффициенты k_s , k_r , α'_s , α'_r и σ соответственно равны [2]:

$$\left. \begin{aligned} k_s &= \frac{x_m}{x_s}; \quad k_r = \frac{x_m}{x_r}; \\ \alpha'_s &= \frac{r1}{\sigma x_s}; \quad \alpha'_r = \frac{r2'}{\sigma x_r}; \\ \sigma &= 1 - \frac{x_m^2}{x_s x_r}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Обычно при моделировании уравнения электромеханического преобразования энергии записывают в относительных единицах путем введения базисных величин. Это позволяет упростить их, избавиться от громоздких коэффициентов и получить общие результаты. В настоящей статье используется система базисных величин, рекомендованная в [2]. При этом уравнения (5) и (6), записанные в относительных единицах, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{sa}^\circ}{dt^\circ} &= u_{sa}^\circ - \alpha'_s \psi_{sa}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{ra}^\circ - \frac{2}{3} u_3^\circ; \\ \frac{d\psi_{s\beta}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\beta}^\circ - \alpha'_s \psi_{s\beta}^\circ + \alpha'_s k_r \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{ra}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{ra}^\circ + \alpha'_r k_s \psi_{sa}^\circ - \omega_p^\circ \psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\psi_{r\beta}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \psi_{r\beta}^\circ - \alpha'_r k_s \psi_{s\beta}^\circ + \omega_p^\circ \psi_{ra}^\circ; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_p^\circ}{dt^\circ} = \frac{1}{H} \left[M^\circ - (M_c^\circ + M_r^\circ \cdot 1t_{rp} + M_m^\circ (\omega_p^\circ)) \text{sign} \omega_p \right]; \quad (9)$$

$$M^{\circ} = \frac{k_r}{\sigma \chi_s^{\circ}} (\psi_{ra}^{\circ} \psi_{s\beta}^{\circ} - \psi_{sa}^{\circ} \psi_{r\beta}^{\circ}); \quad (10)$$

$$H = \frac{33,79 J n_1^2}{S_{\text{баз}}}, \quad (11)$$

где H – момент инерции в относительных единицах; $S_{\text{баз}}$ – номинальная полная мощность двигателя, В·А; M_c – статический момент сопротивления; M_r – тормозной момент, возникающий в результате трения фрикционных накладок тормозного устройства (электромеханический тормоз); $M_m(\omega_p)$ – то же электромагнитной муфты скольжения (электромагнитный тормоз).

Относительные величины токов и потерь энергии определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} i_{sa}^{\circ} &= \frac{1}{\sigma \chi_s^{\circ}} \psi_{sa}^{\circ} - \frac{k_r}{\sigma \chi_s^{\circ}} \psi_{ra}^{\circ}; \\ i_{s\beta}^{\circ} &= \frac{1}{\sigma \chi_s^{\circ}} \psi_{s\beta}^{\circ} - \frac{k_r}{\sigma \chi_s^{\circ}} \psi_{r\beta}^{\circ}; \\ i_{ra}^{\circ'} &= \frac{1}{\sigma \chi_r^{\circ}} \psi_{ra}^{\circ} - \frac{k_s}{\sigma \chi_r^{\circ}} \psi_{sa}^{\circ}; \\ i_{r\beta}^{\circ'} &= \frac{1}{\sigma \chi_r^{\circ}} \psi_{r\beta}^{\circ} - \frac{k_s}{\sigma \chi_r^{\circ}} \psi_{s\beta}^{\circ}; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} W_s^{\circ} &= r_1^{\circ} \int_0^{t^{\circ}} (i_{sa}^{\circ 2} + i_{s\beta}^{\circ 2}) dt^{\circ}; \\ W_r^{\circ} &= r_1^{\circ'} \int_0^{t^{\circ}} (i_{ra}^{\circ' 2} + i_{r\beta}^{\circ' 2}) dt^{\circ}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Формирование моделей для исследования на ЭВМ осуществляли на языке программирования Fortran 2008. Расчет системы дифференциальных уравнений (8)–(10) производили методом Рунге – Кутты. Переходные процессы АД с ВКТУ (АИР90 $J_{\text{мех}} = 2J_{\text{рот}}$, $M_c = 0,1M_H$) при $\omega_{\text{вкл}}^{\circ} = 0,25; 0,50; 0,75$ от номинальной представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, растормаживание электромеханического тормоза при различной скорости $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$ привело к разным значениям времени и путей торможения. Электроприводы производственных механизмов требуют различные характеристики торможения. Поэтому выбор $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$ для каждого электропривода должен производиться на основе требований к времени и пути торможения, к износостойкости тормозных накладок и плавности торможения. Например, если привод является электроприводом подачи, то

важна точная остановка (путь торможения). Для быстрых производственных процессов важно время торможения. Однако наиболее быстрая и точная остановка не всегда является наилучшей. Следует учитывать, что для многих производственных механизмов максимальное значение ускорения при замедлении (т. е. плавности торможения) ограничено. Так, для электроприводов грузоподъемных механизмов замедление не должно быть более $0,1\text{--}0,2 \text{ м/с}^2$ (предотвращается раскачивание груза) [3, 4]; для электроприводов, транспортирующих ковши с жидким расплавом, – более $0,25 \text{ м/с}^2$; для электроприводов самоходных машин – более $2,0 \text{ м/с}^2$ (исключается пробуксовка колес); для электроприводов цепных конвейеров – более $0,5 \text{ м/с}^2$ (уменьшаются динамические удары на цепь) [3, 5–7].

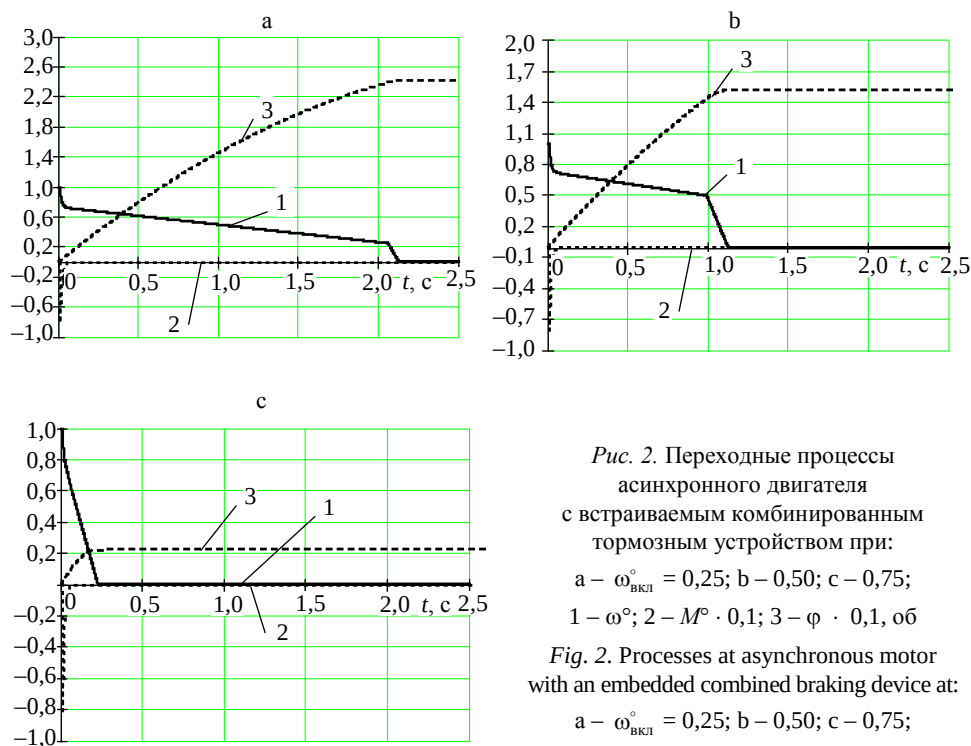


Рис. 2. Переходные процессы асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством при:
а – $\omega_{\text{вкл}}^\circ = 0,25$; б – $0,50$; в – $0,75$;
1 – ω° ; 2 – $M^\circ \cdot 0,1$; 3 – $\phi \cdot 0,1$, об

Fig. 2. Processes at asynchronous motor with an embedded combined braking device at:
а – $\omega_{\text{вкл}}^\circ = 0,25$; б – $0,50$; в – $0,75$;
1 – ω° ; 2 – $M^\circ \cdot 0,1$; 3 – $\phi \cdot 0,1$, rotations

При торможении АД с ВКТУ помимо времени и пути торможения важный параметр – уменьшенный износ фрикционных накладок, что влияет на длительность бесперебойной работы электропривода. Как указано в [3], торможение на пониженной скорости существенно уменьшает износ фрикционных накладок электромеханического тормоза.

Из вышесказанного следует, что необходимо проанализировать и выбрать оптимальное значение $\omega_{\text{вкл}}$, при котором обеспечивается быстрая и точная остановка электропривода, а также имеют место пониженный износ и плавность торможения в АД с ВКТУ.

Зависимости пути торможения φ , времени торможения $t_{\text{тор}}$ и времени включения тормоза $t_{\text{вкл}}$ от скорости включения $\omega_{\text{вкл}}^0$ электромеханического тормоза для двигателя АИР90 ($J_{\text{мех}} = 2J_{\text{рот}}; J_{\text{мех}} = 3J_{\text{рот}}; M_{\text{с}} = 0,1M_{\text{н}}$) приведены на рис. 3.

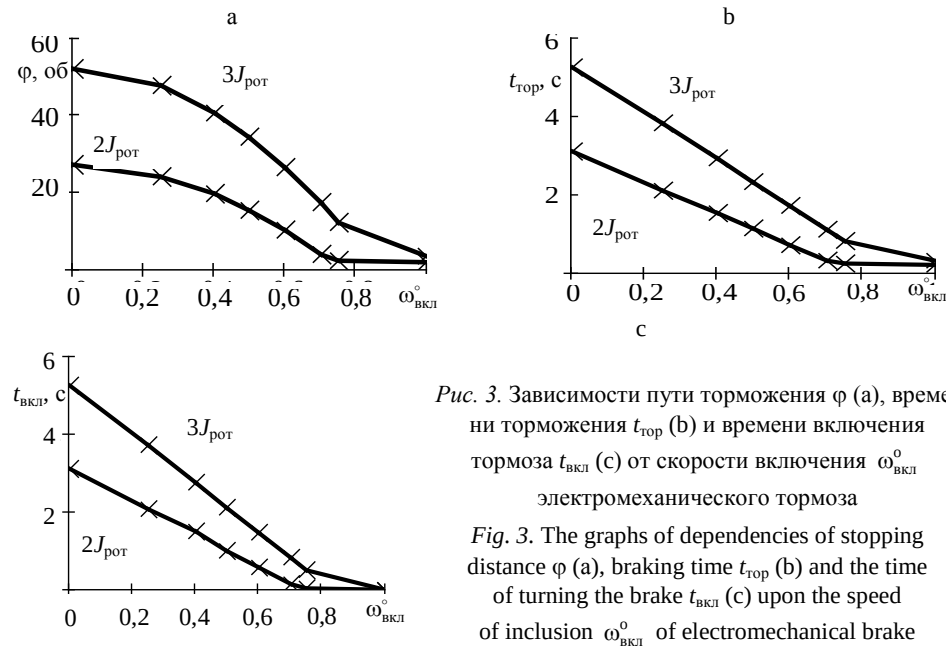


Рис. 3. Зависимости пути торможения φ (а), времени торможения $t_{\text{тор}}$ (б) и времени включения тормоза $t_{\text{вкл}}$ (с) от скорости включения $\omega_{\text{вкл}}^0$ электромеханического тормоза

Fig. 3. The graphs of dependencies of stopping distance φ (a), braking time $t_{\text{тор}}$ (b) and the time of turning the brake $t_{\text{вкл}}$ (c) upon the speed of inclusion $\omega_{\text{вкл}}^0$ of electromechanical brake

ВЫВОД

Анализ полученных графиков зависимостей показал, что оптимальным моментом включения электромеханического тормоза, обеспечивающим малые путь и время торможения, является момент при скорости $\omega_{\text{вкл}} = 0,6\text{--}0,8$ от номинальной. При этом допустимое число торможений для фрикционной накладки [3, 8–10] (по сравнению с механическим торможением) увеличится в $N = \frac{1}{(\omega_{\text{вкл}}^0)^2} = \frac{1}{0,6^2} \div \frac{1}{0,8^2} = 1,6 \div 2,8$ раза. Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных математических моделей и выявленных закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соленков, В. В. Математическая модель АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 24–31.
2. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / А. В. Сипайлов, А. В. Лоос. М.: Высш. шк., 1980. 176 с.

3. Александров, М. П. Тормозные устройства / М. П. Александров, А. Г. Лысяков. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.
4. Яуре, А. Г. Крановый электропривод / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.
5. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2015. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 16.10.2015.
6. Karl, E. Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2000. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 01.02.2008.
7. Марголин, Ш. М. Точная остановка электроприводов / Ш. М. Марголин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
8. Соленков, В. В. Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 4. С. 28–32.
9. Гусельников, Э. М. Самотормозящиеся электродвигатели / Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. М.: Энергия, 1971. 96 с.
10. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 6. С. 20–24.

Поступила 14.12.2015 Подписана в печать 15.02.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Solencov V. V., Brel V. V. (2013) Mathematical Model of Asynchronous Motor with Embedded Combined Braking Device. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (6), 24–31 (in Russian).
2. Sipaylov G. A., Loos A. V. (1980) *Mathematical Modeling of Electrical Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 176 (in Russian).
3. Aleksandrov M. P., Lysakov A. G. (1985) *Braking Devices*. Moscow, Mashinostroenie. 312 (in Russian).
4. Joure A. G., Pevzner E. M. (1988) *Crane Electric Drive*. Moscow, Energoatomizdat. 344 (in Russian).
5. Karl E. (2015) Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 16 October 2015).
6. Karl E. (2000) Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed: 1 February 2008).
7. Margolin S. M. (1984) *Accurate Termination of the Electric Actuator*. Moscow, Energoatomizdat. 104 (in Russian).
8. Salenkov V. V., Brel V. V. (2004) Asynchronous Motors with Electromechanical Brakes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 28–32 (in Russian).
9. Guselnikov E. M., Zukerman B. S. (1971) *Self-Locking Electric Motors*. Moscow, Energiya. 96 (in Russian).
10. Salenkov V. V., Brel V. V. (2011) Asynchronous Electric Motor with Built-in Combined Braking Device Based on Electro-Mechanical Brake and Electro-Magnetic Clutch. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (6), 20–24 (in Russian).

Received: 14 December 2015 Accepted: 15 February 2016 Published online: 26 September 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-436-451

УДК 621.311

Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки

А. А. Капанский¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассмотрены существующие методы оценки энергетической эффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения. Основным инструментом существующих методик – расчетно-аналитический метод, в соответствии с которым определение общих и удельных расходов электрической энергии базируется на оценке фактического расхода, напора и коэффициента полезного действия насосного агрегата. Однако в практических условиях на эти характеристики воздействует множество факторов, которые оказывают влияние на результирующее значение энергетической эффективности и приводят к погрешностям в расчетах. К таким факторам относятся техническое состояние оборудования и трубопроводных сетей, изменение режимов работы насосных агрегатов с течением времени, заметное влияние на электропотребление температуры окружающей среды, объема атмосферных осадков и химического состава стоков. Как объект управления системы водоснабжения и водоотведения обладают свойством целостности, в связи с чем оценка показателей энергоэффективности трубопроводных предприятий должна базироваться на системном подходе, тогда как существующие методы основаны главным образом на анализе режимов работы единичного электрооборудования, а не всей технологической системы. Приведена система управления энергетической эффективностью трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения, которая основывается на информационной базе статистических данных энергетических, гидравлических и производственных показателей водоканализационного хозяйства. Представлены разработанные базовые математические модели общих и удельных расходов электрической энергии в системах водоснабжения и водоотведения, которые являются основой для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния энергетической эффективности работы предприятий, выбора приоритетных направлений энергосбережения и поиска резервов экономии топливно-энергетических ресурсов.

Ключевые слова: энергоэффективность, водоснабжение, водоотведение, топливно-энергетические ресурсы, методы оценки

Для цитирования: Капанский, А. А. Энергоэффективность технологических систем водоснабжения и водоотведения и методы ее оценки / А. А. Капанский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 436–451

Адрес для переписки

Капанский Алексей Александрович
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48а, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 48-86-12
kaf_power@gstu.by

Address for correspondence

Kapansky Aleksey A.
P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel
48a, build. 2, October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 48-86-12
kaf_power@gstu.by

Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal

A. A. Kapansky¹⁾

¹⁾P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The existing methods for assessing the energy efficiency of technological systems of water supply and water disposal are examined. The main tool of the existing methods is a settlement-and-analytical method, and, in accordance with the mentioned one, the determining of general and specific electric power consumption is based on actual consumption evaluation, evaluation of pressure and efficiency of the pump unit. However, in practical terms a lot of factors influence on those characteristics therefore affecting the resulting magnitude of energy efficiency and leading to errors in the calculation. These factors include the technical condition of the equipment and piping systems, alterations in the modes of operation of pumping units over time, a significant impact of the ambient temperature on the power consumption, amount of precipitation and the chemical composition of the effluent. As an object of management water supply and water disposal systems are considered as a totality; therefore the assessment of the energy efficiency of pipeline enterprises ought to be based on a systematic approach, whereas the existing methods are mainly based on an analysis of operating modes of individual electrical equipment, not on the whole technological system. The article describes the management system of energy efficiency of pipeline water supply and water disposal systems. The management system is based on information base of statistic data of power, hydraulic and industrial indexes of wastewater management. The original basic mathematical models of common costs and unit costs of electrical power in the water supply and water disposal systems, which are the basis for the solution of the problems of forecasting and the current state assessment of energy efficiency of enterprises, the selection of priority areas of energy efficiency and finding the ways to save energy resources, are presented.

Keywords: energy efficiency, water supply system, water removal system, fuel and energy resources evaluation methods

For citation: Kapansky A. A. (2016) Energy Efficiency and Assessment Methods of Technological Systems of Water Supply and Water Disposal. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 436–451 (in Russian)

Ведение

В целях укрепления и формирования системы энергосбережения Республики Беларусь одним из важнейших приоритетов является выполнение комплекса организационных и технических мероприятий, направленных на снижение энергоемкости продукции в промышленном секторе, минимизацию потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), замещение импортируемых энергоресурсов местными и создание необходимых условий для повышения уровня энергетической безопасности страны. Проводимая активная политика в области энергосбережения только за 2006–2010 гг. с объемом финансирования 2438,7 млрд бел. руб. позволила обеспечить экономический эффект в секторе ЖКХ в размере 1313,0 тыс. т у. т. при среднегодовом значении 262,6 тыс. т у. т. [1]. Экономический эффект от энергосберегающих мероприятий за 2014 г. составил 169,7 тыс. т у. т. [2].

Государственный инструмент регулирования потенциала энергосбережения ЖКХ – это механизм нормирования расходов ТЭР [3, 4]. Кроме то-

го, в основе себестоимости продукции лежит энергетическая составляющая затрат, в связи с чем внедрение технически и экономически обоснованных мероприятий по энергосбережению, прогнозирование и оценка текущего состояния энергоэффективности (ЭЭФ) приводят к совершенствованию системы тарифного регулирования и социальной защиты населения. Современные системы водоснабжения и водоотведения, входящие в структуру ЖКХ, представляют собой сложные технологические комплексы, состоящие из нескольких подсистем, которые взаимодействуют между собой, оказывают влияние друг на друга и формируют режим работы всей технологической системы в целом. Оценка показателей ЭЭФ для таких объектов должна базироваться на системном анализе, тогда как существующие подходы основаны в большинстве случаев на анализе режимов работы единичных электроприемников, а не всей технологической системы.

На формирование ЭЭФ технологических систем водоснабжения и водоотведения в первую очередь оказывают влияние состав насосного оборудования и установки очистки стоков [5]. Для крупного промышленного центра суммарные установленные мощности насосных агрегатов достигают 10 МВт и ежегодно растут. В рамках реализации мероприятий Государственной программы «Чистая вода» только за 2014 г. принято в эксплуатацию и реконструировано более 109 объектов водоснабжения и водоотведения.

С одной стороны, увеличение расхода электроэнергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения напрямую связано с развитием и строительством городов и населенных пунктов, которые предусматривают плановый рост трубопроводных сетей и ввод дополнительных насосных станций. А с другой – водоканалы республики активно внедряют мероприятия по энергосбережению, что обеспечивает снижение удельных и общих расходов электроэнергии [6]. Структурные изменения технологических систем требуют пересмотра и развития методических принципов оценки текущего состояния и прогнозирования показателей ЭЭФ водоснабжающих и водоотводящих организаций в условиях изменяющихся производственных программ, развития трубопроводных сетей, изменения качества очистки стоков и проводимых мероприятий в области энергосбережения.

Функционирование технологических систем водоснабжения и водоотведения в современных условиях

В настоящее время услуги водоснабжения и канализации оказывают 1460 организаций Республики Беларусь, из них 144 относятся к системе Министерства жилищно-коммунального хозяйства. При этом на долю организаций ЖКХ приходится более 85 % объема оказываемых услуг [7]. Для решения социальных задач ежегодно осуществляется целенаправленная работа по развитию системы питьевого водоснабжения и водоотведения, улучшению качества, мониторингу и контролю химических показателей очищаемой сточной и питьевой воды. Производственный контроль качества сточной, поверхностной и питьевой воды в обязательном порядке

осуществляют испытательные лаборатории городских и районных водоснабжающих и водоотводящих организаций. Совершенствование системы управления водоканализационным хозяйством отражается в стремительном развитии автоматизации процессов по запуску и останову насосов, регулированию давления и расходов воды, которые зачастую на водоканалах республики осуществляются дистанционно. Развитие отраслевых и индивидуальных нормативных баз по водопотреблению и водоотведению, контроль технологических расходов и утечек воды приводят к повышению ЭЭФ работы водоканалов.

Развитие технологических систем водоснабжения и водоотведения по сравнению с 2004 г. стремительно увеличивается. Уже в 2011 г. обеспеченность населения централизованным водоснабжением и водоотведением выросла на 6 и 12 % соответственно, обеспеченность систем питьевого водоснабжения сооружениями обработки воды увеличилась на 18 % [8]. Источниками водоснабжения в основном выступают подземные воды, ресурсы которых оцениваются в размере от 43,5 до 49,6 млн м³ в сутки [8, 9]. Обеспеченность водными ресурсами на душу населения Республики Беларусь значительно выше, чем в соседних странах (Польше, Украине), и составляет 5,8 тыс. м³, тогда как среднеевропейская норма 4,2 тыс. м³.

Показатель удельного водопотребления за 2010 г. приблизился к европейским стандартам и составил 140–150 л/сут. на человека. Стремительное внедрение водосчетчиков, проводимая политика экономии энергоресурсов и сложное экономическое положение у населения и промышленных предприятий приводят к ощутимым снижениям добычи воды водоканалами страны. Месячная динамика подъема воды из артезианских скважин городской системы водоснабжения, производственные показатели которой за полтора года снизились более чем на 10 %, представлена на рис. 1. Снижение объемов добычи воды, перекачки и очистки стоков отслеживается по всей республике.

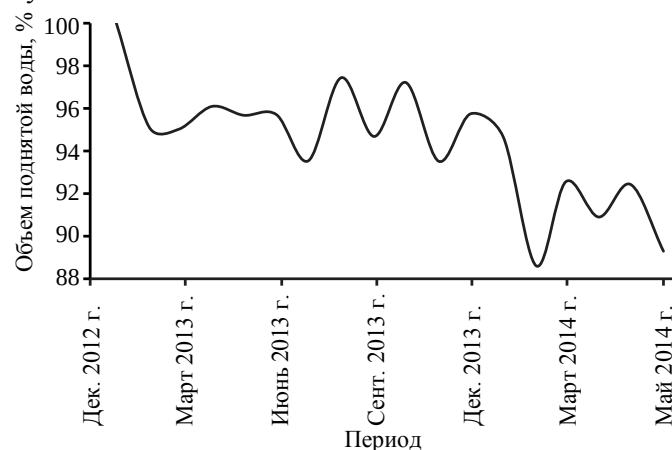


Рис. 1. Месячная динамика подъема воды за 2013–2014 гг. городской системы водоснабжения

Fig. 1. Monthly dynamics of water rise in the urban water supply system, 2013–2014

Снижение объемов производства на объектах водоканализационного хозяйства негативно отражается на оценке фактического состояния ЭЭФ работы предприятия, прогнозировании общих и удельных расходов электроэнергии, что связано в первую очередь с отсутствием методического обеспечения, позволяющего производить оценку ЭЭФ при учете различных влияющих факторов.

Существующие методы оценки энергоэффективности и их недостатки

Государственное регулирование в сфере эффективного использования ТЭР в системах водоснабжения и водоотведения осуществляется путем:

- разработки показателей в сфере энергосбережения;
- нормирования расхода ТЭР;
- проведения энергетического обследования.

Нормирование в системах водоснабжения и водоотведения необходимо для определения потребности в электрической энергии на технологические нужды при заборе воды из природных источников, транспортировании, при доведении воды до нужного качества и поддержании необходимого давления в системе водоснабжения, а также при перекачке в системе водоотведения и очистке сточных вод. Нормы расхода электрической энергии в системах водоснабжения рассчитываются на 1000 м³ поднятой из природных источников воды, а для водоотведения – на 1000 м³ перекаченной по городской канализационной сети сточной воды и очищенной до установленного качества. Существующая система нормирования расхода электрической энергии в системе водоканализационного хозяйства осуществляется на основании положения о нормировании расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь [3] и Методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь [10].

Основной инструмент существующей методики – расчетно-аналитический метод, с помощью которого удельный расход электроэнергии для насосных агрегатов определяется по выражению

$$W_{\text{уд.н}} = 2,72 \frac{H}{\eta}, \quad (1)$$

где H – полный напор, развиваемый насосом, м; η – коэффициент полезного действия агрегата, о. е.

Удельный расход электроэнергии для воздуходувного оборудования [10]

$$W_{\text{уд.в}} = \frac{26,8 \cdot 10^6 p \cdot \text{БПК}}{\eta K_1 K_2 N_1 N_2 (C_p - C)}, \quad (2)$$

где p – избыточное давление, создаваемое воздуходувным агрегатом, атм; БПК – величина снятой биологической потребности в кислороде, мг/л,

равная БПК поступающей сточной воды в среднем за год; η – коэффициент полезного действия агрегата, о. е.; K_1 – коэффициент, учитывающий тип агрегата, о. е.; K_2 – то же, зависящий от глубины погружения аэратора, о. е.; N_1 – температурный коэффициент, о. е.; N_2 – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства сточной воды, о. е.; C_p – растворимость кислорода воздуха в сточной воде на 1/2 глубины аэротенка, мг/л; C – концентрация растворенного кислорода в иловой смеси аэротенка, мг/л.

К недостаткам расчетно-аналитического метода можно отнести трудоемкость и низкую точность расчетов. Погрешности в расчетах обусловлены сложностью фактической оценки рабочих параметров насосного, воздухоудвигного и прочего технологического оборудования, изменением режимов работы насосных агрегатов с течением времени, старением водопроводных и канализационных сетей, заметным влиянием на электропотребление температуры окружающей среды, объемов осадков, химического состава сточных вод при автоматизированной работе системы компрессорного хозяйства предприятия и т. д.

В странах ближнего зарубежья, таких как Россия и Казахстан, кроме расчетно-аналитического метода используется также нормативный, который основан на удельных нормах расхода электрической энергии [11, 12]. Для насосных станций удельные нормативные расходы электроэнергии включают в себя непосредственную перекачку жидкости, работу механических граблей и дробилок, а также общепроизводственные расходы электроэнергии

$$W = (w_n + w_{гр} + w_{др})Q_{г} + W_{в.о} + W_{вент}, \quad (3)$$

где w_n – удельный расход электрической энергии, потребляемой насосной станцией на перекачку воды (сточных вод), кВт·ч/1000 м³; $w_{гр}$, $w_{др}$ – то же на работу соответственно механических граблей и (или) дробилки при наличии их в составе оборудования насосной станции перекачки сточных вод, кВт·ч/1000 м³; $Q_{г}$ – годовой объем перекачиваемой жидкости, тыс. м³; $W_{в.о}$, $W_{вент}$ – годовой расход электроэнергии на работу вспомогательного оборудования и принудительной вентиляции при ее наличии, тыс. кВт·ч.

Расход электрической энергии очистными сооружениями нормативным методом определяется в зависимости от применения различных способов очистки

$$W = (w_m + w_{об})Q_{г} + w_o M_o + W_{в.о}, \quad (4)$$

где w_m – показатель удельного расхода электрической энергии на механическую очистку, глубокое осветление и обесцвечивание воды, кВт·ч/м³;

$w_{об}$ – то же на обеззараживание воды, кВт·ч/м³; Q_r – годовой объем очищаемой воды, тыс. м³; w_o – удельный расход электрической энергии на озонирование воды, кВт·ч/кг озона; M_o – количество расходуемого озона, кг.

Нормативный метод расчета используется в том случае, если отсутствуют необходимые данные для определения потребности в электрической энергии расчетно-аналитическим методом в силу невысокой точности расчета [11]. Для оценки деятельности предприятий ЖКХ, направленной на эффективное использование ТЭР, республиканскими органами государственного управления устанавливается целевой показатель (ЦП) по энергосбережению, под которым понимается относительное изменение обобщенных энергозатрат в отчетном периоде по сравнению с базисным периодом. ЦП определяется по выражению [13]

$$\text{ЦП} = \left(\frac{\text{ОЭЗ}^o}{\text{ОЭЗ}^6 + \sum \Delta \text{ОЭЗ}^6} - 1 \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где ОЭЗ^o – обобщенные энергозатраты отчетного периода, т у. т.; ОЭЗ^6 – то же базисного периода, т у. т.; $\sum \Delta \text{ОЭЗ}^6$ – величина, на которую должны быть изменены обобщенные энергозатраты в сопоставимых условиях, т у. т.

К сопоставимым условиям относятся любые факторы, приводящие к изменению уровня энергопотребления, кроме мероприятий по энергосбережению. Для организаций системы ЖКХ в качестве таких факторов могут выступать: темпы изменения объемов производства; ввод в эксплуатацию новых объектов (водозаборов, очистных сооружений и т. п.); увеличение протяженности водопроводов; качественные показатели питьевой воды после станции водоподготовки; качественные показатели очищенных сточных вод и т. п. К достоинствам ЦП можно отнести возможность оценки выполнения мероприятий, направленных на снижение энергопотребления, к недостаткам – сложность приведения энергозатрат к сопоставимым условиям. Так, в соответствии с инструкцией [13] расчет поправки на изменение объемов производства выполняется по формуле

$$\Delta \text{ОЭЗ} = \sum (V_i^o - V_i^6) W_{уд.i}^6, \quad (6)$$

где V_i^o , V_i^6 – объем производства i -го вида продукции в отчетном и базисном периодах, тыс. м³; $W_{уд.i}^6$ – фактический удельный расход электроэнергии в соответствующем базисном периоде, кВт·ч/тыс. м³.

На текущий момент все расчеты, связанные с оценкой ЦП и приведением обобщенных энергозатрат к сопоставимым условиям, учитываются своим изменением к базисному году, где за базис принят фактический удельный расход электроэнергии прошедшего периода. Однако удельный

расход электроэнергии является производным показателем фактического электропотребления и объемов производства, в связи с чем в разных периодах исследования его значение может существенно отличаться (рис. 2).

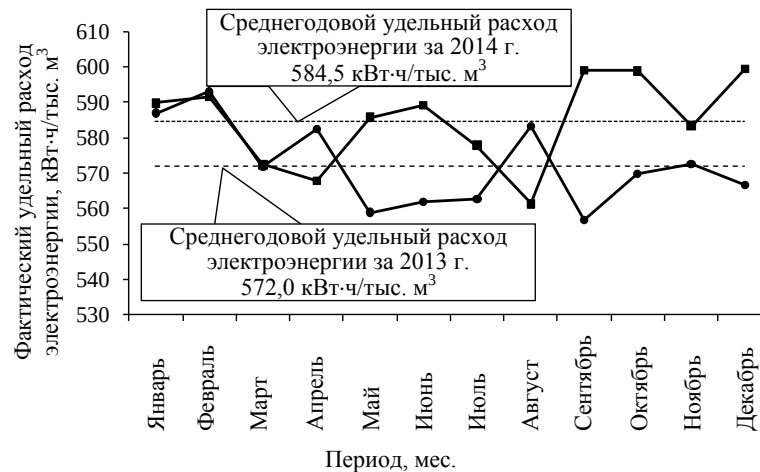


Рис. 2. Сравнение фактических удельных расходов электроэнергии в системе водоснабжения: —●— — 2013 г.; —■— — 2014 г.

Fig. 2. Comparing actual unit costs of electricity in the water supply system: —●— — 2013 year; —■— — 2014 year

Эти отличия вносят существенный вклад в расчет поправки электроэнергии и в конечном итоге влияют на оценку ЦП, приводя к ложному анализу экономического эффекта от проведенных мероприятий по энергосбережению. Так, в Методических рекомендациях по планированию, учету производственных затрат и калькулированию себестоимости услуг (продукции, работ) в жилищно-коммунальном хозяйстве [14] сказано, что при планировании расходов по статье «Электроэнергия» необходимо учитывать снижение объемов реализации услуг, внедрение систем регулирования и других мероприятий по энергосбережению. Однако планирование расходов от базового периода не позволяет производить оценку фактических результатов деятельности, направленной на энергосбережение, и стимулировать производственные службы реализовывать эти мероприятия. Кроме того, оценка экономического эффекта от реализованных мероприятий по энергосбережению усложняется при вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей или повышении качества очистки стоков, сопровождаясь при этом изменением объемов производства. В результате таких изменений появляется область неопределенности фактического состояния ЭЭФ.

Характеристики, отражающие расхождение поправки электроэнергии, учитывающей фактическую динамику изменения удельного расхода, от поправки, основанной на базовой норме расхода электроэнергии прошедшего периода, представлены на рис. 3.

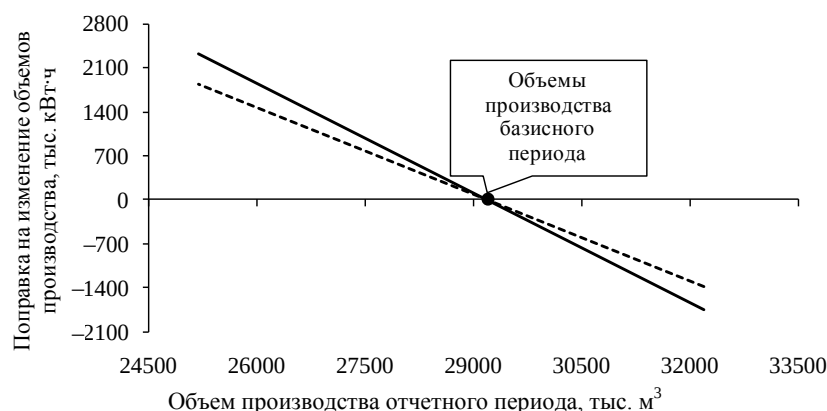


Рис. 3. Оценка погрешности расчета поправки при изменении объемов производства:
 — по инструкции; ---- по факту

Fig. 3. Estimation of the error correction calculation under the circumstances of alteration of the production volumes: — according to the instructions; ---- according to the actual state of affairs

Система управления энергоэффективностью

Существующее методическое обеспечение, разработанное несколько десятилетий назад, не может использоваться для оценки текущего состояния энергоэффективности и прогнозирования ее на перспективу в связи с тем, что оно основано в большинстве случаев на анализе режимов работы единичных электроприемников, а не всей технологической системы. Для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния ЭЭФ необходимо учитывать, что технологическая система водоснабжения и водоотведения как объект управления имеет свои индивидуальные свойства и закономерности функционирования, отличающиеся от закономерностей функционирования отдельных подсистем и элементов, входящих в систему [15]. Сформированная структура управления ЭЭФ технологических систем водоснабжения и водоотведения представлена на рис. 4.

В современных технологических системах водоснабжения и водоотведения возникают затруднения при решении задач, связанных с управлением электропотреблением после воздействия внутренней и внешней среды. К внутренним воздействиям можно отнести ежегодное внедрение на предприятиях ЖКХ подкачивающих и канализационных насосных станций, рост и изменение структуры трубопроводных сетей, ввод в эксплуатацию современного энергосберегающего оборудования. Внешнее воздействие обусловливается изменением конъюнктуры рынка, покупательской способностью населения и промышленных предприятий, что в целом существенно сказывается на производственных показателях.

Как объект управления, система водоснабжения обладает свойством целостности и неделимости. Именно поэтому исследование влияющих факторов базируется на построении многофакторных аддитивных моделей электропотребления, основанных на обработке статистических наблюде-

ний методами регрессионного анализа [6, 16]. В состав информационной базы данных входит суточная статистика ретроспективных производственных показателей, т. е. фактически отработанных показателей прошедшего периода исследования. Эти показатели позволяют учесть действительное изменение объемов производства, климатические особенности региона, а также фактические затраты электроэнергии при транспортировке питьевой воды и стоков.

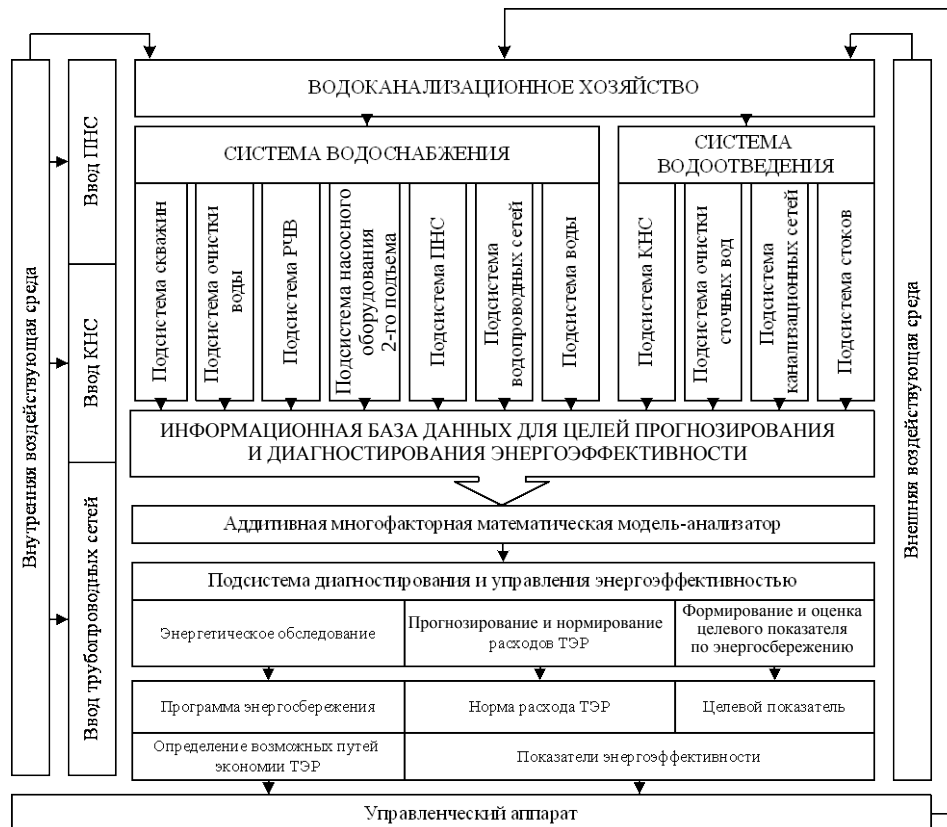


Рис. 4. Схема управления энергоэффективностью технологических систем водоснабжения и водоотведения

Fig. 4. The control circuit of power efficiency of technological systems of water supply and water removal

В роли факторов могут выступать такие показатели подсистем, как:

- объемы поднятой из скважин или поданной потребителю воды;
- объемы перекачиваемых или очищаемых сточных вод;
- температура окружающей среды;
- объемы атмосферных осадков;
- химический состав стоков и др.

Для системы водоснабжения при выборе суточной дискретизации ретроспективных производственных показателей неравномерность часового потребления воды усредняется. Это позволяет не учитывать часовой гра-

фик давления насосных станций, который сильно коррелирует с водопотреблением, и упростить математическое описание потребления электроэнергии. Разработанная базовая многофакторная модель суточного электропотребления в системе водоснабжения описывается зависимостью

$$W = f(Q_1, t_{\text{окр}}) = w_{\text{уд.техн}} Q_1 + at_{\text{окр}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (7)$$

где $w_{\text{уд.техн}}$ – удельный технологический расход (коэффициент регрессии), кВт·ч/1000 м³; Q_1 – количество поднятой воды, м³; a – коэффициент регрессии при факторе температуры окружающей среды, кВт·ч/°C; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C; $W_{\text{усл.пост}}$ – условно-постоянная составляющая расхода электроэнергии, кВт·ч.

Для системы водоотведения суточная модель потребления электроэнергии определяется наличием автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП). Например:

– для предприятий с неавтоматизированным процессом очистки стоков математическая модель имеет вид

$$W = w_{\text{уд.техн}} Q_{\text{сток}} + at_{\text{окр}} + bN_{\text{осад}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{сток}}$ – объем стоков, тыс. м³; $N_{\text{осад}}$ – количество выпавших атмосферных осадков, мм; a – коэффициент регрессии перед фактором температуры окружающей среды, кВт·ч/°C; b – то же перед фактором количества выпавших атмосферных осадков, кВт·ч/мм;

– для предприятий при наличии АСУТП

$$W = w_{\text{уд.техн}} Q_{\text{сток}} + at_{\text{окр}} + bN_{\text{осад}} + W_{\text{хим}} + W_{\text{усл.пост}}, \quad (9)$$

где $W_{\text{хим}}$ – затраты электроэнергии, обусловленные химическим изменением состава стоков, кВт·ч,

$$W_{\text{хим}} = (c \cdot \text{ХПК} + d \cdot \text{БПК}_5 + e \cdot \text{NH}_4), \quad (10)$$

ХПК, БПК₅, NH₄ – химические показатели сточных вод, мг/л; c, d, e – коэффициенты регрессии перед факторами ХПК, БПК₅ и NH₄, (кВт·ч·л)/мг.

Модель удельного расхода электроэнергии в общем виде может быть представлена

$$W_{\text{уд}} = w_{\text{уд.техн}} + \frac{\sum x_k b_k + b_0}{Q} = w_{\text{уд.техн}} + \frac{W_{\text{факт}} + W_{\text{усл.пост}}}{Q}, \quad (11)$$

где Q – объем производства продукции, тыс. м³; $w_{\text{уд.техн}}$ – технологический расход электроэнергии, кВт·ч; x_k, b_k – включенный в модель фактор и ко-

эффицент регрессии модели; b_0 – свободный член уравнения регрессии; $W_{\text{факт}}$ – расход электроэнергии, обусловленный включением в модель различных факторов, не связанных с технологическими, кВт·ч.

Сформированные математические закономерности позволяют одновременно решать множество актуальных задач. К таким задачам относятся вопросы, связанные с прогнозированием, оценкой текущего состояния и мониторингом ЭЭФ, выбором приоритетных направлений энергосбережения и поиском резервов экономии ТЭР. Зависимости изменения удельного расхода электрической энергии в системе водоснабжения, построенные по разработанным моделям, приведены на рис. 5.

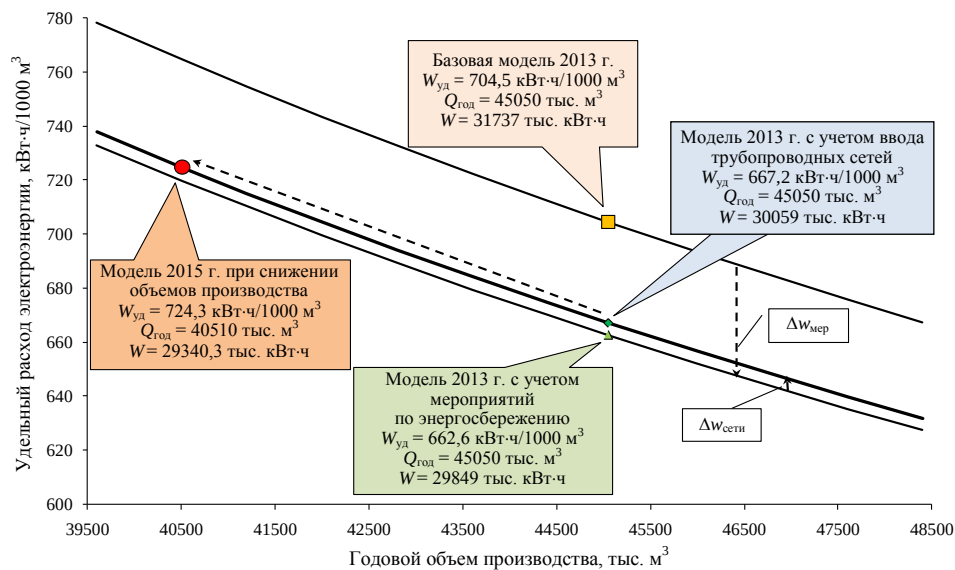


Рис. 5. Изменение удельного расхода модели при внедрении энергосберегающих мероприятий и вводе в эксплуатацию трубопроводных сетей

Fig. 5. The change in specific consumption models under the conditions of energy saving activities implementation and commissioning of pipeline networks

На основании полученных зависимостей установлено:

- 1) внедренные энергосберегающие мероприятия при существующем объеме производства обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии с 704,5 до 662,6 кВт·ч/ тыс. м³;
- 2) ввод в эксплуатацию новых трубопроводных сетей снижает эффект от мероприятий по энергосбережению, в результате чего удельный расход электроэнергии возрастает до 667,2 кВт·ч/тыс. м³;
- 3) наиболее значимым фактором, формирующим удельный расход электроэнергии, является производственная программа. Из-за снижения объемов воды с 45050 до 40510 тыс. м³/год удельный расход электроэнергии возрастает до 724,3 кВт·ч/тыс. м³, что полностью съедает эффект от внедренных мероприятий по энергосбережению.

Погрешность годового прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии при верификации результатов моделирования с данными статистической отчетности предприятия на примере системы водоотведения составила менее 1,0 % с квартальным разбросом от (–3,3) % до 3,6 %, что отражено на рис. 6.

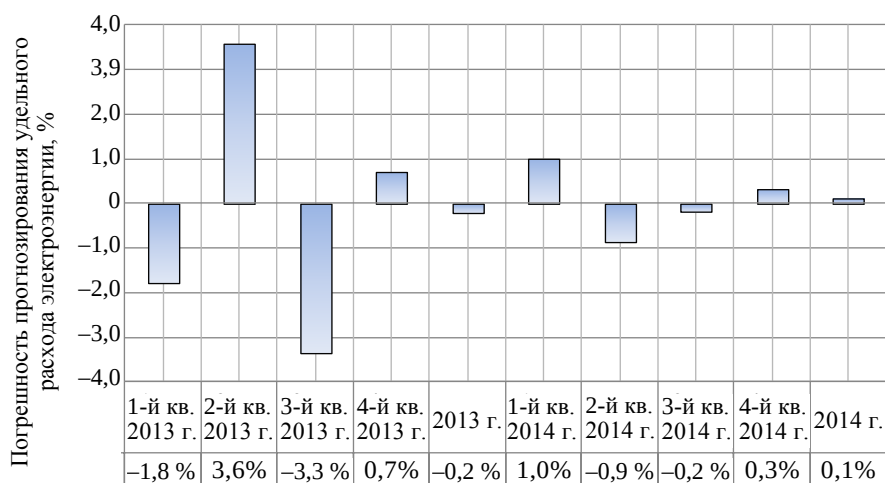


Рис. 6. Верификация модели электропотребления: ■ – погрешность, %

Fig. 6. Verification of the energy consumption model: ■ – error, %

ВЫВОДЫ

1. Сформирована система управления энергетической эффективностью для трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения, основа которой – информационная база данных суточной статистики энергетических, гидравлических и производственных показателей водоканализационного хозяйства.

2. Разработаны модели электропотребления в технологических системах водоснабжения и водоотведения, являющиеся основой для решения задач прогнозирования и оценки текущего состояния энергоэффективности работы предприятий, выбора приоритетных направлений энергосбережения и поиска резервов экономии топливно-энергетических ресурсов.

3. Погрешность годового прогнозирования общих и удельных расходов электроэнергии при верификации результатов многофакторного моделирования с фактическими данными статистической отчетности исследуемого предприятия составила менее 1,0 % с квартальным разбросом от –3,3 до 3,6 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об итогах работы в 2014 году и задачах по повышению эффективности работы и модернизации жилищно-коммунального хозяйства на 2015 год [Электронный ресурс]: поста-

- новление коллегии Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 28 января, № 1. Режим доступа: mjks.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc. Дата доступа: 18.03.2016.
2. Углубленный обзор политики и программ в сфере энергоэффективности Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Секретариат энергетической хартии, 2013. Режим доступа: http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus_ee_2013_rus.pdf. Дата доступа: 18.03.2016.
 3. Положение по нормированию расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве Республики Беларусь [Электронный ресурс]: утв. постановлением Комитета по энергоэффективности при Совете Министров Республики Беларусь, 19.11.2002, № 9 // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2009/num31/d31029.html>. Дата доступа: 18.11.2015.
 4. Энергоэффективность и энергетическая безопасность в Содружестве Независимых Государств [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций, 2011. Режим доступа: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece_energy_44_r.pdf. Дата доступа: 11.08.2006.
 5. Грунтович, Н. В. Расчетно-аналитический метод нормирования расходов электрической энергии в технологических системах водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. 2015. № 2. С. 70–79.
 6. Грунтович, Н. В. Развитие методического обеспечения диагностирования и прогнозирования энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, Д. Р. Мороз, А. А. Капанский // Энергоэффективность. 2015. № 3. С. 20–23.
 7. О Программе развития жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь до 2015 года [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 8 февраля 2013 г., № 97 // Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm0/sov697.htm>. Дата доступа: 18.03.2016.
 8. О Государственной программе по водоснабжению и водоотведению «Чистая вода» на 2011–2015 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь, 15.09.2011, № 1234. Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file4a18314a78f3e347.PDF>. Дата доступа: 18.11.2015.
 9. Карабанов, А. К. Проблемы оценки ресурсов пресных подземных вод на территории Беларуси / А. К. Карабанов, П. С. Лопух, Ю. А. Гледко // Актуальные вопросы инженерной геологии, гидрогеологии и рационального недропользования: материалы IX Университетских геол. чтений, 3 апр. 2015 г., Минск, Беларусь / В. И. Зуй (гл. ред.) [и др.]. Минск: Изд. центр БГУ, 2015. С. 54–56.
 10. Об утверждении и введении в действие Методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь: приказ Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 9 июля 2007 г., № 125 // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.kulichki.com/zak2007/bz12/dcm12308.htm>. Дата доступа: 19.03.2016.
 11. Методические рекомендации по определению потребности в электрической энергии на технологические нужды в сфере водоснабжения, водоотведения и очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Центр муниципальной экономики и права. Москва, 2007. Режим доступа: http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie_rekomendatsii_po_opredele_niyu_potrebности_v_elektricheskoi.pdf. Дата доступа: 18.03.2016.
 12. Методика расчета норм расхода электрической энергии на забор и перекачку воды по групповым магистральным водопроводам [Электронный ресурс]: утв. приказом Председателя Комитета государственного энергетического надзора и контроля Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, 24 дек. 2012 г. № 122-п. Режим доступа: http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya_doks/1._metodika_rascheta_norm_raskhoda_elektricheskoy_energii_na_zabor_i_perekachku_vody.pdf. Дата доступа: 19.03.2016.

13. Инструкция по расчету целевых показателей по энергосбережению для предприятий и организаций жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь: утв. постановлением Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, 01.08.2007, № 40. Режим доступа: [http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214\(045-053\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214(045-053).pdf). Дата доступа: 13.03.2016.
14. Об утверждении методических рекомендаций по планированию, учету производственных затрат и калькулированию себестоимости услуг (продукции, работ) в жилищно-коммунальном хозяйстве: приказ Министерства жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь, 27 августа 2010 г., № 126а // Право. Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2013/num13/d13050.html>. Дата доступа: 13.03.2016.
15. Токочакова, Н. В. Расчетно-статистические модели режимов потребления электроэнергии как основа нормирования и оценки энергетической эффективности / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Энергоэффективность. 2006. № 1. С. 14–15; 2006. № 2. С. 14–15.
16. Грунтович, Н. В. Диагностирование и прогнозирование показателей энергоэффективности технологических систем водоснабжения и водоотведения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский // Инновации в энергосбережение – инвестиции в будущее: международный форум. Витебск: Витебский областной центр маркетинга, 2015. С. 47–51.

Поступила 18.01.2016 Подписана в печать 16.03.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. *On the Results of the Activity in 2014 and Objectives to Improve the Efficiency and to Retrofit of Housing and Communal Services in 2015*. The Resolution of the Collegium of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services of Jan. 28, No 1. Mode of Access: mjkx.gov.by/uploaded/2012/Itogi2014/Itogi2014Z2015.doc. Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
2. Energy Charter Secretariat (2013) *Profound Review of Policies and Programmes in the Area of Power Energy Efficiency of the Republic of Belarus*. Mode of Access: http://belgium.mfa.gov.by/docs/belarus_ee_2013_rus.pdf. Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
3. The Provision on Rationing of Consumption of Fuel, Thermal and Electric Energy in the National Economy of the Republic of Belarus: Approved by the Resolution of the Committee on Energy Efficiency at the Council of Ministers of Belarus, 19.11.2002, No 9. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2009/num31/d31029.html>. Date of Access: 18 Nov. 2015 (in Russian).
4. Power Efficiency and Power Security in the Commonwealth of Independent States. *United Nations*. 2001. Mode of Access: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ece_energy_44_r.pdf. Date of Access: 11 Aug., 2006 (in Russian).
5. Gruntowych N. V., Kapansky A. A. (2015) Analytical Method for the Valuation of Costs of Electric Power in the Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Vestnik Gomelskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni P. O. Sukhogo* [P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel], (2), 70–79 (in Russian).
6. Gruntowych N. V., Moroz D. R., Kapansky A. A. (2015) Development of Methodical Support of Diagnostics and Prediction of Energy Efficiency of Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (3), 20–23. (in Russian).
7. On the Program of the Republic of Belarus Housing Utilities Development till 2015. The Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 8 Feb. 2013, No 97. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://pravo.newsby.org/belarus/postanovsm0/sovsm697.htm>. Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
8. *On the State Programme on Water Supply and Sanitation “Clean Water” for 2011–2015*. The Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 15.09.2011, No 1234. Mode of Access: <http://www.government.by/upload/docs/file4a18314a78f3e347.PDF>. Date of Access: 18 Nov. 2015 (in Russian).

9. Karabanov A. K., Lopuch P. S., Gledko Yu. A. (2015) Problems of the Assessment of Resources of Fresh Underground Waters in the Territory of Belarus. *Aktualnye Voprosy Inzhenernoi Geologii, Gidrogeologii i Ratsionalnogo Nedropolzovaniia: Materialy IXth Universitetskikh Geol. Chtenii* [Topical Problems of the Engineering Geology, Hydrogeology and Rational Use of Mineral Resources: Proceedings of the IX University Geology Readings]. Minsk, Izd. Tsentr of BSU [BSU Publishing Center], 2015. 54–56 (in Russian).
10. On Approval and Introduction of the Technique of Rationing of Fuel and Energy Resources for Businesses and Organizations of Housing and Communal Services of Belarus: the order of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services, July 9, 2007, No 125. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://pravo.kulichki.com/zak2007/bz12/dcm12308.htm>. Date of Access: 19 March 2016 (in Russian).
11. Municipal Center for Economics and Law (2007) *Methodic Recommendations for Determining Requirements for Electric Power for Technological Needs in Water Supply, Sanitation and Wastewater Treatment*. Moscow. Mode of Access: http://www.os39.ru/file/oksana/metodicheskie_rekomendatsii_po_opredeleniyu_potrebности_v_elektricheskoi.pdf. Date of Access: 18 March 2016 (in Russian).
12. *The Method of Calculation of Norms of Consumption of Electric Power on the Seizure and Pumping Water at the Main Water Supply Group*: Approved by the order of the Chairman of the Committee of State Energy Supervision and Control of the Ministry of Industry and New Technologies of the Republic of Kazakhstan of 24 December 2012, No 122-п. Mode of Access: http://www.kazee.kz/userfiles/ufiles/konkursnaya_doks/1._metodika_rascheta_norm_raskhoda_elektricheskoy_energii_na_zabor_i_perekachku_vody.pdf. Date of Access: 19 March 2016 (in Russian).
13. *Instruction for Calculating Targets for Energy Conservation for Enterprises and Organizations of Housing and Communal Services of the Republic of Belarus*: Approved by the Resolution of the State Committee for Standardization of Belarus, 01.08.2007, No 40. Mode of Access: [http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214\(045-053\).pdf](http://www.pravo.by/pdf/2007-214/2007-214(045-053).pdf). Date of Access: 13 March 2016 (in Russian).
14. On the Approval of Methodical Recommendations on Planning, Accounting of Production Expenses and Calculation of Cost of Services (Goods, Works) in the Housing and Utilities Sector. Order of the Ministry of the Republic of Belarus of Housing and Communal Services of 27 August 2010, No 126a. *Right. Legislation of the Republic of Belarus*. Mode of Access: <http://www.levonevski.net/pravo/norm2013/num13/d13050.html>. Date of Access: 13 March 2016 (in Russian).
15. Tokochakova N. V., Moroz D. R. (2006) Estimated Statistical Models of the Modes of Consumption of Electricity as the Basis of Energy Efficiency Valuation and Assessment. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (1), 14–15; (2), 14–15 (in Russian).
16. Gruntowych N. V., Kapansky A. A. (2015) Diagnostics and Forecasting of Energy Efficiency of Technological Systems of Water Supply and Sanitation. *Innovatsii v Energoberezhenie – Investitsii v Budushchee. Mezhdunarodnyi Forum* [Innovations in Energy Efficiency – Investments in the Future. International Forum]. Vitebsk, Vitebsk Regional Center of Marketing, 47–51 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-452-463

UDC 536.42:661.426

Effect of the Fill Ventilation Window on Performance of a Natural Draft Cooling Tower Subjected to Cross-Winds

K. V. Dobrego¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Abstract. Various aerodynamic design elements and technics (wind deflectors, wind walls, etc.) are utilized for improvement of the thermal efficiency of the natural draft cooling towers, particularly in conditions of cross wind. One of the technical methods, proposed by engineers of Belarus Academy of Sciences, is installation of the ventilation window in the center of the fill. This method is substantiated by the fact that the flow of cooling gas obtains maximum temperature and humidity near the center of the under-fill space of cooling tower and, as a consequence, performs minimal heat exchange. The influence of the fill ventilation window and wind deflectors in the inlet windows of the cooling tower on its thermal performance in condition of cross-wind is investigated in the paper numerically. The cooling tower of the “Woo-Jin” power plant (China) 150 m of the height and 114 m of the base diameter was taken as a prototype. The analogy (equivalence) between the heat and mass transfer was taken into consideration, which enabled us to consider single-phase flow and perform complicated 3D simulation by using modern personal computers. Heat transfer coefficient for the fill and its hydrodynamic resistance were defined by using actual data on total flow rate in the cooling tower. The numerical model and computational methods were tested and verified in numerous previous works. The non-linear dependence of the thermal performance of the cooling tower on wind velocity (with the minimum in vicinity of $U_{cr} \sim 8$ m/s for the simulated system) was demonstrated. Calculations show that in the condition of the average wind speed the fill ventilation window doesn’t improve, but slightly decrease (by 3–7 %) performance of the cooling tower. Situation changes in the condition of strong winds $U_{cw} > 12$ m/s, which are not typical for Belarus. Utilization of airflow deflectors at the inlet windows of cooling tower, conversely, increases thermal performance of the cooling tower on 10–12 % for the wide range of winds exceeding 2 m/s. Results of the investigation may be helpful for optimal design of natural draft and perspective “hybrid” cooling towers.

Keywords: cooling tower, numerical simulation, thermal efficiency, cross wind

For citation: Dobrego K. V. (2016) Effect of the Fill Ventilation Window on Performance of a Natural Draft Cooling Tower Subjected to Cross-Winds. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 452–463 (in Russian)

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Влияние вентиляционного отверстия в оросителе на тепловую работу башенной испарительной градирни в условиях ветра

К. В. Доброго¹⁾

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

Реферат. Для улучшения тепловой работы башенных испарительных градирен, особенно в условиях ветровых нагрузок, могут использоваться разнообразные аэродинамические элементы и конструктивные решения (дефлекторы, ветроперегородки и т. п.). Одним из предложений, впервые сформулированных сотрудниками Национальной академии наук Беларуси, было сооружение центрального вентиляционного отверстия в оросителе градирни. Данное конструктивное решение обосновывалось тем, что паровоздушный поток вблизи центра подоросительного пространства градирни имеет максимум температуры и влагонасыщенности и вследствие этого слабо участвует в теплообмене. В статье численно исследуется влияние центрального вентиляционного отверстия в оросителе совместно с ветронаправляющими дефлекторами во входном окне градирни на ее тепловую работу в условиях ветра. В качестве прототипа взята градирня ТЭС «Ву-Джин», Китай, высотой 150 м и диаметром основания 114 м. При расчетах используется аналогия тепло- и массопереноса, что позволяет моделировать аэродинамику однофазного потока и выполнять детальные трехмерные расчеты на современных персональных вычислительных машинах. Коэффициент теплоотдачи оросителя и его гидродинамическое сопротивление устанавливаются в соответствии с экспериментальными данными по общему расходу воздуха в градирне. Численная модель протестирована и верифицирована в ряде предыдущих исследований. Продemonстрирована нелинейная зависимость тепловой производительности БИГ от скорости ветра с минимумом при $U_{cr} \sim 8$ м/с для моделируемой системы. Расчет показал, что при средних скоростях ветра устройство центрального отверстия не увеличивает, а наоборот, несколько уменьшает (на 3–7 %) эффективность работы градирни. Ситуация изменяется при очень сильных ветрах, превышающих 12 м/с, не характерных для условий Беларуси. Использование ветронаправляющих дефлекторов во входном окне градирни, напротив, увеличивает производительность градирни на 10–12 % в широком диапазоне скоростей ветра, превышающих 2 м/с. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации конструкции градирен, в том числе и перспективных градирен гибридного типа.

Ключевые слова: градирня, математическое моделирование, тепловая эффективность, ветровой поток

Для цитирования: Доброго, К. В. Влияние вентиляционного отверстия в оросителе на тепловую работу башенной испарительной градирни в условиях ветра / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 452–463

Natural draft cooling tower (NDCT) is the important element of the recirculation water cooling system for Condensation Power Plants and Nuclear Power Plants. Both processes of heat and mass transfer (latent heat of evaporation) play essential role for water cooling. Hot water is sprayed over the fill – the highly porous system with expanded surface area, – and flowing down it exchanges heat with opposite gas flow. Meanwhile some fraction of water evaporates and humidity of the gaseous flow approaches 100 %. Latent heat of evaporation reduces internal energy (and temperature) of the water. Following that, water drips down to the pool and directed back to condenser (Fig. 1). Total flow rate of the water may be as much as 100 thousand tones per hour at modern power plants and up to 2 % of that may be evaporated and released to atmosphere.

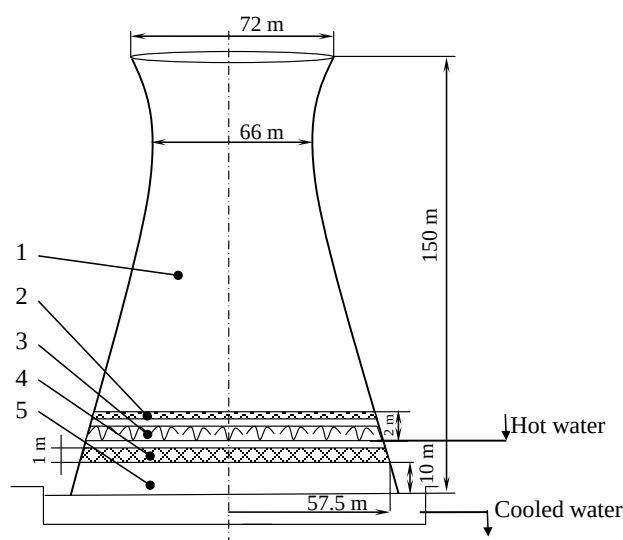


Fig. 1. Natural draft cooling tower scheme: 1 – overshower zone; 2 – drift eliminators; 3 – sprinklers; 4 – fill; 5 – rain zone

Convection in NDCT is defined with internal heat and mass transfer processes as well as with external meteorological conditions: wind speed, temperature, humidity. The effect of the wind is of complicated nature. The total air flow rate and NDCT efficiency is insignificantly effected by weak winds, $U_{cw} \leq 1\text{--}2$ m/s. With wind speed growth the total air flow rate decreases due to throttling of the NDCT outflow face with vortices and throughout flows in the rain zone. Decrease of the NDCT performance continues until the wind speed reaches its “critical” value U_{cr} (within the range from 4 to 10 m/s) and with the further growth of the wind velocity NDCT performance grows.

Numerous papers dedicated to investigation of the wind speed influence on NDCT performance and development of methods of performance improvement in windy conditions [1–9]. D. Derksen and T. Bender [3–5] investigated NDCT performance in windy conditions in their experiments in wind tunnel and by numerical simulation. Among the methods of NDCT performance improvement is installation of wind walls in the rain zone and wind deflectors in the inlet windows of NDCT [6–8]. The mentioned technical solutions were investigated experimentally [6, 8] and by means of CFD tools [7].

Note that experimental study of the innovative designs with the bench scale models is not adequate because of impossibility to satisfy all necessary similarity criterions of the system. Experimentation on real NDCT is very expensive and it is complicated with instability of the ambience meteorological factors. Analytical investigations are limited with simplified and schematic problem statements. State-of-the-art computational experiment let one perform intensive parametric study of NDCT with high reliability and specification of the system [9–12].

Numerous methods for improvement of NDCT performance are discussed in the literature. Among them variation of the sprinkling density, variation of the

design and height of fill, aerodynamic control of the flow, onset of the big scale vortex inside NDCT [13] etc. It is shown in [11] that flow rotation in the over-shower zone intensifies heat and mass transfer in NDCT and shifts condensation zone to periphery of the shell. Technical solutions for rotation onset are discussed in [14]. The paper [15] is dedicated to numerical investigation of influence of wind walls and inlet window deflectors on NDCT performance in conditions of the side wind.

Patent [16] describes technical proposal of a ventilation window creation in the center of fill for the aim of reduction of total aerodynamic resistance of the NDCT, improvement of the rain zone performance, and possible creation of a vortex movement in the central part of a NDCT shell. Experimental data obtained on the bench-scale model confirm bell-type profile of temperature and humidity in the rain zone which substantiates the idea. Basing on the patent, modernization of the Grodno Power Plant-2 was implemented and positive effect obtained. To note, together with the fill ventilation window, inlet window deflectors were installed and this fact makes it impossible to define a specific separate effect of the central window on the NDCT performance.

In this paper investigation of the NDCT equipped with the fill ventilation window as well as with inlet window deflectors was performed numerically. 3D modeling with standard CFD tools [17] was tested and verified in previous works by the author. Total gas mass flow rate G was calculated as a function of the wind speed for different diameters of the fill ventilation window. The performance efficiency parameter η , directly defined via NDCT input and output temperatures T_{wi} , T_{wo} and “wet bulb” temperature was also estimated. Simulation results are discussed. The obtained data may be utilised for optimization of working NDCTs and construction of new ones.

Problem statement

The counter flow natural draft wet cooling tower of Woo-Jin Power Plant, Shanghai, China was selected as a prototype of the simulated system. Its height is 150 m, basement diameter is 114 m and inlet window height – 10 m. Computational domain was a cylinder with the radius and height equal to 500 m (Fig. 2). The domain consisted of 1.8 million structured and unstructured (hybrid) mesh elements. The mesh size was enough for reliable convergence of iterations and it was kept constant for all cases under investigation. The mesh element size was smoothly stretched from NDCT walls to periphery to resolve the high gradient regions.

We considered NDCT equipped with deflectors in inlet windows and ventilation window in fill (Fig 3). Diameter of the ventilation window was varied $D_0 = 2, 4, 8$ и 12 m. Inlet windows deflectors were set at an angle of $\alpha = 72^\circ$ to tangent line, according to recommendations [18]. A standard NDCT not equipped with the mentioned elements (Fig. 3b) was simulated as a reference case.

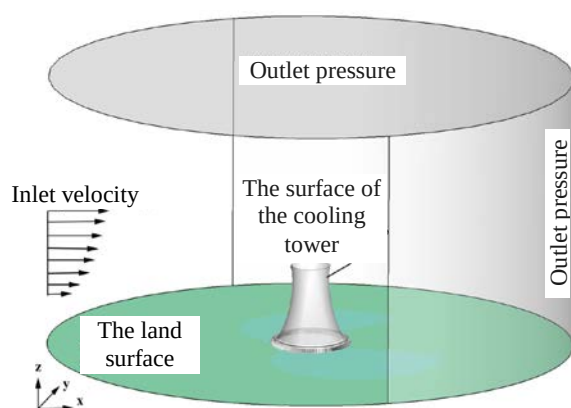


Fig. 2. Computational domain and boundary conditions

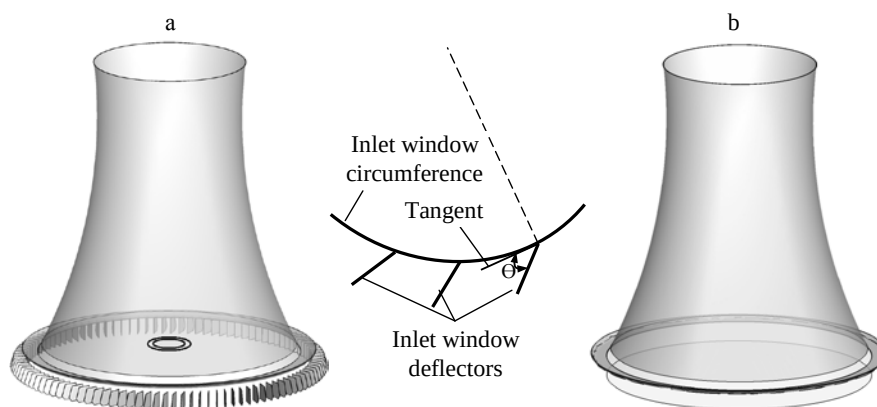


Fig. 3. Scheme of NDCT equipped with deflectors in inlet windows and ventilation window in fill (a) and a standard NDCT (b)

The wind speed vertical distribution was simulated according to the formula [19]

$$\frac{U_{CW}}{U_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{0.2}. \quad (1)$$

The reference value of velocity U_{ref} corresponds to the velocity at the height of 10 m over the land [19]. It is used as an independent parameter for graphs. Simulations were performed for the U_{ref} values laying in the range from 0 to 12 m/s.

The fill of the NDCT together with complimenting elements such as shell supports, spray piping network, fill supports and drift eliminators was simulated by using the Fluent^(R) model of “Radiator”. The temperature assigned to the “radiator” was fixed. The radiator is characterized with two fundamental parame-

ters, – pressure loss coefficient k_f and heat transfer coefficient h_{th} . The pressure gap on “radiator” was expressed in terms of the pressure loss coefficient, air density, and perpendicular velocity component across the surface [20]

$$\Delta p = k_f \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (2)$$

The effective pressure loss coefficients of the tower shell supports, the spray piping network, the fill supports, and the drift eliminators were set to $k_{tsh} = 0.5$, $k_{spn} = 0.5$, $k_{fs} = 0.5$, $k_{de} = 3.0$ correspondingly, according to D. Kröger [21]. The total pressure loss coefficient was obtained as a sum of the particular coefficients $k_f = k_{tsh} + k_{spn} + k_{fs} + k_{de} = 4.5$. The value of the heat transfer coefficient for the “radiator” was defined by tuning of h_{th} to the experimentally measured value of the total air mass flow rate in [22].

The rain zone of NDCT was simulated as a highly porous media by Fluent^(R) tools. The porosity value was determined according to estimated volume of droplets in the zone, the average velocity of droplets and total volume of the sprinkled water being known and comprised $m = 0.998$ for the standard parameters of the task. The pressure loss in the rain zone was calculated according to internal procedures of the porous media module of Fluent^(R).

Mathematical Model

In accordance with the stated problem, gas flow was simulated within steady-state Eulerian approach [17]. A single-phase flow is considered, standard k – ε -model of turbulence is adopted. The governing equations for the problem are the Navier – Stokes equations for an incompressible viscous fluid flow, continuity and energy conservation equations:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \bar{\boldsymbol{\tau}} + \rho \mathbf{g}; \quad (4)$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \mu \left[\left(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{v} \mathbf{I} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v}(\rho E + p)) = 0. \quad (6)$$

Here $\mathbf{I}$ – unit tensor, the second term in the right hand part of (5) represents volumetric viscosity effect; E – internal energy; p – pressure.

Note that the model doesn't consider latent heat of phase transformations. To take into consideration latent heat of phase transformation we accept hy-

pothesis of heat and mass transfer equivalence (analogy), formally written in a following form

$$Q^{th} + Q^{lat} = Q^{tot} = \kappa Q^{th}. \quad (7)$$

Here Q^{th} – convection and conduction heat flow; Q^{lat} – heat flow defined by phase transformation (evaporation); κ – constant coefficient.

The equivalence hypothesis is commonly used in the similar cases if evaporation rate is low (the system is far from boiling parameters). The criterion of applicability of the hypothesis may be written as follows [23]

$$b = \frac{j_{ci}}{\rho \omega_0} \frac{1}{St_0} < 0.1, \quad (8)$$

where j_{ci} – mass flow rate normal to the phase transformation surface; ρ – liquid density; ω_0 – gas flow velocity far from surface (out of boundary layer); St_0 – Stanton number calculated ignoring mass transfer.

Estimates show that $b \approx 10^{-3} \ll 0.1$ for the considered case, which justify application of the named hypothesis. The constant parameter in (7) is estimated as $\kappa = 2.86$ basing on the data [24].

The influence of the variable humidity on the density of the gaseous flow is neglected. The boundary conditions are applied at the boundaries of the computational domain (Fig. 2) and at solid surfaces of the system. The wind velocity component collinear to wind direction is set according to (1) at the inlet part the boundary.

Air temperature at inlet is set to $T_a = 297.15$ K. The pressure outlet boundary condition is used to define the air static pressure at the domain outlets (top and right-hand side). In calm conditions $U_{ref} = 0$ m/s the boundary conditions are defined by pressure.

B.C. at the entrance surface:

$$v_x|_{inlet} = U_{cw}; \quad v_y|_{inlet} = 0; \quad v_z|_{inlet} = 0; \quad T|_{inlet} = T_{amb} = 297.15 \text{ K}. \quad (9)$$

At the top surface ($H = 500$ m):

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0; \quad T = T_{amb} = 297.15 \text{ K}. \quad (10)$$

At the exit surface of computational domain:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad T = T_{amb} = 297.5 \text{ K}. \quad (11)$$

For the solid surfaces (land, NDCT shell, deflectors) no-slip conditions are applied. Described model was used in [11, 15, 18] and was verified basing on the experimental data on total air flow rate for Minsk Power Plant-4 [25].

Results and discussion

Thermal efficiency of NDCT may be characterized with the value of the total mass flow rate of the cooling air G , as far as G is defined by the heat transferred to cooling air. Functional dependence of $G = G(Q^{tot})$ is not linear in general case. Nevertheless parameter G is a suitable parameter for parametric study and comparison of different regimes of NDCT thermal work.

Total mass flow rate of the cooling air was calculated as a function of the wind speed for the cases of ventilation windows radiuses $R = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ m and for the case of absence of ventilation window (Fig. 4). Corresponding area of the window related to total area of fill is:

$$S^0/S = 1.23 \cdot 10^{-3}; 4.9 \cdot 10^{-3}; 1.11 \cdot 10^{-2}; 1.97 \cdot 10^{-2}; 3.1 \cdot 10^{-2} \text{ and } 4.4 \cdot 10^{-2}.$$

The case marked as “standard” on the graph corresponds to the simplest (without ventilation window and deflectors) design of the NDCT.

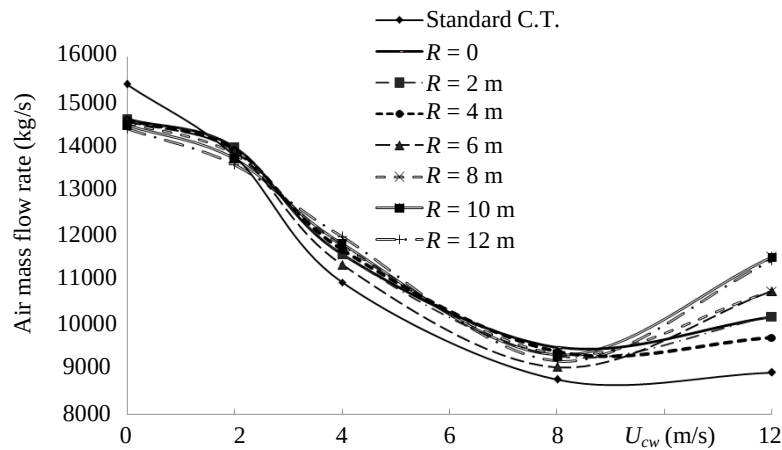


Fig. 4. Total mass flow rate of cooling air G as a function of wind speed U_{cw} . Radius of the ventilation window is presented on the graph field. Standard C.T. – standard design of NDCT

Computations show that input window deflectors improve thermal performance of NDCT at any practical wind condition as far as wind calm $U_{cw} < 1$ m/s is very rare case in Belarus. The effect of decrease of the total mass flow rate of cooling air at calm is explained with some aerodynamic resistance of the inlet window deflectors. Deflectors provide increase of total mass flow rate of cooling air by approximately 10 % for the typical wind speed, and more in the case of strong air.

Note that the cases with small radius of the ventilation window ($R = 2.4$ m) are quite similar to the case of absence of window. The differences in the total mass flow rates for the mentioned cases are of the order of computational mistakes and time averaging mistakes. More profound effect of the central window one can observe at stronger wind speed $U_{cw} \sim 10$ m/s and more. In this condition

relatively better performance is ensured by bigger windows with area $S^0/S \sim 3\%$ and more.

The commonly used parameter for characterization of NDCT performance is efficiency parameter η , defined via the temperatures of a water at inlet and outlet of the NDCT – T_{wi} and T_{wo} , and the temperature of a wet bulb T_{wb} [24]

$$\eta = \frac{T_{wi} - T_{wo}}{T_{wi} - T_{wb}}. \quad (12)$$

Parameter η characterizes the final aim functionality of cooling tower – temperature reduction of the circulating water taking into consideration physical limitations on performance efficiency connected with ambient air temperature and humidity.

Simulation of the efficiency parameter η is presented in the Fig. 5. The temperature of the wet bulb was considered a constant for all computational cases.

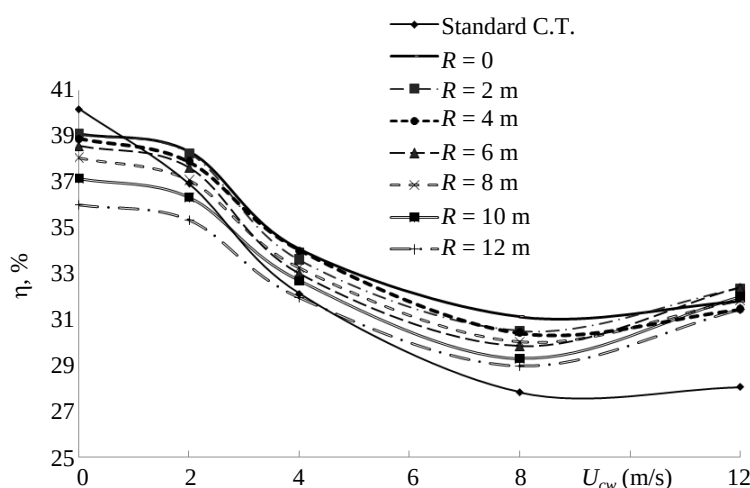


Fig. 5. The efficiency parameter η as a function of a cross-wind speed U_{cw} . Radius of the ventilation window is presented on the graph field. Standard C.T. – standard design of NDCT

The graphs $\eta(U_{cw})$ presented on Fig. 5 let one quantitatively characterize an influence of the ventilation window on the NDCT performance. Computations show that at typical for the central Europe region wind conditions installation of the ventilation window in NDCT fill doesn't improve, but rather impede general thermal performance of NDCT. Situation changes for very strong winds exceeding 12 m/s.

Note that humidity spatial distribution, which may give some advantage to the fill ventilation window technology, was not considered in the model. Taking into account that 1–2 % variability of the relative humidity (order of 50 Pa absolute humidity) may result in only 0.2–0.3 K variability of the recirculation water, general results and conclusions of the modeling would be generally the same.

CONCLUSIONS

Thus, creation of the ventilation windows in fill is not rational for considered in the paper big scale NDCT. The task may be further approached for smaller scale cooling towers and cooling towers operating in conditions of strong cross winds. But for the later case installation of the wind walls, and special inlet window deflectors, NDCT mouth directors etc. should be considered. Creation of the big scale vortex by using oriented sprinkler nozzles [14] also remains one of the perspective technical solution for NDCT performance improvement at average wind velocity conditions.

In view of development of the NDCT simulation program it would be interesting to take into consideration humidity distribution in the system.

Nomenclature

G_a – air mass flow rate, kg/s; $G_{a,0}$ – mass flow rate of air in windless condition, kg/s; g – gravity acceleration, m/s^2 ; H – height of inlet window of NDCT, m; j_{ci} – mass flow rate normal to interface surface, $kg/m^2/s$; κ – constant parameter; m – porosity; p – pressure, Pa; Q – heat power, kW; Q^h – heat power provided by convective heat transfer, kW; Q^{lat} – latent heat power provided by evaporation of water, kW; St_0 – Stanton number in the absence of mass transfer; S – total fill area, m^2 ; S^0 – fill ventilation window area, m^2 ; T – temperature, K; $U_{c,w}$ – cross-wind velocity, m/s; U_{ref} – wind velocity reference speed for (1), m/s; U_{cr} – critical velocity of cross wind, m/s; v – скорость, м/с. **Greek Symbols:** μ – dynamic viscosity, Pa·s; η – NDCT efficiency parameter; ρ – density, kg/m^3 ; ω_0 – stream velocity out of boundary layer, m/s. **Subscripts:** ave – average value; a – air; tot – total or integral value; i – initial value; w – water; o – outlet face value; cw – cross wind.

REFERENCES

1. Ming Gao, Feng-Zhong Sun, Kai Wang, Yue-tao Shi, Yuan-bin Zhao (2008) Experimental Research of Heat Transfer Performance on Natural Draft Counter Flow Wet Cooling Tower Under Cross-Wind Conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 935–941.
2. Caytan Y., Fabre L. (1989) Wind Effects on the Performance of Natural Draft Wet Cooling Towers, Comparison of Constructors Proposals and Realization of Performance Control Tests. *International Cooling-Tower Conference*. Proceedings, 21 (17), Ref. Number 21068013.
3. Bender T. J., Bergstrom D. J., Rezkallah K. S. (1996) A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 3. Wind All Study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 64 (1), 73–88. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00085-2.
4. Derksen D. D., Bender T. J. (1996) A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 1. Wind Tunnel Study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 64 (1), 47–59. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00084-0.
5. Bender T. J., Bergstrom D. J., Rezkallah K. S. (1996) A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 2. Wind All Study. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 64 (1), 61–72. DOI: 10.1016/S0167-6105(96)00083-9.
6. Madad-Nia J., Koosha H., Mirzaei M. (2008) Effect of Wind Break Walls on Performance of a Cooling Tower Model. *Mech. & Aerospace Eng. Journal*, 3 (4), 61–67.
7. Al-Waked R., Behnia M. (2005) The Effect of Windbreak Walls on the Thermal Performance of Natural Draft Dry Cooling Towers. *Heat Transfer Engineering*, 26 (8), 50–62. DOI: 10.1080/01457630591003763.
8. Wang K., Sun F. Z., Zhao Y. B., Gao M., Ruan L. (2010) Experimental Research of the Guiding Channels Effect on the Thermal Performance of Wet Cooling Towers Subjected to Cross-Winds – Air Guiding Effect on Cooling Tower. *Applied Thermal Engineering*, 30 (5), 533–538. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.10.015.

9. Al-Waked R. (2010) Cross-Winds Effect on the Performance of Natural Draft Wet Cooling Towers. *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (1), 218–224. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.07.012.
10. Wang K., Sun F. Z., Zhao Y. B., Gao M., Shi Y. T. (2008) Three-Dimensional Regularities of Distribution of Airinlet Characteristic Velocity in Natural-Draft Wet Cooling Tower. *Journal of Hydrodynamics*, 20 (3), 323–330.
11. Kashani M. M. H., Dobrego K. V. (2013) Heat and Mass Transfer in the Over-Shower Zone of a Cooling Tower with Flow Rotation. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (6), 1490–1499. DOI: 10.1007/s10891-013-0978-9.
12. Al-Waked R., Behnia M. (2006) CFD Simulation of Wet Cooling Towers. *Applied Thermal Engineering*, 26 (4), 382–395. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.06.018.
13. Solodukhin A. D., Dikun V. S., Pavliukevich N. V., Fisenko S. N., Dashkov G. V., Vykhota S. O., Davidenko V. F., Zhdanov V. L., Khomich A. S., Slizhevskii Iu. M., Vlasov A. V., Ganzhin V. A. (1996) Cooling Tower. Patent of Republic of Belarus No 1293. (in Russian).
14. Dobrego K. V., Davydenko V. F., Koznacheyev I. A. (2016) Use of Oriented Spray Nozzles to Set the Vapor–Air Flow in Rotary Motion in the Superspray Space of the Evaporative Chimney-Type Tower. *Inzhenerno-fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 89 (1), 148–157. DOI: 10.1007/s10891-016-1363-2.
15. Kashani M. M. H., Dobrego K. V. (2016) Effect of Inlet Window Deflectors and Windbreak Walls Height on Performance of Natural Draft Cooling Tower under Cross-Wind Condition. *Heat Transfer Engineering*, 188 (3), 1–9. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2016010960 (in print).
16. Vlasov A. V., Davidenko V. F., Dashkov G. V., Martynenko O. G., Rodzevich V. A., Solodukhin A. D., Stolovich N. N., Tjutjuma V. D., Dikun V. S., Hasanevich L. S. (1998) Cooling Tower. Patent of Republic of Belarus No 2447 (in Russian).
17. ANSYS® Academic Research, Release 14.5, Help System, FLUENT, ANSYS, Inc.
19. Panofsky H. A., Dutton J. A. (1984) *Atmospheric Turbulence. Models and Methods for Engineering Applications*. New York, Wiley Press. 397.
20. Petruchik A., Fisenko S. (2001) Simulation of Natural Draft Cooling Tower Performance. *The 12th IAHR Symposium in Cooling Tower and Heat Exchangers*. Sydney, Australia, 80–86.
21. Kröger D. G. (2004) *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers. Vol. 1. USA*, Penn-Well Books. 502.
22. Vlasov A. V., Dashkov G. V., Solodukhin A. D., Fisenko S. P. (2002) Investigation of the Internal Aerodynamics of the Chimney-Type Evaporative Cooling Tower. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 75 (5), 1086–1091 (in Russian).
23. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. (1981) *Heat transfer*. Moscow, Energoizdat, 292–294 (in Russian).
24. Petruchik A. I., Fisenko S. P. (1999) Mathematical Modeling of Evaporative Cooling of Water Films in Water-Cooling Towers. *Inzhenerno-fizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 72 (1), 43–49 (in Russian).
25. Solodukhin A. D., Dashkov G. V. (2011) Research Report No 20113267, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus. Minsk (in Russian, Unpublished).

Received: 5 April 2016 Accepted: 3 June 2016 Published online: 26 September 2016

ЛИТЕРАТУРА

1. Experimental Research of Heat Transfer Performance on Natural Draft Counter Flow Wet Cooling Tower under Cross-Wind Conditions / Ming Gao [et al.] // *International Journal of Thermal Sciences*. 2008. Vol. 47, No 7. P. 935–941.
2. Caytan, Y. Wind Effects on the Performance of Natural Draft Wet Cooling Towers, Comparison of Constructors Proposals and Realization of Performance Control Tests / Y. Caytan, L. Fabre // *International Cooling-Tower Conference. Proceedings*. 1989. Vol. 21, No 17. Ref. Number 21068013.
3. Bender, T. J. A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 3. Wind All Study / T. J. Bender, D. J. Bergstrom, K. S. Rezkallah // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1996. Vol. 64, No 1. P. 73–88.

4. Derksen, D. D. A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 1. Wind Tunnel Study / D. D. Derksen, T. J. Bender // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1996. Vol. 64, No 1. P. 47–59.
5. Bender, T. J. A Study on the Effects of Wind on the Air Intake Flow Rate of a Cooling Tower: Part 2. Wind All Study / T. J. Bender, D. J. Bergstrom, K. S. Rezakallah // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1996. Vol. 64, No 1. P. 61–72.
6. Madad-Nia, J. Effect of Wind Break Walls on Performance of a Cooling Tower Model / J. Madad-Nia, H. Koosha, M. Mirzaei // *Mech. & Aerospace Eng. Journal*. 2008. Vol. 3, No 4. P. 61–67.
7. Al-Waked, R. The Effect of Windbreak Walls on the Thermal Performance of Natural Draft Dry Cooling Towers / R. Al-Waked, M. Behnia // *Heat Transfer Engineering*. 2005. Vol. 26, No 8. P. 50–62.
8. Experimental Research of the Guiding Channels Effect on the Thermal Performance of Wet Cooling Towers Subjected to Cross-Winds – Air Guiding Effect on Cooling Tower / K. Wang [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30, No 5. P. 533–538.
9. Al-Waked, R. Crosswinds Effect on the Performance of Natural Draft Wet Cooling Towers / R. Al-Waked // *International Journal of Thermal Science*. 2010. Vol. 49, No 1. P. 218–224.
10. Three-Dimensional Regularities of Distribution of Airinlet Characteristic Velocity in Natural-Draft Wet Cooling Tower / K. Wang [et al.] // *Journal of Hydrodynamics*. 2008. Vol. 20, No 3. P. 323–330.
11. Kashani, M. M. H. Heat and Mass Transfer in the Over-Shower Zone of a Cooling Tower with Flow Rotation / M. M. H. Kashani, K. V. Dobrego // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 6. С. 1490–1499.
12. Al-Waked R. CFD Simulation of Wet Cooling Towers / R. Al-Waked, M. Behnia // *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26, Issue 4. P. 382–395.
13. Градирня: пат. 1293 Респ. Беларусь: МПК F28C 1/00 / А. Д. Солодухин, В. С. Дикун, Н. В. Павлюкевич, С. Н. Фисенко, Г. В. Дашков, С. О. Выхота, В. Ф. Давыденко, В. Л. Жданов, А. С. Хомич, Ю. М. Слижевский, А. В. Власов, В. А. Ганжин; дата публ.: 16.09.1996.
14. Доброго, К. В. Использование ориентированных брызгальных сопел для придания вращения паровоздушному потоку в надросительном пространстве башенной испарительной градирни / К. В. Доброго, В. Ф. Давыденко, И. А. Козначеев // *Инженерно физический журнал*. 2016. Т. 89, № 1. С. 148–157.
15. Kashani, M. M. H. Effect of Inlet Windows Deflectors and Windbreak Walls Height on Performance of Natural Draft Cooling Tower under Cross-Wind Condition / M. M. H. Kashani, K. V. Dobrego // *Heat Transfer Engineering*. 2016. Vol. 188, No 3. P. 1–9.
16. Градирня: пат. Респ. Беларусь 2447: МПК F28C 1/00 / А. В. Власов, В. Ф. Давыденко, Г. В. Дашков, О. Г. Мартыненко, В. А. Родзевич, А. Д. Солодухин, Н. Н. Столович, В. Д. Тютюма, В. С. Дикун, Л. С. Хасаневич; дата публ. 30.12.1998.
17. ANSYS® Academic Research, Release 14.5, Help System, FLUENT, ANSYS, Inc.
19. Panofsky, H. A. Atmospheric Turbulence. Models and Methods for Engineering Applications / H. A. Panofsky, J. A. Dutton. New York: Wiley Press, 1984. 397 p.
20. Petruchik, A. Simulation of Natural Draft Cooling Tower Performance / A. Petruchik, S. Fisenko // *The 12th IAHR Symposium in Cooling Tower and Heat Exchangers*. Sydney, Australia, 2001. P. 80–86.
21. Kröger, D. G. Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers. Vol. 1 / D. G. Kröger. USA: PennWell Books, 2004. 502 p.
22. Исследование внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни / А. В. Власов [и др.] // *Инженерно физический журнал*. 2002. Т. 75, № 5. С. 1086–1091.
23. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. С. 292–294.
24. Петручик, А. И. Математическое моделирование испарительного охлаждения пленок воды в градирнях / А. И. Петручик, С. П. Фисенко // *Инженерно-физический журнал*. 1999. Т. 72, № 1. С. 43–49.
25. Отчет о НИР № 20113267 / А. Д. Солодухин Г. В. Дашков; Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 2011.

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-464-478

УДК 622.276

О повышении энергетической безопасности Беларуси

С. Н. Осипов¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Энергетическая безопасность государства обеспечивается минимально необходимым соотношением собственных и импортируемых энергоресурсов. Поэтому в энергетической отрасли следует увеличить энергосбережение с помощью использования собственных энергоресурсов. За последние сто лет развития геологической науки установлена преимущественная приуроченность нефтегазовых месторождений к зонам (блокам) геологических разломов, многие из которых достигают поверхности фундамента нашей планеты. Сложный процесс нефтегазообразования определяется геологическими, геохимическими, гидрогеологическими и другими факторами. При этом существуют концепции органического и неорганического происхождения нефти и газа. Образование существенных нефтегазовых месторождений возможно при наличии высокопористых и трещиноватых пород (нефть) или так называемых газовых ловушек. Перспективными для открытия существенных нефтегазовых месторождений являются центральные и южные районы Припятского прогиба и районы на границах Микашевичско-Житковичского выступа. Требуют внимательного изучения геологические условия районов в южной части Подляско-Брестской и северо-восточной части Оршанской впадин. В области Белорусской антеклизы, особенно вблизи Балтийской синеклизы, на больших глубинах в пористых породах возможно наличие нефтегазовых месторождений неорганического происхождения. Применение весьма эффективного плазменно-импульсного воздействия на нефтегазовые подземные коллекторы требует изучения целесообразности их использования на новых и ранее отработанных месторождениях. При разведке полезных ископаемых следует также применять такие «экзотические» методы, как оценка выделений гелия, радоновый радиоактивный анализ и др. Это нужно для обнаружения возможных разломных зон и перспективного поиска углеводородных энергоресурсов. Чтобы обеспечить энергетическую безопасность Беларуси, следует оценить возможность использования попутных газов для газоснабжения значительной части страны. Известные природные запасы углеводородов уже в ближайшем будущем позволят добиться энергетической безопасности республики.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, нефтегазовые месторождения, углеводороды, геологические разломы, Припятский прогиб, плазменно-импульсное воздействие, попутные газы

Для цитирования: Осипов, С. Н. О повышении энергетической безопасности Беларуси / С. Н. Осипов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 464–478

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС
имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
Government Enterprise “Institute of Habitation –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15 F. Skorina str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

On Increasing Energy Security of Belarus

S. N. Osipov¹⁾

¹⁾Government Enterprise “Institute of Habitation – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Energy security is provided by the minimum required ratio of domestic and imported energy resources. Therefore, in the energy sector energy efficiency should be increased through the use of its own energy resources. Over the last hundred years of development of geological science a preferential distribution of oil and gas fields to areas (blocks) of geological faults, many of which reach the surface of the foundation of our planet, has been determined. The complex process of oil and gas formation is predetermined by geological, geochemical, hydrogeological and other factors. The concepts of organic and inorganic origin of oil and gas are also relevant in the context under consideration. The formation of sufficient oil and gas fields is possible in the presence of highly porous and fractured rocks (for oil) or so-called gas traps. Promising for the discovery of sufficient oil and gas fields are the central and southern areas of the Pripyat trough and the areas on the borders Mikashevichsi-Zhitkovichi ledge. The geological conditions of the areas in the Southern part of the Podlaska-Brest and the North-Eastern part of the Orsha troughs require most thorough investigations. In the area of the Belarusian anteklise, especially near the Baltic syncline, at great depths in porous rocks the presence of oil and gas deposits of inorganic origin is possible. The use of plasma-pulse impact (that is a very effective one) on the oil and gas underground reservoirs requires a study of the feasibility of their use in new and existing waste deposits. In the exploration of minerals such “exotic” methods, as the assessment of the discharge of helium, radon, radioactive analysis, etc. should also be applied. It is necessary to detect a possible fault zones and prospective search of hydrocarbon energy resources. To ensure energy security of Belarus, the evaluation of the possibility of using associated gas to supply with it a significant part of the country should be fulfilled. The reputed natural deposits of hydrocarbons in the near future will allow us to achieve energy security of the Republic of Belarus in the near future.

Keywords: energy security, oil and gas deposits, hydrocarbons, geological faults, Pripyat trough, plasma-pulse impact, associated gases

For citation: Osipov S. N. (2016) On Increasing Energy Security of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 464–478 (in Russian)

Энергетическая безопасность государства обеспечивается минимально необходимым соотношением собственных и импортируемых энергоресурсов. Пока это соотношение менее необходимого для нашей республики. Поэтому Президент Республики Беларуси постоянно требует от энергетиков и других отраслей увеличения доли использования собственных энергоресурсов и энергосбережения. Так, в 2015 г. глава государства выдвинул предположение, что в стране еще имеются месторождения природных ресурсов, кроме уже открытых. В связи с этим инициировано обсуждение возможности открытия неизвестных ранее залежей углеводородов (нефти, газа, угля и сланца) в недрах Беларуси.

Как показывают исследования автора статьи, проведенные за последние 60 лет [1, 2] и направленные на изучение образования газа метана в угольных пластах, его движения и выделения в атмосферу [3], залежи углеводородов в недрах могут образовываться в определенных областях геологических структур, расположенных на различных глубинах. Особый интерес представляют условия и процессы образования углеводородов

в недрах нашей планеты. Здесь, в принципе, возможны два варианта: органическое [3, 4] и минеральное происхождение [5] углеводородных залежей. Как отмечает В. П. Гаврилов [6, с. 113], одним из первых, кто высказал научно обоснованную концепцию органического происхождения нефти, был М. В. Ломоносов, а неорганического – Д. И. Менделеев (1876 г.).

Формирование зон нефтегазонакоплений зависит от тектонического режима развития геологических разломов в период накопления осадочного чехла земной коры [6, с. 115]. Современная геология установила, что сложный процесс нефтегазонакопления определяется геологическими, геохимическими, гидрогеологическими и другими факторами. Самые важные факторы для образования скоплений углеводородов в земной коре – это развитие ловушек, коллекторов, гидродинамического режима подземных вод, миграции.

Известно положительное влияние разломов на формирование месторождений нефти и газа [6, с. 118]. В нижних осадочных комплексах, как правило, максимальные запасы концентрируются в приразломной полосе шириной 15–20 м. Чем ближе к земной поверхности, тем большее удаление от разлома залежей нефти и газа возможно (40–60 км). Геологические нарушения (дизъюнктивные, т. е. с разрывом и смещением пород), называемые разломами, могут быть «открытого» и «закрытого» типов [3, с. 135–142, 224–242]. При «открытом» типе дизъюнктивных нарушений происходят интенсивное удаление (по различным причинам) углеводородов из приразломной зоны и перенос в более удобные для накопления геологические структуры (например, куполообразные) или вынос в земную атмосферу. При «закрытом» типе нарушений углеводороды обычно накапливаются в указанных выше пределах приразломной зоны.

Известные белорусские нефтегазовые месторождения расположены в зоне разломов юго-западнее Гомеля и приурочены к северной зоне Припятского прогиба. Примерно в такой же зоне расположено Старобинское месторождение калийных солей (г. Солигорск), при разработке которого встречаются очаги газодинамических явлений с высокими давлениями смесей азота с углеводородными газами, поступившими туда из водных растворов калийных и подстилающих горизонтов [7, с. 89–116]. При этом максимальное пластовое давление соляных водных растворов достигает до 44,1 МПа, что обычно соответствует максимальной глубине до 4000 м, а возраст образования очагов газодинамических явлений можно оценить в 300 млн лет [7, с. 116]. Однако в [8, с. 76] сказано, что кристаллический фундамент Старобинского месторождения калийных солей вскрыт двумя скважинами на глубинах 1659 и 2104 м. Следовательно, либо часть водно-соляных растворов поступает из пород или разломов кристаллического фундамента, либо в наносах имеются зоны аномально высоких давлений этих растворов.

Особый интерес представляют выводы В. Н. Николаевского [9, с. 27], который обобщил результаты исследований изменения трещиноватости горных пород с глубиной в земной коре. Обнаружено, что на глуби-

нах 6–7 км и более при существовании открытой пористости в осадочных породах наступает хрупкое разрушение кристаллического фундамента. Углеводородные жидкости могут находиться в форме газоконденсата в «корнях» разломов и даже подпитываться метаном из коры и мантии земли, что подтверждается данными сверхглубокого бурения.

Как установлено лабораторными [8, с. 36] и аналитическими [3] исследованиями, движение природных газов из глубин земной коры происходит в основном (кроме гейзеров и подобных явлений) за счет диффузии через воду и осадочные породы. При этом коэффициенты диффузии углеводородных газов в воде составляют [8, с. 36]: метан CH_4 – $2,2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$; этан C_2H_6 – $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$; пропан C_3H_8 – $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$; гексан C_6H_{14} (в дистиллированной воде) – $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициенты диффузии паров гексана во влажных (26–28 %) глинах, их смесях с песком и кварцевом песке таковы: 0,155; 0,25; 0,12; 0,17 и 0,061 $\text{см}^2/\text{с}$, что примерно на порядок меньше, чем для воды. Кроме этого, примерно такое же различие наблюдается при диффузии газов вдоль и поперек напластования пород [3], что приводит к ускоренной дегазации крутозалегающих отложений по сравнению с пологим. Большое влияние на интенсивность дегазации отложений оказывают дизъюнктивные (разрывные) геологические нарушения «открытого» типа, т. е. доходящие почти до земной поверхности [3, с. 135–142; 224–242], или «закрытого» типа – перекрытые малопроницаемыми отложениями на какой-то глубине от земной поверхности. Примерно такое же влияние на газосодержание и динамику движения природных газов оказывают разломные и приразломные зоны в кристаллическом фундаменте земной коры.

При ориентировочной оценке возможной диффузии углеводородных газов через горные породы к земной поверхности И. В. Высоцкий [8, с. 39] принимает величину коэффициента диффузии $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$, т. е. не учитывает возможный перенос газов подземными водами. Так, из источника газа, залегающего на глубине 1000 м, под давлением около 10 МПа при температуре 40 °С за 10^6 лет с 1 м² земной поверхности может диффундироваться примерно 40 м³ газа. Установление стационарного режима диффузии газа через горные породы в земной коре при указанных идеальных условиях требует сотен тысяч и миллионов лет [10].

Весьма интересные результаты экспериментальных исследований приведены В. Энгельгардтом в [11], где рассмотрены вопросы фильтрации жидкостей и газов в пористых породах. Показано [11, с. 86], что во многих пористых средах проницаемость сильно зависит от содержания солей в водном растворе. Кроме того, отмечено возможное влияние гранулометрического состава песчаников на фильтрационную проницаемость. Так, при медианном диаметре зерен 0,25–0,50 мм в одном из нефтяных песчаников их проницаемость составляла 5700–9900 мкД, а при 0,04 мм в другом месторождении нефти – всего 7–35 мкД, т. е. на 2–3 порядка меньше.

Несомненно большой интерес для оценки нефтегазоносности недр Республики Беларусь представляют результаты многолетних исследований

А. М. Ковхуто [1], проведенных на базе обширного фактологического материала. Здесь особенно важны следующие выводы:

- образование трещин в межсолевых отложениях Припятского прогиба, где расположены известные до настоящего времени промышленные нефтегазовые месторождения Беларуси, начинается обычно при коэффициенте кривизны пласта $9 \cdot 10^{-5}$, а оптимальными участками с повышенной трещиноватостью и улучшенными коллекторскими свойствами являются те, на которых положительные и отрицательные аномалии имеют кривизну более $\pm(10 \cdot 10^{-5})$ [1, с. 9–10]. Это подтверждается получением притока нефти из нижней части пласта в скважине 3 на Каменской площади, которая попадает в зону отрицательной аномалии с коэффициентом кривизны $5 \cdot 10^{-4}$ [1, с. 17];

- при изучении разломов в платформенном чехле и поверхности фундамента установлено, что разломы формируют блоковую структуру в под- и среднесолевых отложениях, имеющую локальные поднятия, которые при определенных характеристиках перспективны по наличию нефтегазонасности. Но для выявления таких структур необходимы детальные исследования с высокой точностью определения простирания и амплитуды локальных разломов, установления зон повышенной трещиноватости с улучшенными коллекторскими свойствами пород [1, с. 15];

- перспективы нефтеносности подсолевых отложений в пределах Гоголевской структуры подтверждаются тем, что они расположены между двумя месторождениями – Притокским и Новинским [1, с. 16];

- по мере удаления от разлома число трещин уменьшается и постепенно сходится на нет [1, с. 7], что аналогично переменной газопроницаемости угольного пласта вблизи плоской обнаженной поверхности [12] или в окрестности скважины [13];

- основные направления разломов – северо-восточное (наиболее древнее) и северо-западное.

Как следует из карты полезных ископаемых дочетвертичных отложений [14] тектонического районирования территории Беларуси [15, с. 14], почти все локальные месторождения нефти расположены примерной полосой с южной стороны вблизи проникающего в чехол суперрегионального разлома. Этот разлом – северная граница Припятского прогиба, который практически является продолжением Днепровско-Донецкого прогиба, богатого углеводородными залежами (газ, уголь). Между этими прогибами расположена Брагинско-Лоевская седловина, ограниченная региональными разломами, проходящими практически нормально к общему направлению прогибов. Зона расположения локальных нефтяных месторождений [16, с. 64], обусловленных блоковой структурой Припятского прогиба, расположена в его северной части и сходится к нулю в северо-западном направлении [14], занимая около 30 % отмеченной нефтеносной площади.

Приуроченность нефтегазовых месторождений к северной части Припятского прогиба, где проходит суперрегиональный разлом, проникающий

в платформенный чехол, может вызвать вопрос о неорганическом происхождении нефти, как это следует из схемы геологического строения на рис. 1 [16, рис. 42]) Александровского и Южно-Александровского месторождений нефти. Однако такие и им подобные месторождения могли образовываться только при наличии ловушек в соответствии с условиями, определенными в [1].

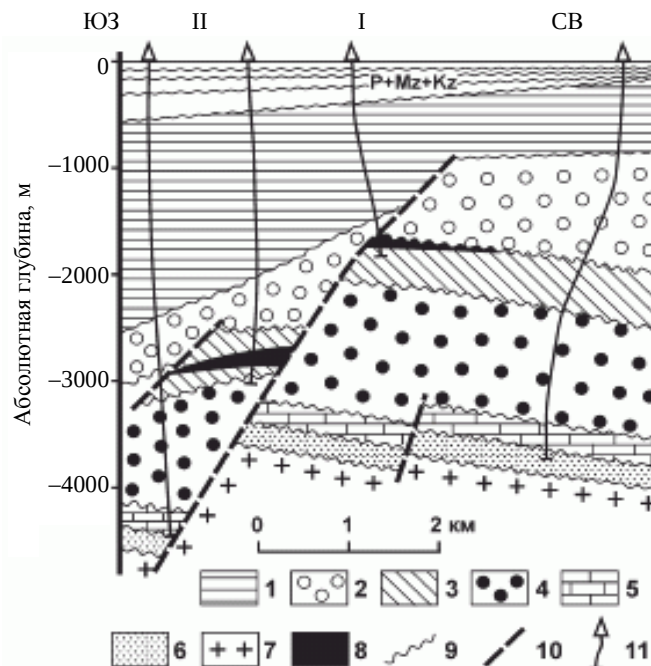


Рис. 1. Строение Александровского (I) и Южно-Александровского (II) месторождений нефти (по В. Г. Данилову) с осадочными толщами: 1 – надсолевая девонская и каменноугольная; 2 – верхняя солевая; 3 – межсолевая; 4 – нижняя солевая; 5 – подсолевая карбонатная; 6 – подсолевая терригенная; 7 – кристаллический фундамент; 8 – нефть; 9 – стратиграфические границы; 10 – разломы; 11 – скважины

Fig. 1. The structure of the Alexander (I) and the Southern Alexander (II) oil (according to V. G. Danilov) with the sedimentary strata: 1 – post-salt Devonian and Carboniferous; 2 – upper salt; 3 – inter salt; 4 – lower salt; 5 – pre-salt carbonate; 6 – pre-salt clastic; 7 – crystalline basement; 8 – oil; 9 – stratigraphic boundaries; 10 – faults; 11 – bores

Изложенное также подтверждается картой тектонического районирования территории Беларуси (рис. 2) [17], где у северной границы Припятского прогиба параллельно суперрегиональному разлому зону нефтяных месторождений пересекает региональный разлом. Из сопоставления карт полезных ископаемых [14] и тектонического районирования (рис. 2) следует, что перспективные для поисков нефтегазоносные области в основном находятся на территории Подляско-Брестской и Оршанской впадин.

Кроме того, возникает вопрос, почему у южной границы Припятского прогиба, имеющего схему строения, аналогичную северной, не обнаружено

существенных нефтяных месторождений? Хотя о недостаточно изученных территориях Припятского прогиба (центральная и южная зоны) говорилось еще в 1999 г. на Гомельской научно-практической конференции, определившей стратегию развития нефтедобывающей промышленности Республики Беларусь на 2000–2015 гг. [16].

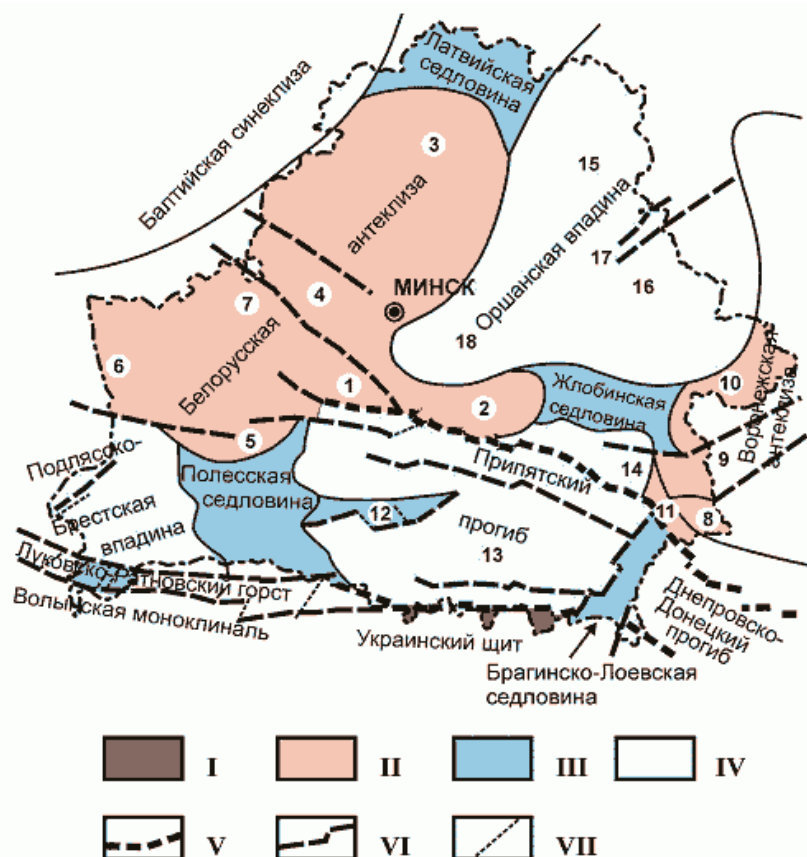


Рис. 2. Карта тектонического районирования территории Беларуси (по Р. Г. Гарецкому, Р. Е. Айзбергу): I – кристаллический щит; II – антеклизы; III – седловины, выступы, горсты; IV – прогибы, впадины, синеклизы; V, VI, VII – суперрегиональные, региональные (субрегиональные) и локальные разломы соответственно; 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 – Бобовнянский, Бобруйский, Вилейский, Ивацевичский, Гремячский, Мазурский, Суражский погребенные выступы; 4, 9, 13 – Воложинский, Клинецовский, Припятский грабен; 7 – Центрально-Белорусский массив; 11 – Гомельская структурная перемычка; 12 – Микашевичско-Житковичский выступ; 14 – Северо-Припятское плечо; 15, 16 – Витебская, Могилевская мульда; 17 – Центрально-Оршанский горст; 18 – Червенский структурный залив

Fig. 2. The map of tectonic zoning of the territory of Belarus (according to R. G. Garetski, R. E. Aizberg): I – crystal shield; II – anteclises; III – saddle, ledges, horsts; IV – troughs, basins, syncline; V, VI, VII – super-regional, regional (sub-regional) and local faults, respectively; 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10 – Bobovnya, Bobruisk, Vileika, Ivatsevichi, Gremyatcha, Mazursk, Surazh buried ledges; 4, 9, 13 – Volozhin, Klintsey, Pripyat graben; 7 – Central Belarusian array; 11 – Gomel structural coffer-dam; 12 – Mikashevitchi-Zhitkovichi ledge; 14 – North-Pripyat shoulder; 15, 16 – Vitebsk, Mogilev trough; 17 – Central-Orsha gorst; 18 – Cherven structural bay

Несомненный интерес представляет предложение В. Н. Бескопыльного [18] по добыче углеводородов из нетрадиционных нефтегазоматеринских отложений, которые относятся к полуколлекторам или коллекторам с аутигенной нефтегазоносностью. Примером подобных полуколлекторов В. Н. Бескопыльный считает породы баженовской свиты, о которых пишет: «Изучение нефтеносности баженовской свиты – баженитов – показало, что насыщающая эти породы нефть образовалась здесь же, на месте – *in situ*. Формирование скоплений углеводородов произошло в то же время, когда образовался коллектор (полуколлектор) в данной нефтематеринской породе. Нефть ниоткуда не пришла, она местная, т. е. генерированная нефтесодержащими породами. Данное обстоятельство указывает на нетрадиционность таких скоплений нефти. Баженовская свита признана новым (нетрадиционным) типом залежей нефти и газа. В Припятском НГБ аналогом баженитов являются фаменские доманикиты, которые, как и первые, обогащены значительным объемом органических веществ, подвергшихся катагенетическим преобразованиям, соответствующим главной фазе генерации нефти».

Однако в [18] упоминается нефтегазообразование только в межсоловой толще, а о подобных процессах в подсоловой толще речь даже не идет. Конечно, значительная часть углеводородов в процессе генезиса в другие геологические периоды могла рассеяться в окружающих отложениях и выйти в атмосферу, но вещественные следы существенного нефтегазообразования должны остаться. В. Н. Бескопыльный отмечает: «В Припятском прогибе наибольший интерес для поисков нетрадиционных резервуаров представляют глинисто-карбонатные и глинисто-кремнеземно-карбонатные межсоловые отложения, которые требуют особых нюансов в технологиях интенсификации и повышения нефтеотдачи (в частности, гидравлического разрыва пластов)».

В настоящее время российскими учеными разработан и успешно применяется принципиально новый метод интенсификации добычи нефти, который назван плазменно-импульсным воздействием (ПИВ) [19]. Как отмечает А. Д. Дмитриевский [20], метод ПИВ разработан российскими учеными Я. Зельдовичем, В. Глухих, А. Молчановым и В. Николаевским. Суть в том, что энергия плазмы преобразуется в мощную ударную волну, которая разрывает пласт и образует трещины длиной до 1,5 км. По этим каналам нефть движется к скважине. Получив такой «удар», пласт резонирует, что многократно усиливает эффект воздействия. В Оренбургской области России открыто гигантское месторождение необычной, так называемой матричной нефти, которая является «трудной», но благодаря содержанию редкоземельных элементов весьма ценной [20]. Она может быть добыта методом ПИВ, также позволяющим возродить старые месторождения и даже заброшенные скважины, в которых остается более 50–70 % нефти. Залежи «трудной» нефти, пропитывающей плотные породы, напоминают описанные в [18] коллекторы с аутигенной нефтегазоносностью.

В [21] отмечается, что с помощью ПИВ научились вызывать резонанс в нефтеносном пласте. Это создает аномальную трещиноватость, снимает поверхностное натяжение и вызывает эффект акустической кавитации, уменьшая вязкость нефти. Взрывные технологии использовались для увеличения нефтедобычи и прежде, однако химические взрывы ограничены сериями лишь в несколько десятков за один спуск. Их невозможно точно дозировать по месту, времени и мощности, а генератор плазмы способен сделать за один спуск до тысячи точных импульсов, что позволяет использовать его для создания резонанса [21].

При разработке газоносных угольных пластов в определенных горно-геологических условиях происходят газодинамические явления в виде внезапных выбросов угля, породы и газа. Данные выбросы развиваются и осуществляются при воздействии вибрационно-волновых процессов в горном массиве [22], что в определенной мере напоминает развитие этих процессов при использовании генераторов ПИВ. Поэтому представляется весьма перспективным применение ПИВ для добычи углеводородов из нефтегазоматеринских полуколлекторов или коллекторов с аутигенной нефтегазоносностью [18], но требует соответствующих дополнительных исследований.

В последние годы широко применяются (особенно в США) технологии получения жидких углеводородов, аналогичных нефти, из углей и сланцев, залегающих под земной поверхностью, путем их растворения и откачки раствора через скважины. Такие исследования интенсивно производились в США с начала 70-х гг. прошлого столетия [23, с. 35]. В настоящее время методы получения жидких углеводородов из сланцев создают реальную конкуренцию традиционным способам, особенно при разработке сланцев. Однако использование ядовитых растворителей делает ядовитыми подземные воды, многие из которых являются источниками питьевой или технической воды. Кроме того, растворение сланцевых пластов, особенно залегающих неглубоко, часто приводит к существенной осадке поверхности земли, что разрушает фундаменты зданий и подземные сооружения.

До настоящего времени в недрах Беларуси не разведано ни одного значительного чисто газового месторождения по классификации А. А. Ионина [24, с. 6], а получаемый природный газ является попутным, т. е. выделяемым из скважин нефтяных месторождений совместно с нефтью. Попутные газы обычно отличаются от газовых залежей меньшим содержанием CH_4 (примерно 40–80 % [24]) в отличие от 75–99 % легких газовых смесей, значительным содержанием C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} и C_5H_{12} и, следовательно, более высокой теплотой сгорания ($40 \cdot 10^3$ – $60 \cdot 10^3$ кДж/м³ при $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 101,3$ кПа) по сравнению с легкими газовыми смесями ($34 \cdot 10^3$ – $39 \cdot 10^3$ кДж/м³ при тех же условиях). Среди 20 залежей легких газов [24] имеется одно (Вуктылское, Коми АССР), в котором газы по своим основным свойствам имеют показатели: теплота сгорания 47458 кДж/м³, плотность 1,043 кг/м³, а сумма содержания $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_5\text{H}_{12}$ составляет 20,9 %. Одна-

ко в этом случае недалеко находятся нефтяные месторождения, а толща мерзлоты создает условия прекрасной изоляции от диффузии газа в атмосферу.

В 1975 г. при добыче в Беларуси около 8 млн т нефти количество попутных газов превышало 100 тыс. т в год, что позволило построить и эксплуатировать в течение ряда лет систему бытового газоснабжения города Речицы и ряда других населенных пунктов Гомельской области, использующих эти попутные газы. Однако в связи с резким уменьшением добычи нефти к XXI в. такие системы газоснабжения были переведены на импортный природный газ, а добываемое в настоящее время относительно небольшое количество попутного газа используется для зарядки газовых баллонов сжиженным газом и на собственные энергетические нужды предприятий.

Наличие значительных перспективных площадей, кроме Припятского прогиба, на нефтегазоносность (рис. 2) позволяет надеяться на открытие новых существенных газовых месторождений, а возможная оценка параметров может проводиться в соответствии с рекомендациями [25]. Примером такого открытия служит значительное газовое месторождение, расположенное в Харьковской и Полтавской областях около северной границы Днепровско-Донецкого разлома.

Еще Д. И. Менделеев и В. И. Ленин указывали на возможность подземной газификации углей с целью получения горючих углеводородных газов [26]. Поэтому, начиная с 1930 гг., в СССР были созданы экспериментальные шахтные и бесшахтные предприятия, в том числе два в Донбассе, на которых проводились исследования в течение десятков лет. Последняя экспериментальная установка для подземной газификации закрыта в Донецком бассейне в 80-е гг. XX в. В Донецком индустриальном институте имени Н. С. Хрущева в 1950-е гг. открыта специальность «Подземная газификация», которая просуществовала до 1960-х гг. Интересно отметить, что в 70–80-е гг. прошлого века все результаты исследований по подземной газификации угольных пластов купили американцы, заплатив несколько миллионов долларов. Такой интерес в США подтверждается патентованием в 1970-е гг. различных вариантов подземной газификации углей. Также известно получение синтетического жидкого топлива (аналога бензина) из добытого угля, которое было налажено в Германии во время Второй мировой войны, что стоило весьма дорого, и пока такое получение жидкого топлива не выгодно.

В 70-е гг. прошлого столетия в Донбассе проводились натурные эксперименты по дегазации и предотвращению газодинамических явлений при разработке глубоко залегающего газоносного угольного пласта путем его гидравлического разрыва через пробуренную с поверхности специальную скважину [27]. При этом ударное гидравлическое воздействие на данный выбросоопасный угольный пласт производилось неоднократно, что иногда вызывало ответную вибрационно-волновую реакцию горного массива. Так, с этого времени начались исследования газовиков и нефтяников по удар-

ному или иному силовому воздействию на горный массив с целью генерации собственных резонансных волновых процессов, приводящих к существенному газовыделению из угольного пласта и пород. Необходимо отметить, что зоны, опасные по газодинамическим явлениям в угольных и породных (как правило, песчаник) пластах Донбасса, обычно приурочены к повышенным напряжениям в породном массиве, а зоны повышенных напряжений сопряжены с тектоническими нарушениями.

Учитывая блочное строение нефтегазоносных отложений в Припятском прогибе, интересно отметить исследования местных и локальных зон повышенной газопроницаемости, покрывающих угольные пласты пород Донбасса, которые могли служить каналами для выхода генерируемых в угольных отложениях газов на земную поверхность [2, с. 68]. Исследования проводились в 70-е гг. прошлого столетия Ю. В. Рябоштаном, обнаружившим с помощью родонового радиоактивного анализа зоны повышенной (по сравнению с соседними участками) интенсивности выхода газов. Возможно, такой способ обнаружения блочных разломов стоит использовать при разведке нефтегазовых месторождений в Беларуси.

В угольных отложениях Карбона, расположенных в Днепровско-Донецком прогибе, в процессе метаморфизма растительных отложений образовались многие триллионы кубических метров метана, значительная часть которых благодаря глубокому залеганию угольных пластов сохранилась до сих пор. В Беларуси основные месторождения относятся к бурым углям. При их образовании выделяется немного метана (всего $10\text{--}30\text{ м}^3/\text{т}$ горючей массы по сравнению с сотнями кубометров в угольных пластах Донбасса [2]). Поэтому при метаморфизме растительных остатков до бурых углей при их неглубоком залегании (до $2000\text{--}2500\text{ м}$) возможна их интенсивная дегазация за прошедшие геологические периоды (до $200 \cdot 10^6$ лет). Как отмечает И. В. Высоцкий [4, с. 39], коэффициент диффузии углеводородных газов через осадочные горные породы можно принять около $10^{-6}\text{ см}^2/\text{с}$. В этом случае из источника газа, залегающего на глубине 1000 м , под давлением 10 МПа и при температуре около 40°C за 10^6 лет с 1 м^2 поверхности будет диффундировать около 40 м^3 газа, а за прошедшие геологические периоды почти все газы могли уйти в атмосферу или протекающую подземную воду. Однако многие крупные месторождения газа расположены под значительными толщами вечной мерзлоты (Сибирь) или морской воды (Северное, Балтийское, Баренцево, Охотское моря и др.), которые являются природными изоляторами от вековой дегазации.

Следует отметить, что многие районы Припятского прогиба и Оршанской впадины подвержены локальным, а иногда и контрастным неотектоническим движениям, которые могут приводить к неравномерной напряженности горных пород и их склонности к газодинамическим проявлениям [28]. Это является серьезным фактором при обеспечении безопасности разработки Старобинского месторождения калийных солей [7]. Основные месторождения горючих сланцев в Беларуси приурочены к надсолевой де-

вонской толще в средней части Припятского прогиба. Такие сланцы представляют собой осадочную породу с высоким (более 15 %) содержанием твердого органического вещества – керогена [16]. Прогнозные ресурсы этих горючих сланцев до глубины 600 м – около $11 \cdot 10^9$ т, что в переводе на возможное топливо составляет примерно 10^9 т. Различные залежи бурых углей до глубины 900 м могут быть около 10^9 т [16].

По мнению В. Н. Бескопыльного [18], масса неразведанных извлекаемых ресурсов нефти в традиционных межслоевых ловушках составляет $(40\text{--}240) \cdot 10^6$ т при вероятности существования 90–10 % ($36 \cdot 10^6\text{--}24 \cdot 10^6$ т), а остаются неразведанными извлекаемые ресурсы углеводородов в объеме 240–600 млн т. Следовательно, потенциальные природные углеводородные ресурсы Беларуси вполне достаточны для обеспечения энергетической безопасности, для которой необходима добыча примерно $4 \cdot 10^6$ т нефти в год и $12 \cdot 10^9$ м³ газа в год в пересчете на СН₄. При этом необходимо предусмотреть возможность использования попутных газов вместе или вместо легкого природного газа, который применяется в настоящее время в распределительной системе газоснабжения Беларуси.

Создание подземных газовых хранилищ в Гомельской и Брестской областях свидетельствует о наличии в недрах Беларуси больших объемов пористых или трещиноватых пород, вокруг которых существует или можно создать достаточный газоизоляционный слой. Именно в таких природных ловушках имеются природные газовые месторождения. Поэтому следует заново произвести глубокий анализ возможных геологических условий образований, движения и накопления природных газов в недрах Беларуси и выполнить необходимые натурные исследования. Следует отметить, что анализ опубликованных и известных отчетных геологических материалов по недрам только Республики Беларусь требует огромной работы, но затраты на нее относительно невелики, а польза возможна большая.

ВЫВОДЫ

1. Обобщение некоторых опубликованных материалов специалистов об углеводородных запасах полезных ископаемых показывает возможность обеспечения энергетической безопасности Беларуси. Использование новейшей технологии (плазменно-импульсного воздействия на нефтеносную породу) для новых и ранее отработанных скважин может позволить существенно увеличить добычу нефти и газа.

2. Применение известных «экзотических» методов разведки полезных ископаемых (измерение выделения гелия, родоновый радиоактивный анализ и т. п.) для обнаружения возможных разломных зон повышенной газопроницаемости может оказаться перспективным для поиска углеводородных энергоресурсов. Увеличение добычи попутного газа в Припятском прогибе обеспечит бытовое газоснабжение значительной части Гомельской области.

3. Анализ опубликованных и отчетных геологических материалов по недрам Беларуси требует огромной работы и нетрадиционных взглядов на проблему обеспечения энергетической безопасности республики на базе собственных месторождений углеводородных ископаемых. Перспективными для открытия существенных нефтегазовых месторождений являются центральные районы Припятского прогиба и районы на границах Микашевичско-Житковичского выступа. Необходимо внимательное изучение геологических условий районов в южной части Подляско-Брестской и северо-восточной части Оршанской впадин. В области Белорусской антеклизы, особенно вблизи Балтийской синеклизы, на больших глубинах в пористых породах возможно наличие нефтегазовых месторождений неорганического происхождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковхута, А. М. Разломы Припятского прогиба (строение, эволюция, динамика) / А. М. Ковхута. Минск: Институт геологии, геохимии и геофизики АН Беларуси, 1992. 20 с.
2. Осипов, С. Н. О влиянии длины лавы на газообильность выемочного участка / С. Н. Осипов // Уголь. 1956. № 6. С. 24–28.
3. Осипов, С. Н. Газодинамика карбона / С. Н. Осипов. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2007. 352 с.
4. Высоцкий, И. В. Основы геологии природного газа / И. В. Высоцкий. М.: Гостоптехиздат, 1954. 384 с.
5. Чекалюк, Э. Б. Термодинамические основы теории минерального происхождения нефти / Э. Б. Чекалюк. Киев: Наук. думка, 1971. 253 с.
6. Гаврилов, В. П. Феноменальные структуры земли / В. П. Гаврилов. М.: Наука, АН СССР, 1978. 144 с.
7. Андрейко, С. С. Газодинамические явления в калийных рудниках / С. С. Андрейко, П. А. Калучан, В. Я. Щерба. Минск: Вышэйш. шк., 2000. 336 с.
8. Месторождения калийных солей Беларуси: геология и рациональное недропользование / Э. А. Высоцкий [и др.]. Минск: Изд. центр БГУ, 2003. 264 с.
9. Николаевский, В. Н. Большая наука – газовой промышленности / В. Н. Николаевский // Газовая промышленность. 1990. № 5. С. 26–27.
10. Соколов, В. А. Очерки генезиса нефти / В. А. Соколов. М.: Гостоптехиздат, 1948. 460 с.
11. Энгельдарт, В. Поровое пространство осадочных пород / В. Энгельдарт. М.: Недра, 1964. 232 с.
12. Осипов, С. Н. О движении газа вблизи обнаженной поверхности угольного пласта при его переменной газопроницаемости / С. Н. Осипов, Б. П. Пясецкий // Механика жидкости и газа. 1965. № 3. С. 138–144.
13. Осипов, С. Н. Некоторые особенности газодинамического режима в окрестности скважины / С. Н. Осипов // Вестник БНТУ. 2004. № 3. С. 9–13.
14. Карта полезных ископаемых [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.bygeo.ru/uploads/posts/picture/2011-03/Nac_56.jpg. Дата доступа: 15.03.2016.
15. Каропа, Г. Н. Физическая география Беларуси / Г. Н. Каропа. Гомель: Гомел. гос. ун-т имени Ф. Скорины, 2010. 107 с.
16. Горючие полезные ископаемые [Электронный ресурс] // Белорусский геологический портал. Режим доступа: <http://geology.by/-/7/126-2008-09-09-20-05-17.html>. Дата доступа: 15.03.2016.
17. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geology.by/2008-07-24-12-56-24.html>.
18. Бескопыйный, В. Н. Генетический прогноз потенциала добычи углеводородов из нетрадиционных месторождений Припятского нефтегазоносного бассейна // Теория и

- практика современных методов интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи пластов: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Гомель: ОАО «Полеспечать», 2012. С. 631–639.
19. Плазменно-импульсное воздействие [Электронный ресурс] // Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Плазменно-импульсное_воздействие. Дата доступа: 15.03.2016.
20. Медведев, Ю. Сами возьмем [Электронный ресурс] / Ю. Медведев // Российская газета. 2015. № 6662. Режим доступа: <http://www.rg.ru/2015/04/29/neft.html>. Дата доступа: 15.03.2016.
21. Сараев, В. Стартап взрывает недра [Электронный ресурс] / В. Сараев // ЭкспертOnline. 2014. Режим доступа: <http://expert.ru/expert/2014/08/startap-vzryivaet-nedra/>. Дата доступа: 20.05.2016.
22. Осипов, С. Н. Вибрационно-волновой механизм выбросов угля, породы и газа / С. Н. Осипов // Упругие свойства горных пород и безопасность подземной разработки, Киев: Техніка, 1979. С. 75–133.
23. Физико-химические способы добычи угля / А. В. Докунин [и др.]. М.: ЦНИЭИуголь, 1976. 35 с.
24. Ионин, А. А. Газоснабжение / А. А. Ионин. М.: Стройиздат, 1989. 440 с.
25. Добыча, подготовка и транспорт природного газа и конденсата / под ред. Ю. П. Коротаева, Р. Д. Моргулова. М.: Недра, 1984. Т. I. 360 с.; Т. II. 288 с.
26. Скафа, П. В. Подземная газификация углей / П. В. Скафа. М.: Госгортехиздат, 1960. 246 с.
27. Ножкин, Н. В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений / Н. В. Ножкин. М.: Недра, 1979. 263 с.
28. Осипов, С. Н. География динамических проявлений аномальных напряжений горных пород при подземной разработке / С. Н. Осипов, Н. Е. Волошин // Современные проблемы механики горных пород: материалы 4-й всесоюз. конф. по механике горных пород. Л.: Наука, 1972. С. 152–163.

Поступила 20.10.2015 Подписана в печать 03.01.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Kovkhuto A. M. (1992) *Fractures of the Pripjat Hollow (Structure, Evolution, Dynamics)*. Minsk: Institute of Geology, Geochemistry and Geophysics, Academy of Sciences of Belarus. 20 p. (in Russian)
2. Osipov S. N. (1956) On the Influence of the Length of the Lava on the Gas Abundance of an Extraction Area. *Ugol [Coal]*, (6), 24–28 (in Russian).
3. Osipov S. N. (2007) *The Dynamics of the Gas Attributed to Carbon*. Minsk, Adukastsiya i Vykhavanniye. 352 (in Russian).
4. Vysotskiy I. V. (1954) *Fundamentals of the Geology of Natural Gas*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ. 384 (in Russian).
5. Chekaliuk E. B. (1971) *Thermodynamic Basis of Mineral Origin of Oil*. Kiev, Naukova Dumka. 253 (in Russian).
6. Gavrilov V. P. (1978) *Phenomenal Structures of the Earth*. Moscow: Nauka Publ. of the USSR Academy of Sciences. 144 (in Russian).
7. Andreyko S. S., Kaloochan P. A., Shcherba V. Ya. (2000) *Gas-Dynamic Phenomena in Potassium Mines*. Minsk, Vysheishaya Shkola. 336 (in Russian).
8. Vysotsky E. A., Gubin V. N., Smychnik A. D., Shemet S. F., Iashin I. A. (2003) *The Potassiss Salt Deposits of Belarus: Geology and Mineral Resources Rationai Use*. Minsk, Publ. Center of BSU. 264 (in Russian).
9. Nikolaevsky V. N. (1990) Big Science for Gas Industry. *Gazovaya Promyshlennost [Gas Industry]*, (5), 26–27 (in Russian).

10. Sokolov V. A. (1948) *Essays on the Genesis of Oil*. Moscow, Gostoptekhizdat. 460 (in Russian).
11. Engeldart V. (1964) *Pore Space of Sedimentary Rocks*. Moscow, Nedra. 232 (in Russian).
12. Osipov S. N., Pyasetsky B. P. (1965) On the Motion of Gas in Close Proximity to the Exposed Surface of a Coal Seam with its Variable Permeability. *Mekhanika Zhidkosti i Gaza* [Mechanics of Liquids and Gases], (3), 138–144 (in Russian).
13. Osipov S. N. (2004) Peculiar Features of Gas-Dynamic Mode in Hole Vicinity. *Vestnik BNTU* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (3), 9–13 (in Russian).
14. Mineral Resources Map. Available at: http://www.bygeo.ru/uploads/posts/picture/2011-03/Nac_56.jpg. (Accessed 15 March 2016) (in Belarusian).
15. Karopa G. N. (2010) *Physical Geography of Belarus*. Gomel: F. Skorina Gomel State University. 107 (in Russian).
16. Fossil Fuel. *The Belarusian Geological Portal*. Available at: <http://geology.by/-/7/126-2008-09-09-20-05-17.html>. (Accessed 15 March 2016) (in Russian).
17. [E-Resource]. Mode of Access: <http://geology.by/2008-07-24-12-56-24.html>.
18. Beskopylny V. N. (2012) Genetic Prediction of Potential Hydrocarbon Production from Unconventional Deposits of the Pripyat Oil and Gas Pool. *Teoriia i Praktika Sovremennykh Metodov Intensifikatsii Dobychi Nefti i Uvelicheniia Nefteotdachi Plastov: Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [The Theory and Practice of Modern Methods of Intensification of Oil Production and Enhancing Oil Recovery: Materials of the International Scientific-Practical Conference]. Gomel, Polespechat. 631–639 (in Russian).
19. Plasma-Pulse Impact. *Wikipedia*. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Плазменно-импульсное_воздействие. (Accessed 15 March 2016) (in Russian).
20. Medvedev Yu. (2015) We do Take it Ourselves. *Rossiiskaia Gazeta* [Russian Newspaper], (6662). Available at: <http://www.rg.ru/2015/04/29/neft.html>. (Accessed 15 March 2016) (in Russian).
21. Saraev V. (2014) Startup Explodes the Bowels of the Earth. *ExpertOnline*. Available at: <http://expert.ru/expert/2014/08/startap-vzryivaet-nedra/>. (Accessed 5 May 2016) (in Russian).
22. Osipov S. N. (1979) Vibration-Wave Mechanism of the Emissions of Coal, Rock and Gas. *Elastic Properties of Rocks and Safety of Underground Mining*. Kiev, Tekhinka, 75–133 (in Russian).
23. Dokunin A. V. [et al.] (1976) *Physico-Chemical Methods of Coal Mining*. Moscow, Central Research Institute of Economics and Scientific-and-Technical Information of Coal Industry. 35 (in Russian).
24. Ionin A. A. (1989) *Gas Supply*. Moscow, Stroyizdat. 440 (in Russian).
25. Korotaev Yu. P., Morgulov R. D. (ed.) (1984) *Production, Preparation and Transportation of Natural Gas and Condensate: Reference Manual*. Moscow, Nedra, Vol. I. 360; Vol. II. 288 (in Russian).
26. Scafa P. V. (1960) *Underground Gasification of Coals*. Moscow: Gosgortekhizdat. 246 (in Russian).
27. Nozhkin N. V. (1979) *Advance Degassing of Coal Deposits*. Moscow, Nedra. 263 (in Russian).
28. Osipov S. N., Voloshin N. E. (1972) Geography Dynamic Manifestations of the Abnormal Stresses of Rocks in Underground Mining. *Sovremennye Problemy Mekhaniki Gornykh Porod: Materialy 4-i Vsesoiuz. Konf. po Mekhaniki Gornykh Porod* [Modern Problems of Rock Mechanics. Materials of the 4th All-Union Conference on Rock Mechanics] Leningrad, Nauka, 152–163 (in Russian).

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-479-487

УДК 628.16.087+631.171:636.5

Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки

В. Н. Штепа¹⁾

¹⁾Полесский государственный университет (Пинск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Проведен критический анализ недостатков существующих систем водоочистки. Предложено для обеспечения экологической безопасности и экономии энергетических ресурсов использовать комбинированные установки, включающие физические, химические, физико-химические и биологические методы. Акцентируется внимание на том, что наиболее актуальным способом поддержания эффективной водоочистки являются адаптивные системы управления. Проанализированы недостатки управления установками водоочистки и предложено производить их синтез на основе математического аппарата систем искусственного интеллекта. С учетом требований экологической безопасности и необходимости экономии энергетических ресурсов разработан критерий энергоэффективности функционирования комбинированных систем. На промышленном предприятии (очистка сточных вод забойного цеха) проведена проверка соответствия этого критерия производственным условиям, которая подтвердила его адекватность и целесообразность использования при синтезе энергоэффективных систем управления. Предложена последовательность синтеза системы управления комбинированными установками водоочистки. Базируясь на предварительных исследованиях и анализе современных работ в данной проблемной области, разработана архитектура системы управления комбинированными установками водоочистки, использующая интеллектуальные технологии. Отличие данной разработки от аналогов заключается в возможности адаптивной корректировки настроек оборудования на основе обработки показаний датчиков, информации о цене на расходные материалы в условиях действия нестандартных ситуаций. Подстройка параметров системы управления осуществляется с использованием экспериментально-аналитических данных, сохраняемых в базе знаний технологических процессов.

Ключевые слова: энергоэффективность, экологическая безопасность, водоочистка, система управления, искусственный интеллект

Для цитирования: Штепа, В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 479–487

Адрес для переписки

Штепа Владимир Николаевич
Полесский государственный университет
ул. Кирова, 24,
225710, г. Пинск, Республика Беларусь
Тел.: +375 444 65-73-14
box@polessu.by

Address for correspondence

Shtepa Vladimir N.
Polesky State University
24 Kirova str.,
225710, Pinsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 444 65-73-14
box@polessu.by

Conceptual Bases of the Energy Efficient System of Management of Combined Units of Wastewater Treatment

V. N. Shtepa¹⁾

¹⁾Polesky State University (Pinsk, Republic of Belarus)

Abstract. A critical analysis of the shortcomings of the existing water purification systems is conducted. In order to ensure environmental safety and energy savings it is proposed to use the combined units, including physical, chemical, physical-and-chemical and biological methods. The attention is driven to the fact that the most effective way to maintain current water purification is an adaptive control system. The shortcomings of the management of water treatment units were revealed and it was proposed to produce their synthesis based on the mathematical apparatus of artificial intelligence systems. Taking into account the requirements of the environmental safety and the need in the energy savings, the energy efficiency criteria of combined system functioning has been developed. At an industrial plant (slaughterhouse wastewater treatment) the compliance of the production conditions of the criterion has been undertaken that confirmed the criterion relevance and usefulness as applied to the synthesis of energy-efficient control systems. A synthetic control system combined the water treatment plants. Having based on the preliminary research and analysis of the current work in the subject area the architecture of a control system of combined water treatment units that use intelligent technology was developed. The key functional of the unit – information-analytical subsystem of the formation control actions including: multi-layer perceptrons self-organization Kohonen network, fuzzy cognitive map. The basic difference between the developed design and its analogues is the ability to adjust the settings of equipment adaptively on the basis of processing sensor data, information on the price of consumables, volley discharges of pollutants, a sudden change in the flow and other force majeure. Adjustment of the parameters of the control system is carried out with the use of experimental and analytical data stored in the knowledge base of technological processes.

Keywords: energy efficiency, environmental safety, water treatment, control system, artificial intelligence systems

For citation: Shtepa V. N. (2016) Conceptual Bases of the Energy Efficient System of Management of Combined Units of Wastewater Treatment. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 479–487 (in Russian)

Введение

С учетом многофакторности требований к нормативам воды и большой разновидности загрязнителей [1] для достижения необходимого качества очистки на промышленных предприятиях используют комбинированные системы. Они комплексно включают известные методы [2]: механические, химические, физико-химические и биологические. Однако, как показала практика, обобщенными функциональными недостатками таких методов являются [2, 3]:

- высокая стоимость очистки 1 м³ воды (при условии получения соответствующего качества очистки);
- наличие больших объемов опасных продуктов очистки (реагент + загрязнитель), которые необходимо утилизировать;
- неспособность противодействовать залповым выбросам загрязнителей;
- отсутствие работы в режиме реального времени (постоянная задержка между появлением загрязнителя и технологической реакцией системы).

Например, значение Coli-index воды (критерий санитарно-гигиенического качества воды – наличие опасных концентраций вирусов, микробов, бактерий) определяют минимум через 24 ч с момента отбора пробы. Как следствие – возможна ситуация, когда на предприятие 24 ч поступают опасные загрязнители, причем самые современные очистные системы на это никак не реагируют.

Все описанные современные методы удаления загрязнителей из сточных вод требуют применения электротехнических комплексов. Степень вовлечения электротехнологий составляет 15–90 % [4]. При этом, как одни из самых интенсивных и прогрессивных, выделяются физико-химические методы, где электротехнологии лежат в основе водоочистки: электрокоагуляция, электрофлотация, электродиализ, электродеструкция, озонирование и другие методы. Они дают возможность с помощью изменения электрических параметров управлять направлением и характером реакций удаления вредных и опасных загрязнителей воды [2–4]. Однако процессы, происходящие в таких электротехнологических установках, в зависимости от входных показателей сточных вод все равно сопровождаются явлениями перерасхода электроэнергии и/или уменьшением эффекта очистки [4].

К эффективным и унифицированным методам предотвращения перерасхода электроэнергии и повышения качества очистки воды следует отнести использование адаптивных систем управления (АСУ) электротехническими комплексами, способных поддерживать технологические параметры в энергоэффективных пределах при условии соблюдения требований к качеству водоочистки [5]. Существенный лимитирующий фактор эффективного использования АСУ – фактическая невозможность адекватного математического моделирования всех процессов, проходящих в условиях работы на реальных объектах [6].

Критерий энергоэффективности систем водоочистки

Классическая экология при установлении опасности предприятий (процессов) базируется, прежде всего, на максимальной минимизации выбросов. Например, безразмерный интегральный показатель экологической опасности, который отражает комплексную сравнительную оценку ее уровня с учетом внешних и внутренних факторов, равен

$$R_{\text{инт}} = K_{\text{оз}} K_{\text{люд}} K_{\text{тер}} S V_{\text{а}} V_{\text{в}} V_{\text{от}} V_{\text{фв}} K_{\text{н}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{оз}}$ – коэффициент озеленения зоны действия; $K_{\text{люд}}$ – то же населения ареала; $K_{\text{тер}}$ – то же ценности территории; $K_{\text{н}}$ – то же нормальной экологической безопасности; S – площадь действия опасностей; $V_{\text{а}}$ – показатель превышения нормативного объема выбросов вредных веществ в атмосферу; $V_{\text{в}}$ – то же нормативного объема выбросов вредных веществ в воду; $V_{\text{от}}$ – то же нормативного объема отходов; $V_{\text{фв}}$ – то же нормативных уровней физических воздействий.

Очевидно, что такой критерий невозможно использовать для динамической настройки параметров оборудования в режиме реального времени, чтобы не выйти при этом за пределы экологической безопасности в конце отчетного периода. Безусловно, экологическая безопасность окружающей среды является главным критериальным ограничением функционирования производства. Однако целесообразно учитывать также качество работы оборудования, эффективность использования энергетических ресурсов. При этом добыча энергетических ресурсов наносит непоправимый вред окружающей среде, что не отображается в (1). Такие утверждения касаются и других нормативных формул расчета экологического воздействия производства на окружающую среду.

С учетом производственных испытаний и теоретических наработок [1, 4] предлагается универсальный критерий оценки энергоэффективности работы электротехнологического оборудования водоподготовки

$$EF_y = \frac{\left[\left(\frac{L_{\text{вых}} - L_{\text{задан}}}{L_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) + \dots + \left(\frac{LN_{\text{вых}} - LN_{\text{задан}}}{LN_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) \right] \sum_{i=1}^N Q_i}{\sum_{i=1}^N W_i}, \quad (2)$$

где $L_{\text{вых}}$ – фактическое значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки; $L_{\text{задан}}$ – заданное (нормативное) значение соответствующего параметра оценки качества водоочистки; Q – время работы оборудования, ч; W – электроэнергия, затраченная на водоочистку, кВт·ч; N – количество параметров оценки качества водоочистки (как правило, соответствует количеству установок, очищающих воду).

Технологическая задача – поддерживать значение критерия, равным (максимально близким) нулю. В случае, если одна установка обеспечивает нормирование нескольких параметров:

$$EF_y = \frac{\left[\left(\frac{L_{\text{вых}} - L_{\text{задан}}}{L_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) + \dots + \left(\frac{LN_{\text{вых}} - LN_{\text{задан}}}{LN_{\text{задан}}} \cdot 100 \% \right) \right] Q}{W}. \quad (3)$$

Производственную оценку соответствия коэффициента энергоэффективности проводили на электрокоагуляторе с нейросетевой АСУ (производство компании «Кий Проминвест Групп») [1]. Локальная схема очистки воды после убойного цеха предприятия была традиционной:

- жироловка с автоматическим сбором и удалением жира;
- пероуловитель с механической системой удаления задержанного пера птицы.

Функциональные показатели данного технологического оборудования соответствовали нормативным требованиям (пера в потоке сточных вод фактически не было, содержание жира 10–15 мг/л при входной концентрации взвешенных частиц 330–360 мг/л). Сточные воды после локальной очистки самотеком попадали на основные очистные сооружения населенного пункта.

Предприятие ежедневно в одну смену (8 ч) тратит 15–20 м³ холодной воды на мойку технологического оборудования (в том числе автомобильного транспорта). Вода забиралась из артезианской скважины, хотя специальных требований к ее качеству не выдвигалось. Было предложено применить доочистку сточных вод с последующим их использованием в технологическом цикле – создание частичного замкнутого цикла водоснабжения. Исследования проводились на протяжении двух недель (касательно каждого способа функционирования оборудования) из расчета, чтобы за один календарный месяц закончить полный цикл производственных экспериментов (исходя из технологического анализа предприятия установили, что такой период включает базовые пиковые значения концентраций загрязнителей). Для достижения соответствующего ресурсосберегающего эффекта локальную схему очистки, учитывая эффективность функционирования жироловки и пероуловителя, дополнили электрокоагуляционной системой с растворимыми стальными электродами [1].

При использовании нейросетевой АСУ электрокоагулятором водосбережение составило 263,00 м³ за две недели; энергосбережение на электрокоагуляцию 215,66 кВт·год в расчете на две недели. При этом коэффициент энергоэффективности водоочистки, согласно (2) в единицах измерения загрязнителя (концентрации взвесей), с использованием АСУ улучшился на 54 % по сравнению с работой без системы управления (рис. 1).

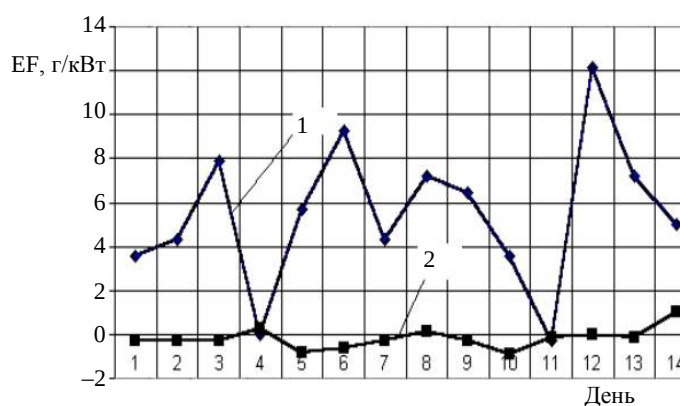


Рис. 1. Энергоэффективность электрокоагуляционной очистки:
1 – без адаптивной системы управления (АСУ); 2 – с АСУ

Fig. 1. The energy efficiency of electrocoagulation purification:
1 – without an adaptive control system (ACS); 2 – with ACS

Объектно-ориентированная концепция создания энергоэффективных систем управления комбинированными установками водоочистки

Ключевая задача систем управления установками водоочистки – поддержание режимов работы, при которых обеспечивается экологическая безопасность, поддерживается максимально около нуля критерий энерго-

эффективности (2). Синтез систем управления водоочисткой должен базироваться на понимании, что двух одинаковых объектов не существует, а есть типовые методы удаления загрязнителей. Исходя из такой трактовки и недостатков имеющихся решений, можно сформулировать последовательность объектно-ориентированного создания таких систем (рис. 2):

1) исследование характеристик водопользования объекта, а не только качества воды;

2) проведение экспериментальных исследований с целью определения методов и режимов водоочистки – согласно требованиям по критерию энергоэффективности (2);

3) информационно-аналитические исследования на основе пунктов 1 и 2 с целью выбора объектно-ориентированных номенклатуры и режимов функционирования оборудования;

4) синтез систем управления на основе разработок искусственного интеллекта с возможностью адаптации в режиме реального времени характеристик и структуры (на основании результатов пунктов 1 и 2);

5) апробация АСУ на реальном объекте (проведение коррекции при необходимости) с последующими монтажом и наладкой технических средств автоматизации.

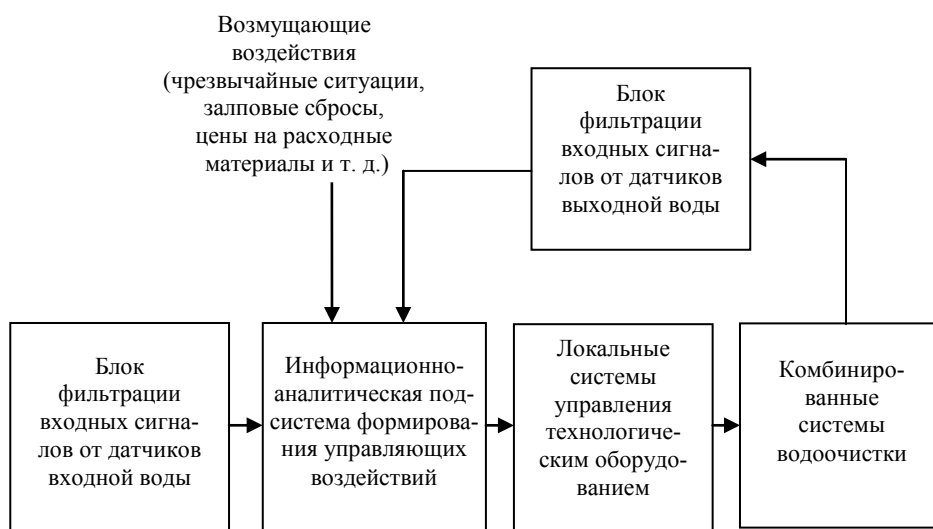


Рис. 2. Архитектура системы управления комбинированными системами водоочистки

Fig. 2. The architecture of control system of combined water purification units

Математический аппарат соответствующих элементов АСУ:

- блоки фильтрации сигналов от датчиков – преобразование Гильберта – Хуанга [5];
- информационно-аналитическая подсистема формирования управляющих воздействий (ПФУВ) – нечеткие когнитивные карты, самоорганизационные карты Кохонена, нейронные сети: вероятностная и многослойный персептрон [6–10];

• локальные системы управления – классические законы теории автоматического управления.

Важные параметры процессов сохраняются в базе данных и используются для корректировки настроек, в том числе в режиме реального времени. Такая архитектура свободно интегрируется в современные SCADA-системы. На стадии проектирования АСУ используются CASE-средства и объектно-ориентированный язык разработки UML. При создании АСУ информационно-аналитическая ПФУВ (рис. 3) обучается и проверяется на адекватность в пунктах 3–5 этапов проектирования.

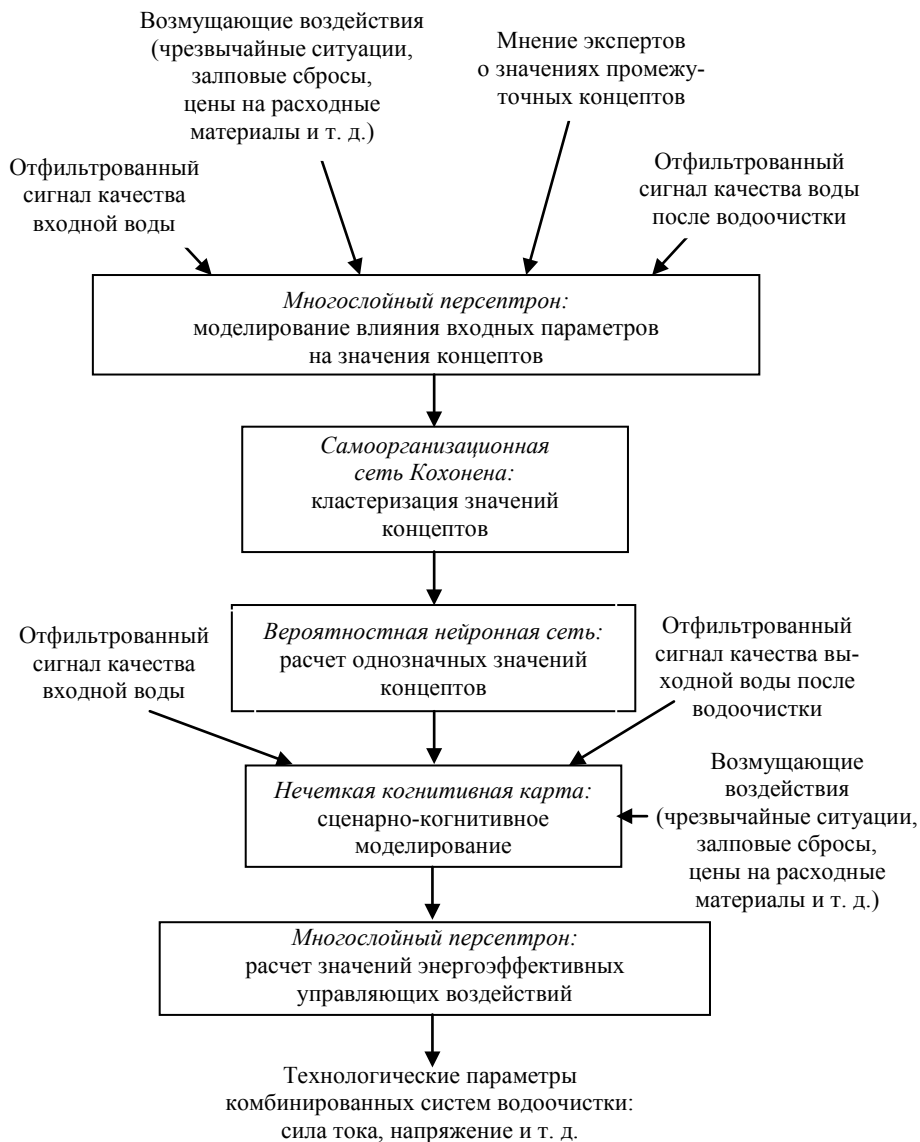


Рис. 3. Архитектура информационно-аналитической подсистемы формирования управляющих воздействий (режим реального времени)

Fig. 3. Architecture of information-analytical subsystem of formation of control actions (real-time)

ПФУВ решает задачу моделирования и адаптивного формирования в режиме реального времени стратегии управления комбинированными системами водоочистки. Важная особенность работы предложенной АСУ заключается в учете действия непредвиденных факторов: чрезвычайных ситуаций, залповых сбросов загрязнителей, пиковых повышений расходов и т. д. Требования к адаптивности подсистемы вызваны нестационарностью процессов и возмущающих воздействий, которые способны изменить мнение экспертов о значениях концептов.

Функциональные задачи блоков ПФУВ:

- *многослойный перцептрон*: моделирование значений концептов когнитивной модели на основании базы знаний предварительных экспериментов с учетом критерия энергоэффективности (2), при этом мнение экспертов учитывается при выборе значений концептов эффективности и состояния оборудования;

- *самоорганизационная сеть Кохонена*: группировка и кластеризация значений концептов когнитивной карты;

- *вероятностная нейронная сеть*: выбор числовых значений концептов когнитивной карты;

- *нечеткая когнитивная карта*: расчет проведения сценарно-когнитивного моделирования;

- *многослойный перцептрон*: расчет энергоэффективных управляющих воздействий (на основании сценарно-когнитивного моделирования и предварительных экспериментов с учетом критерия энергоэффективности (2)).

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения экологической безопасности и экономии энергетических ресурсов необходимо использовать комбинированные системы водоочистки с адаптивными системами управления.

2. Предложенный критерий энергоэффективности функционирования комбинированных систем водоочистки можно рекомендовать для использования при синтезе соответствующих систем управления, что подтверждено производственными испытаниями.

3. Архитектура системы управления, решающая проблему энергоэффективного функционирования комбинированных установок водоочистки, должна включать элементы с искусственным интеллектом и базироваться на объектно-ориентированных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Очистка растворов от дисперсных примесей методом электрокоагуляции. Ч. 2. Осаждение глинистых примесей при переменных гидродинамических режимах, факторный эксперимент / М. Донченко [и др.] // Вісник Національного технічного університету. Хімія, хімічна технологія та екологія. 2009. № 22. С. 57–65.
2. Штепа, В. Н. Концепция построения интеллектуальных систем управления биотехническими объектами с учетом влияния природных факторов / В. Н. Штепа // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды 9-й Междунар. науч.-техн. конф. М., 2014. Ч. 5. С. 14–19.

3. Theoretical Issues Construction and Operation of Agricultural Mission Robotic System / S. Shvoro [et al.] // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture*. 2012. No 60. P. 97–102.
4. Штепа, В. М. Оцінка енергетичних характеристик процесів очищення стічних вод агропромислових підприємств електротехнічними комплексами / В. М. Штепа // *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2014. Вип. 194, ч. 3. С. 259–265.
5. Greenhouse Environmental Control System with Neural Network Predictions of External Disturbances / A. Dudnik [et al.] // *Contemporary Aspects of Production Engineering: XXII International Students Scientific Conference*, 22–25 May 2013: abstract. Warsaw, 2013. P. 40–52.
6. Intelligent Effective Management System of Biotechnical Objects Based on Natural Disturbances Prediction / V. Lysenko [et al.] // *Earth Bioresources and Life Quality*. 2014. Vol. 3. P. 34–41.
7. Kohonen, T. *Self-Organizing Maps* / T. Kohonen. New York: ORM, 2001. 501 p.
8. Lakhmi, C. J. *Fusion of Neural Networks. Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications* / C. J. Lakhmi, N. M. Martin. Deli: CRC Press LLC. 1998. P. 154–165.
9. Каллан, Р. *Основные концепции нейронных сетей* / Р. Каллан. М.: Вильямс, 2001. 516 с.
10. Гареев, А. Ф. *Применение вероятностной нейронной сети для задачи классификации текстов* / А. Ф. Гареев // *Наука и образование*. 2004. № 11. С. 105–117.

Поступила 25.05.2015 Подписана в печать 08.02.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Donchenko M., Sribnaya O., Goncharov F., Shtepa V. (2009) The Purification of Solutions from Dispersed Impurities by Electrocoagulation. Part 2. Deposition of Clay Impurities in Variable Hydrodynamic Conditions, Factorial Experiment. *Novosti Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu. Khimiia, Khimichna Tekhnologiia ta Ekologiia* [News of the National Technical University. Chemistry, Chemical Engineering and Environment], (22), 57–65 (in Russian).
2. Shtepa V. N. (2014) Concept of Smart Control Systems of Biotechnical Facilities Creation Accounting the Influence of Natural Factors. *Energoobespechenie i Energoberezhenie v Selskom Khoziaistve: Trudy 9-i Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii* [Energy Supply and Energy Efficiency in Agriculture. Proceedings of the 9th International Scientific Conference]. Moscow, All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture. Part 5. 14–19 (in Russian).
3. Shvoro S., Reshetyuk V., Bolbot I., Shtepa V., Chirchenko D. (2012) Theoretical Issues Construction and Operation of Agricultural Mission Robotic System. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Agriculture*, (60), 97–102.
4. Shtepa V. M. (2014) Assessment of the Energy Characteristics of Processes of Wastewater Treatment of Agroindustrial Enterprises by Electrotechnical Complexes. *Naukovii Visnik Natsionalnogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannia Ukraini* [Scientific Bulletin of National Agricultural University of Ukraine], 194, Part 3, 259–265 (in Ukrainian).
5. Dudnik A., Lysenko V., Reshetyuk V., Shtepa V. (2013) Greenhouse Environmental Control System with Neural Network Predictions of External Disturbances. *Contemporary Aspects of Production Engineering: XXII International Students Scientific Conference*, 22–25 May 2013: Abstract. Warsaw, 40–52.
6. Lysenko V., Golovinskiy B., Reshetyuk V., Shtepa V., Shcherbatyuk V. (2014) Intelligent Effective Management System of Biotechnical Objects Based on Natural Disturbances Prediction. *Earth Bioresources and Life Quality*, 3, 34–41.
7. Kohonen T. (2001) *Self-Organizing Maps*. New York, ORM, 501.
8. Lakhmi C. J., Martin N. M. (1998) *Fusion of Neural Networks. Fuzzy Systems and Genetic Algorithms: Industrial Applications*. Deli, CRC Press LLC, 154–165.
9. Callan R. (2001) *Basic Concepts of Neural Networks*. Moscow, Williams. 516 (in Russian).
10. Gareyev A. F. (2004) Application of Probabilistic Neural Networks for Text Classification Problem. *Nauka i Obrazovaniye* [Science and Education], (11), 105–117 (in Russian).

Received: 25 May 2015

Accepted: 8 February 2016

Published online: 26 September 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-488-502

УДК 620.91:025.173:01

Основные мировые научные журналы в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы»

В. С. Лазарев¹⁾, А. В. Скалабан¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет
Belarusian National Technical University

Реферат. Известно, что при отборе приемлемо репрезентативной выборки мировых научных журналов, использование которых представляется необходимым при качественном выполнении научных исследований, следует ориентироваться не только на специализированные журналы, но и на издания, тематика и названия которых формально никак не связаны с искомыми. В данной статье выявление лучших непрофильных периодических изданий в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» осуществлено с помощью четырех разновидностей цитат-анализа с использованием в качестве основы двенадцати специализированных журналов по проблеме. Уточнена и конкретизирована методика анализа, предложено понятие и термин «фактор восприимчивости дисциплины». В результате получен перечень из 378 мировых периодических изданий, которые планируется использовать при создании комфортной научно-информационной среды с помощью ведущих мировых баз данных, отражающих совокупность наиболее ценных мировых научных журналов, необходимых для качественного выполнения научных исследований по приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. с созданием оперативной системы избирательного оповещения ведущих специалистов – исполнителей соответствующих направлений.

Ключевые слова: журналы, периодические и продолжающиеся издания, цитирование, цитируемость, цитат-анализ, фактор воздействия дисциплины, фактор восприимчивости дисциплины, возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы

Для цитирования: Лазарев, В. С. Основные мировые научные журналы в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» / В. С. Лазарев, А. В. Скалабан // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 488–502

The World Major Scientific Periodicals to Be Used by Researchers of “Renewable Energy, Local and Secondary Energy Resources”

V. S. Lazarev¹⁾, A. V. Skalaban¹⁾

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

Abstract. It is known that the selection of an acceptably representative sample of the world scientific periodicals to be used as backgrounds of a high-quality research should focus not only on

Адрес для переписки

Скалабан Алексей Витальевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Якуба Коласа, 16
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-98-75
library@bntu.by

Address for correspondence

Skalaban Aleksey V.
Belarusian National Technical University
16 Yakub Kolas St.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-98-75
library@bntu.by

specialized journals, but also on periodicals, the topics and the titles of which are formally not related to the research area. In the present study the determination of the best periodicals to be used in research on "Renewable energy, local and secondary energy resources" has been fulfilled with the aid of four varieties of citation analysis, twelve journals specialized in power production being used as the source items of citation data. The methods of the analysis were clarified and elaborated; the concept and the term "discipline receptivity factor" were proposed. The practical result is a list of 378 world periodicals, that is planned to be used in creating a comfortable scientific information environment by using the world leading databases reflecting the most valuable collection of scientific journals that are necessary for quality performance of scientific research on Priority areas of scientific-technical activity in the Republic of Belarus for 2016–2020 followed by the establishment of an operational system of electoral alert leading experts implementing the respective areas.

Keywords: journals, periodicals and serial publications, citation, citedness, citations analysis, discipline impact factor, discipline receptivity factor, renewable energy, local and secondary energy resources

For citation: Lazarev V. S., Skalaban A. V. (2016) The World Major Scientific Periodicals to Be Used by Researchers of "Renewable Energy, Local and Secondary Energy Resources". *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 488–502 (in Russian)

Введение

Важнейшей предпосылкой успешного выполнения исследований по приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. может быть использование ведущих мировых баз данных, отражающих совокупность наиболее ценных научных журналов, необходимых для качественного выполнения научных исследований по направлениям. Ключевые слова здесь «наиболее ценных» и «необходимых». Как убедиться, что создаваемая из совокупности баз данных информационная среда включает действительно нужные для работы источники в приемлемом количестве и достаточном разнообразии?

В контексте изложенного в Научной библиотеке БНТУ с апреля 2016 г. начаты исследования по выявлению наиболее ценных (из всего мирового массива) научных периодических изданий по энергетике, энергоэффективности и атомной энергетике – первому приоритетному направлению научно-технической деятельности в Республике Беларусь [1]. Составной частью данного направления являются возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы. Выявлению лучших периодических изданий в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» (из мирового массива) и посвящена данная статья.

Как установлено в [2], в специализированных журналах по естественным и техническим наукам содержится не более 1/3 совокупного числа журнальных публикаций по искомой проблеме. Поэтому при отборе мировых научных журналов, использование которых представляется необходимым при качественном выполнении научных исследований любой естественно-научной или технической тематики, следует ориентироваться в том числе и на издания, тематика и названия которых формально никак не связаны с искомыми. Выявление и отбор таковых целесообразно проводить с помощью анализа их цитируемости в специализированных журна-

лах [3, 4] и, возможно, на основании данных о цитировании ими специализированных журналов [5]. (Последний подход, будучи апробированным и описанным одним из соавторов еще в [5], не нашел впоследствии сколько-либо заметного применения; во всяком случае, ни в обстоятельном методическом обзоре [6], ни в практически ориентированной методической обзорной статье [7] он не упомянут.) Выбор цитатного метода обусловлен отражением в данных о цитировании/цитируемости причинно-следственных связей между цитирующим и цитируемым объектами: по существу, в них отражаются реальное использование (потребление) объектов источниками и, следовательно, ценность объектов [8]. Получаемые при этом данные призваны иметь прогностическое значение для отбора журналов к будущему использованию при проведении научных исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы».

Необходимо отметить, что данные об использовании конкретного источника, представляющего определенную специальность, в журналах, специализированных в иной (быть может, удаленной) проблематике, в какой-то мере иллюстрируют возможные внешние рынки интеллектуального сбыта результатов научной деятельности. Знакомство же с ними исследователей позволяет им искать возможное приложение своих результатов на междисциплинарном уровне, в сторонних дисциплинах.

Еще одно предварительное методическое замечание касается использования в таких исследованиях дробных цитат-показателей, получивших широкое распространение начиная с 1970-х гг. [9]. Считается, что поправка на число публикаций в цитируемых источниках в соответствующие годы в виде частного от деления числа ссылок на число публикаций призвана устранить преимущество, получаемое более продуктивными журналами, а по существу, направлена на получение данных об используемости (и, соответственно, ценности) средней статьи цитируемого журнала. Но нельзя говорить, что дробные показатели такого рода обладают преимуществами: ведь для исследователя может быть одинаково важным обращаться как к журналам, содержащим ценные статьи в большом количестве, так и к журналам с меньшим числом таких статей. Поэтому для отбора соответствующих периодических изданий следует, в сущности, равноправно и взаимодополняюще применять оба подхода.

Наконец, коснемся временного окна цитирования, т. е. периода, ссылки на который учитываются в исследовании. В последнее время пятилетнее «окно» считается как приемлемым для прогностического использования, так и обеспечивающим достаточную полноту охвата ссылок [10, с. 84–85]. Нами также было решено при анализе цитирования учитывать ссылки на публикации предшествующих пяти лет. Однако мы учитывали и ссылки на выпуск журналов текущего года, т. е. года, в течение которого были сделаны сами ссылки. Подобных ссылок по определению будет немного, их количество может не быть репрезентативным, а работы, появившиеся во втором полугодии, почти не имеют шансов быть процитированными (по-

явившиеся в последних номерах года не имеют этих шансов совсем). Сказанное справедливо и относится в равной степени ко всем журналам. Поэтому искажения, вызванные такой практикой, окажутся величиной постоянной для всех оцениваемых журналов – при включении в массив наиболее оперативных данных и придании большей полноты рассматриваемому массиву.

Выбор исходных специализированных журналов по проблеме

Исследование проводили с применением старейшей и авторитетнейшей библиометрической базы данных Web of Science™, точнее – с помощью ее аналитической надстройки Journal Citation Reports® (далее – JCR), позволяющей получать сведения о цитируемости более 12 тысяч лучших научных журналов, выходящих в мире [10, с. 80–81]. Работы подобного рода начинают с того, что выбирают авторитетные специализированные источники, которые впоследствии служат источниками библиографических ссылок [4, 11, 12] (в рассматриваемом случае при одновременном изучении цитируемости специализированных журналов в прочих – также и объектами цитирования). Такие исходные журналы выбирали из числа 89 изданий, отраженных в категории (т. е. под рубрикой) "Energy & Fuels" Journal Citation Reports® за 2014 г.¹ с обязательным уточнением тематики предполагаемого отобранных источников по данным ULRICHSWEB™ Global Serials Directory², информация которого и служила в ряде случаев окончательным основанием для принятия решения об отборе журнала. Иногда приходилось обращаться к web-сайтам самих журналов, к их последним публикациям. Вообще же, исходные специализированные журналы отбирали с учетом:

- 1) уникальности их тематики;
- 2) значения обычного двухлетнего фактора воздействия [9];
- 3) общей величины их цитируемости в 2014 г. во всех отраженных в JCR журналах;
- 4) тенденции упомянутых показателей к росту или снижению (данные получали из JCR).

В качестве мировых журналов, в совокупности отражающих тематику «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы», были отобраны: Renewable and Sustainable Energy Reviews (USA; ELSEVIER; ISSN: 1364-0321); IEEE Transactions on Sustainable Energy

¹ Работа выполнялась практически полностью в апреле–мае 2016 г., когда данные за 2015-й в Web of Science JCR были еще недоступны.

² База данных Ulrich's Periodicals Directory является самой крупной, описывающей мировой поток серийных (периодических и продолжающихся) изданий (популярных и научных журналов) по всем тематическим направлениям жизнедеятельности. Она содержит описания почти 300 тысяч сериальных изданий, из которых более 200 тысяч – издания, выходящие в настоящее время [13]. Ее применение позволяет уточнить тематику периодического издания, представленную в формулировке его редакции. ULRICHSWEB™ Global Serials Directory – ее онлайн-версия.

(USA; IEEE; ISSN: 1949-3029); BioEnergy Research (USA; SPRINGER; ISSN: 1939-1234); Renewable Energy (UK; ELSEVIER; ISSN: 0960-1481); Solar Energy (USA; PERGAMON-ELSEVIER; ISSN: 0038-092X); Wind Energy (UK; England; WILEY-BLACKWELL; ISSN: 1095-4244); IET Renewable Power Generation (UK; IET; ISSN: 1752-1416); Journal of Energy Resources Technology – Transactions of the ASME (USA; ASME; ISSN: 0195-0738); Journal of Solar Energy Engineering – Transactions of the ASME (USA; ASME; ISSN: 0199-6231); International Journal of Green Energy (USA; TAYLOR & FRANCIS; ISSN: 1543-5075); Journal of Renewable and Sustainable Energy (USA; AIP; ISSN: 1941-7012); Energy Sources Part A – Recovery Utilization and Environmental Effects (USA; TAYLOR & FRANCIS; ISSN: 1556-7036).

Отметим наличие во главе списка обзорного журнала. Существует точка зрения, согласно которой обзорный характер публикаций предполагает обилие библиографических ссылок. Считается, что обзорные издания стремятся к фокусированию на наиболее актуальных направлениях, что, наконец, новые статьи в обзорах могут цитироваться быстрее. Это отдает обзорным изданиям преимущество [11] и должно делать журнал Renewable and Sustainable Energy Reviews несомненным лидером списка в дополнение к его вышеупомянутым высоким библиометрическим показателям.

**Анализ совокупного цитирования в 2014 г.
в 12 специализированных журналах периодических
изданий 2009–2014 гг. и совокупной цитируемости в 2014 г.
этих же 12 журналов 2009–2014 гг. в прочих изданиях**

Соответствующие данные о цитировании и цитируемых журналах брали из JCR. Процедура повторялась для всех 12 журналов. Из таблиц JCR “Citing Journal Data” для каждого из цитирующих изданий также заимствовали данные о цитировании журналов выпусков 2009–2014 гг. в них. Составляли сводную таблицу, в которую для каждого цитируемого издания включали данные о совокупном цитировании в каждом из цитирующих журналов в рассматриваемом временном окне, а также о суммарном цитировании во всех 12 специализированных журналах-источниках. Аналогичную сводную рабочую таблицу составляли для цитируемости тех же 12 специализированных журналов в прочих изданиях; при этом использовали скопированные и обработанные данные таблиц JCR “Cited Journal Data”.

Расчет дробных цитат-показателей

Для расчета дробного цитат-показателя для каждого цитируемого журнала из домашней страницы JCR® (данные “Key Indicators”) заимствовали данные “Citable Items” за 2009–2014 гг., представляющие сумму оригинальных статей и обзоров, опубликованных в цитированных журналах; эти данные суммировали. Далее определяли частное от деления числа ссылок, сделанных на выпуски журнала 2009–2014 гг., к числу citable items в дан-

ном издании в 2009–2014 гг. Это частное от деления является, по существу, показателем, впервые предложенным G. Hirst в 1977-м и названным им *discipline impact factor* – фактором воздействия дисциплины [4, с. 171]. Затем цитируемые журналы были ранжированы как по общему числу цитирований, так и по уровню частного от деления числа ссылок на число citable items. Полученные два ранговых списка совместили в единый список в одной рабочей таблице.

Применительно к сводной рабочей таблице цитируемости тех же 12 специализированных журналов-объектов в прочих изданиях работы по расчету дробного цитат-показателя вели несколько иным образом. Поскольку количество статей, опубликованных 2009–2014 гг. в цитируемом журнале-объекте *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (продолжаем использовать этот пример), на которые могут сослаться цитирующие журналы, – величина постоянная, введение поправки на это количество не изменит смысла долевого показателя его цитируемости в прочих журналах. Использование такой поправки бессмысленно, так как оценке теперь подвержены цитирующие издания.

Поэтому все ссылки, сделанные в 2014 г. на журналы-объекты, рассматриваем теперь с поправкой на количество статей и обзоров, которые содержались в цитирующем издании. Причем в данном случае будем учитывать их количество применительно именно к одному 2014 г. Тогда цитирующие журналы оцениваются с поправкой на их продуктивность в году цитирования, и при введении такой поправки оценивается не активность совокупного цитирования ими журналов-объектов выпуска 2009–2014 гг., представляющих тематику «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы», а активность таковой применительно к средней статье из цитирующего (оцениваемого) журнала. Соответственно при построении рабочей таблицы ячейки вводятся не для суммы публикаций в цитируемом журнале в 2009–2014 гг., а для их числа в цитирующем издании в 2014-м. Таким же образом меняется расчет дробного значения, аналогичного фактору воздействия дисциплины. По аналогии с термином «фактор воздействия дисциплины» будем использовать для обозначения такого индикатора рабочий термин «фактор восприимчивости дисциплины».

Пороговые значения показателей

Для проведения дальнейшей работы следует решить вопрос о пороговом значении рассматриваемых показателей. Пороговое значение должно устанавливаться исходя из здравого смысла: полученные списки не должны быть чрезмерно объемными или слишком компактными. Также опыт показывает, что пороговое значение, равное 15 (для совокупного цитирования/совокупной цитируемости), чаще всего дает удовлетворительные результаты³.

³ Цифра 15 ассоциируется со средним количеством ссылок в одной приемлемой журнальной статье естественно-научного профиля [14]. Данное количество ссылок применительно к годовому массиву научного журнала можно считать минимальным.

Этот порог применяли дважды: на первом этапе в зачет шли данные о журналах, процитированных/цитирующих не менее 15 раз с учетом ссылок на все годы издания, а после обработки данных, набранных с учетом первого ограничения, в итоговые перечни включали данные о журналах, процитированных/цитирующих не менее 15 раз с учетом ссылок на публикации 2009–2014 гг. Что же касается порогового значения используемых дробных показателей цитируемости, выбор такового следует осуществлять уже после получения перечней журналов по результатам совокупного цитирования/совокупной цитируемости, максимально сближая по объему полученные с применением разных подходов списки – не в ущерб здравому смыслу.

Обработка списков журналов и продолжающихся изданий, цитированных в специализированных журналах

На основании совокупного учета ссылок на публикации 2009–2014 гг. выявлено 427 цитируемых наименований. (Здесь мы избегаем слова «журналов», поскольку оказалось, что в цитируемом массиве присутствует ряд нежурнальных изданий.) Применив к рабочей таблице, включающей в себя 427 наименований, порог, равный 15, вторично отбираем цитируемые наименования, выпуски которых именно за 2009–2014 гг. были цитированы совокупно журналами-источниками не менее 15 раз. В результате в списке остается 230 наименований (53,86 %). Далее работали именно с этим сокращенным списком.

Проверка наполнения списка (проверка сокращенных названий цитируемых документов последовательно по JCR, по сайту ULRICHSWEB™ Global Serials Directory и, наконец, по поисковой системе Google) вынудила нас к сокращению списка до 217 наименований за счет исключения из него документов с неидентифицируемыми наименованиями (часть из них представляют собой труды конференций, точные названия которых не поддаются расшифровке).

Обратимся теперь к списку цитируемых журналов, ранжированному по уровню частного от деления числа ссылок на цитируемые журналы выпусков 2009–2014 гг. на число citable items в этих журналах в 2009–2014 гг. Данный список состоит из 380 журналов. На этом этапе следует выбирать пороговое значение величины данного дробного показателя (так называемого фактора воздействия дисциплины [4]), ориентируясь на величину порога, обеспечивающую получение величины, сходной с уже полученными 217 журналами. Замечаем, что в новом списке при установлении круглого значения порога в 0,009 получаем 216 журналов. Эта величина близка к 217, и мы остановимся на ней. 216 журналов составляют 56,84 % всего списка, созданного с применением данного метода. 58 журналов из данного списка не прошли в предыдущий список, как набравшие уровень цитируемости меньше порогового. То есть более четверти (26,85 %) списка, составленного с применением фактора воздействия дисциплины, является его исключительной, несовпадающей частью. Совокупный список составит,

таким образом, 275 наименований журнала (217 + 58). При этом если 58 журналов из данного списка, которые были избраны по фактору воздействия дисциплины, не достигли пороговой величины по общему уровню цитирования, то 49 журналов, избранных по общему уровню цитирования, не достигли избранного нами порога по фактору воздействия дисциплины. Итак, в суммарный список 58 журналов были избраны по фактору воздействия дисциплины (не достигнув пороговой величины по общему уровню цитирования) и 58 были включены только по данным общего уровня цитирования: 49 из них получили малую величину фактора воздействия дисциплины и еще для девяти этот показатель не мог быть рассчитан вследствие отсутствия данных о citable items в JCR. Соответственно 159 журналов (57,82 %) вошли в оба списка.

Пример, который может, на первый взгляд, показаться курьезным, на деле прекрасно иллюстрирует разницу в применяемых подходах. Такой журнал, как *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, традиционно считающийся одним из тех, доступ к которым должен быть обеспечен специалистам практически любого профиля, не прошел по уровню фактора воздействия дисциплины, набрав лишь 0,0032108 (ранг 309). При этом по нормальному совокупному уровню цитирования на публикации 2009–2014 гг. он имеет ранг 71! Однако этот журнал – из «толстых», и его 22424 citable items по самым различным научным направлениям предопределили низкий уровень соответствующего дробного показателя для узкопрофильного специалиста. С другой стороны, такие журналы, как *Energy & Environment* (Великобритания, тематика характеризуется названием) и *The Energy Journal* (США, журнал по экономике энергетики), вошли в итоговый список именно благодаря применению дробного показателя.

Обработка списков журналов и продолжающихся изданий, цитирующих специализированные журналы

На основании совокупного учета ссылок на публикации 2009–2014 гг. в журналах-объектах при установлении ограничения, заключающегося в том, что учитывается не менее 15 ссылок на выпуски журналов-объектов всех лет издания, выявлено 262 наименования документов, цитирующих журналы-объекты. При применении порога, равного 15 ссылкам на публикации журналов-объектов, уже к временному окну список сокращается до 207 наименований. Среди выявленных 207 наименований документов отмечен очень высокий уровень цитируемости журналов-объектов в публикующем труды конференций продолжающемся издании *Energy Proceedings*, не имеющем фактора воздействия. Этот факт, кстати, подтверждает претензии издания к публикации высококачественных материалов конференций по энергетике [15]. Отметим также достаточно высокие показатели еще одного издания, публикующего труды конференций, – ежегодного журнала *Journal of Physics: Conference Series*, не специализированного в области энергетики.

Из выборки в 207 наименований мы были вынуждены исключить (применив процедуры, подобные описанным во втором абзаце предыдущего раздела) семь наименований, которые либо вообще не поддавались расшифровке, либо имели по несколько вариантов расшифровок, либо относились к разовому тому, а не к журналу или хотя бы к продолжающемуся изданию. Кроме того, из списка исключили две серии монографий; итоговый список сократился до 198 наименований.

Обратимся к списку цитирующих журналов, ранжированному по уровню частного от деления числа ссылок на 12 узкоспециализированных журналов 2009–2014 гг. выпуска в цитирующих журналах выпуска 2014 г. на число citable items в цитирующих изданиях в 2014-м, построение которого описано в разделе «Расчет дробных цитат-показателей». Он состоит из 236 журналов. При избрании порога 0,009 на данном этапе работы получаем список из 224 изданий, отбросив всего 12 журналов, находящихся в конце списка.

46 журналов из данного списка не прошли в предыдущий список как набравшие уровень цитируемости меньше порогового. То есть более 12 % итогового списка, составленного с применением фактора восприимчивости дисциплины, является его исключительной, несовпадающей частью. Итоговый же список, составленный по уровню цитируемости 12 специализированных журналов по возобновляемым источникам энергии, местным и вторичным энергоресурсам и дополненный на основании расчета фактора восприимчивости дисциплины, составляет 244 журнала и продолжающихся изданий (специализированных в публикации материалов конференций): $198 + 46 = 244$.

Рассмотрим несколько примеров. Хорватский журнал по морской технике, архитектуре, кораблестроению и сопутствующим производствам *Brodogradnja* (ISSN: 0007-215X) имеет относительно невысокий уровень совокупной цитируемости 12 узкоспециализированных журналов-объектов (14, ранг 199), но вполне высокий ранг фактора восприимчивости дисциплины – 35. Связано это с малым количеством citable items, опубликованных в нем в 2014 г., – всего 29. Китайский журнал *Building Simulation* также имеет не очень высокую цитируемость журналов-объектов – 13 (ранг 207), но более высокий ранг фактора восприимчивости дисциплины (69) за счет относительно небольшого количества citable items (55). У южноафриканского журнала *Journal of Energy in Southern Africa* минимальный проходной уровень по совокупной цитируемости (15), но, опубликовав в 2014 г. всего 30 citable items, он получает высокий фактор восприимчивости дисциплины – ранг 33.

Смысл разницы в величинах показателей в том, что в варианте цитируемости специализированных журналов-объектов фактор восприимчивости дисциплины отражает уровень цитируемости в одной усредненной статье оцениваемого цитирующего журнала. Можно также отметить четыре журнала, вошедших в итоговый список, чей уровень фактора восприимчивости

дисциплины недостаточен вследствие чрезвычайно высокой продуктивности: в PLoS One в 2014 г. опубликовано 30040 citable items, в Physical Chemistry Chemical Physics – 2880, в Journal of Applied Physics – 4260, в Applied Physics Letters – 5042. По продуктивности в 2014-м данные журналы занимают соответственно первое, десятое, четвертое и третье места из списка цитирующих журналов.

Построение и анализ итоговой таблицы, результаты и обсуждение

Данные о журналах и продолжающихся изданиях, выявленных с помощью каждого из четырех показателей, приведены в табл. 1⁴. Построенную таблицу отсортировали по рангам показателя совокупного цитирования их в 12 журналах-источниках (CΣ ранг); для изданий, набравших величину этого показателя, меньше пороговой, – по убыванию значений фактора воздействия дисциплины (CΣ/P ранг); для изданий, не прошедших в итоговую таблицу по результатам анализа их цитирования в 12 журналах-источниках, – по убыванию значений показателя совокупной цитируемости в них 12 журналов-объектов (RΣ ранг); для изданий, которые и по этому показателю набрали величину, меньше пороговой, – по убыванию значений фактора восприимчивости дисциплины (RΣ/P ранг). Всего в таблицу вошло 378 наименований журналов и периодических изданий. 275 из них – издания, отобранные на первом этапе на основании данных об их цитировании специализированными журналами-источниками (как совокупного цитирования, так и цитирования с поправкой на число публикаций или фактор воздействия дисциплины), что уже составляет 73,54 % от общего количества журналов в таблице. Исключительная доля списка журналов и продолжающихся изданий, составленного по данным цитируемости в них 12 специализированных журналов-объектов, представляет собой перечень из 103 наименований – 42,21 % от всего этого списка.

В табл. 1 имеются фоновые выделения для сохраненных в итоговом перечне сериальных трудов конференций, цитирующих специализированные журналы-объекты. Содержание таблицы – это перечень журналов и продолжающихся изданий, материалы которых авторы считают обязательным для включения в создаваемую информационную среду в помощь выполнения исследований по таким приоритетным направлениям, как энергетика, энергоэффективность и атомная энергетика (в части возобновляемых источников энергии, местных и вторичных энергоресурсов). При этом одновременное применение четырех методик разработки данного перечня повышает надежность отбора [16].

⁴ Табл. 1 общим объемом 14 страниц представлена в статье в виде фрагмента. С ее полной версией можно ознакомиться в закладке «дополнительная информация» на странице электронной версии данной статьи, размещенной на сайте электронной версии журнала (<http://energy.bntu.by>).

Таблица 1

Мировые научные журналы и продолжающиеся издания в помощь выполнения исследований по проблеме «Возобновляемые источники энергии, местные и вторичные энергоресурсы» и продолжающиеся издания, выявленные с помощью четырех цитат-показателей (фрагмент)

The list of world major scientific periodicals to be used by researchers, of "Renewable energy local and secondary energy resources" developed with the aid of four citation indicators (extract)

№ п/п	Impact factor	Цитируемое/цитирующее издание (полное название)	CΣ	CΣ ранг	CΣ/P (2009–2014)	CΣ/P ранг	RΣ	RΣ ранг	RΣ/P (2014)	RΣ/P ранг
1	5.901	RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	4519	1	1,4433	1	5170	1	6,1916	1
2	3.476	RENEWABLE ENERGY	2749	2	0,9103	5	2352	2	2,2563	8
3	3.469	SOLAR ENERGY	2074	3	1,0427	3	1897	4	3,8635	3
4	2.575	ENERGY POLICY	1935	4	0,4164	13	507	14	0,806	26
5	5.613	APPLIED ENERGY	1811	5	0,332	18	1876	6	1,4889	18
6	4.494	BIORESOURCE TECHNOLOGY	1552	6	0,1699	29	601	10	0,4031	43
7	4.844	ENERGY	1336	7	0,3007	19	1883	5	1,4944	17
8	3.394	BIOMASS & BIOENERGY	743	8	0,3344	17	288	22	0,694	30
9	3.313	INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY	733	9	0,0685	58	534	11	0,2291	71
10	4.380	ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT	730	10	0,2375	22	2010	3	2,0324	10
11	2,884	ENERGY AND BUILDINGS	682	11	0,2405	22	744	8	0,8621	23
12	3.520	FUEL	663	12	0,1555	33	468	15	0,3956	45
13	5.337	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS	587	13	0,2098	25	225	27	0,4294	40
14	2.814	IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS	520	14	0,2867	20	162	34	0,485	34
15	2.739	APPLIED THERMAL ENGINEERING	503	15	0,146	36	530	12	0,605	31
16	3.069	WIND ENERGY	399	16	0,9366	4	360	17	3,0252	5
17	6.498	IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS	399	16	0,1252	41	44	95	0,0634	135

Окончание табл. 1

№ п/п	Impact factor	Цитируемое/цити- рующее издание (полное название)	СΣ	СΣ ранг	СΣ/Р (2009–2014)	СΣ/Р ранг	РΣ	РΣ ранг	РΣ/Р (2014)	РΣ/Р ранг
18	3.656	IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY	318	18	1,191	2	314	21	2,0795	9
19	6.008	IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS	306	19	0,1175	43	34	113	0,0534	147
20	2.790	ENERGY & FUELS	301	20	0,0629	61	244	25	0,2884	59
21	6.217	JOURNAL OF POWER SOURCES	301	20	0,0349	96	159	35	0,0743	125
22	3.352	FUEL PROCESSING TECHNOLOGY	288	22	0,1613	32	138	39	0,368	48
23	2.326	IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION	283	23	0,4078	14	47	90	0,4519	39
24	2.383	INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER	262	24	0,0574	67	208	29	0,2129	75
25	3.341	BUILDING AND ENVIRONMENT	258	25	0,1461	35	152	36	0,4677	36
26	0.904	JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY	254	26	0,2822	21	612	9	2,448	7
27	1.904	IET RENEWABLE POWER GENERATION	241	27	0,806	6	179	33	1,967	11
28	7.584	PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS	236	28	0,3734	16	77	57	0,5969	32
29	20.523	ENERGY & ENVIRONMENTAL SCIENCE	231	29	0,111	45	77	57	0,2121	76
30	1.215	INTERNATIONAL JOURNAL OF GREEN ENERGY	230	30	0,6443	8	274	23	3,7534	4

СΣ – величина совокупного цитирования журнала в 12 журналах-источниках; СΣ ранг – ее ранг; СΣ/Р – величина фактора воздействия дисциплины; СΣ/Р ранг – ее ранг; РΣ – величина совокупной цитируемости в журнале 12 журналов-объектов; РΣ ранг – ее ранг; РΣ/Р – величина фактора восприимчивости дисциплины; РΣ/Р ранг – ее ранг.

СΣ – stands for the magnitude of a total level of citations to a journal under evaluation from 12 source journals; СΣ ранг – stands for its rank; СΣ/Р – stands for the magnitude of a “discipline impact factor” of a journal under evaluation; СΣ/Р ранг – stands for its rank; РΣ – stands for the magnitude of a total level of citedness of 12 object journals (the same as source journals) in a journal under evaluation; РΣ ранг – stands for its rank; РΣ/Р – stands for the magnitude of a “discipline receptivity factor” of a journal under evaluation; РΣ/Р ранг – stands for its rank.

При изучении цитируемости журналов различной тематики в 12 специализированных журналах-источниках выделяется выдающаяся роль главы списка – журнала *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, что подтверждает, скорее, точку зрения [11] на применение обзорных журналов в качестве источников изучаемых библиографических ссылок, нежели точку зрения [12], автор которой не рекомендовал использование в качестве журналов-источников обзорных периодических изданий. С другой стороны, при рассмотрении *Renewable and Sustainable Energy Reviews* в качестве объекта цитирования заметно, что его роль (при несомненном лидерстве) явно меньше. Также в первой части нашего исследования при всей значительности роли данного журнала исключительным он не оказывается, и необходимость привлечения прочих источников не отменяет.

Отметим, что авторами статьи исповедуется и практикуется точка зрения, согласно которой для создания соответствующих перечней следует также изучать цитируемость специализированных журналов в прочей периодике и продолжающихся изданиях, отбирая активно цитирующие издания [4]. При этом не предполагается, что они (подобно цитируемым) обеспечивают предоставление наиболее ценной информации, но имеется в виду, что цитирующие издания представляют собой информацию о потенциальном рынке сбыта тех научных достижений, поиском применения которых озабочены авторы специализированных журналов.

Полученные результаты имеют интерес и в том контексте, что университет, в научной библиотеке которого они были получены, издает международный журнал по энергетике [17], а научная библиотека отвечает за поддержание его функционирования в режиме open access. Причем как издатель, так и библиотека осуществляют мероприятия, направленные на интеграцию этого журнала, равно как и других журналов, издаваемых университетом, в мировое научное информационное пространство и на повышение престижа и качества журналов [18].

ВЫВОД

Создан перечень журналов и продолжающихся изданий, материалы которых авторы считают обязательными для включения в создаваемую информационную среду в помощь выполнения исследований по таким приоритетным направлениям, как энергетика, энергоэффективность и атомная энергетика (в части возобновляемых источников энергии, местных и вторичных энергоресурсов)*.

ЛИТЕРАТУРА

1. О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 22 апр. 2015 г., № 166. Режим доступа: <http://www.scienceportal.org.by/upload/2015/April/SandT.pdf>. Дата доступа: 20.06.2016.

* Авторы выражают благодарность В. Гурееву, Н. Мазову, В. Пислякову за плодотворное обсуждение и полезные советы, В. Кравченко за помощь в работе с таблицами в среде Microsoft Excel.

2. Bradford, S. C. *Documentation* / S. C. Bradford. 2nd ed. London: Lockwood, 1953. P. 141–159.
3. Gross, P. L. K. *College Libraries and Chemical Education* / P. L. K. Gross, E. M. Gross // *Science*. 1927. Vol. 66, No 1713. P. 385–389.
4. Hirst, G. *Discipline Impact Factor – a Method for Determining Core Journal List* / G. Hirst // *J. Amer. Soc. Inform. Sci.* 1978. Vol. 29, No 4. P. 171–172.
5. Лазарев, В. С. Информационная работа в НИИ медико-биологического профиля / В. С. Лазарев // *Научно-техническая информация*. Сер. 1. 1984. № 6. С. 14–15.
6. Гуреев, В. Н. Использование библиометрии для оценки значимости журналов в научных библиотеках / В. Н. Гуреев, Н. А. Мазов // *Научно-техническая информация*. Сер. 1. 2015. № 2. С. 8–19.
7. Гуреев, В. Н. Модели и критерии отбора изданий в фонд научной библиотеки / В. Н. Гуреев, Н. А. Мазов // *Научные и технические библиотеки*. 2015. № 1. С. 31–50.
8. Lazarev, V. S. *On Chaos in Bibliometric Terminology* / V. S. Lazarev // *Scientometrics*. 1996. Vol. 35, No 2. P. 271–277.
9. Garfield, E. *Citation Analysis as a Tool of Journal Evaluation* / E. Garfield // *Science*. 1972. Vol. 148, No 4060. P. 471–479.
10. *Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии* / М. Акоев [и др.]. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 250 с.
11. Sengupta, I. N. *Impact of Scientific Serials on the Advancement of Medical Knowledge: an Objective Method of Analysis* / I. N. Sengupta // *International Library Review*. 1972. Vol. 4. P. 169–195.
12. Hafner, A. W. *Citation Characteristics of Physiology Literature, 1970–1972* / A. W. Hafner // *International Library Review*. 1975. Vol. 7. P. 85–115.
13. *Ulrich's Periodicals Directory* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ulrich%E2%80%99s_Periodicals_Directory. Дата доступа: 20.06.2016.
14. Прайс, Д. С. Квоты цитирования в точных и неточных науках, технике и не-науке / Д. С. Прайс // *Вопросы философии*. 1971. № 3. С. 149–155.
15. *Energy Procedia* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.journals.elsevier.com/energy-procedia>. Дата доступа: 16.05.2016.
16. *SciVal: Руководство по показателям SciVal. Версия 1.01; февраль 2014* / сост. Л. Колледж, Р. Верлинд; пер. с англ. В. Н. Гуреева, под ред. Н. А. Мазова. М.: Эльзевир, 2014. 96 с.
17. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ: междунар. науч.-техн. журнал* (ISSN: 2414-0341 (online)) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energy.bntu.by>. Дата доступа: 16.06.2016.
18. Скалабан, А. В. Тенденции в продвижении и популяризации научных публикаций учебных учреждений высшего образования: опыт научной библиотеки БНТУ / А. В. Скалабан, И. В. Юрик // *Библиотеки в информационном обществе: сохранение традиций и развитие новых технологий: докл. Междунар. науч. конф., Минск, 3–4 дек. 2014 г. / ГУ «Белорусская сельскохозяйственная библиотека имени И. С. Лупиновича» Национальной академии наук Беларуси; редкол.: В. В. Юрченко [и др.]. Минск: Ковчег, 2014. С. 138–144.*

Поступила 15.06.2016 Подписана в печать 16.08.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. *Priority Directions of the Research and Technical Activities in the Republic of Belarus in the Years 2016–2020*. Decree of the President of the Republic of Belarus. 22 April 2015, No 166. Available at: <http://www.scienceportal.org.by/upload/2015/April/SandT.pdf>. (Accessed 20 June 2016) (in Russian).
2. Bradford S. C. (1953) *Documentation*. 2nd ed. London, Lockwood, 141–159.
3. Gross P. L. K., Gross E. M. (1927) *College Libraries and Chemical Education*. *Science*, 66 (1713), 385–389.

4. Hirst G. (1978) Discipline Impact Factor – a Method for Determining Core Journal List. *J. Amer. Soc. Inform. Sci.*, 29 (4), 171–172.
5. Lazarev V. S. (1984) Information Work in a Research Institution of Medical-and-Biological Profile. *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya Ser. 1* [Research-and Technical Information. Ser. 1], (6), 14–15 (in Russian).
6. Gureyev V. N., Mazov N. A. (2015) Use of Bibliometrics for Journal Significance Evaluation in Research Libraries; *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya. Ser. 1*. [Research-and Technical Information. Ser. 1], (2), 8–19 (in Russian).
7. Gureyev V. N., Mazov N. A. (2015) Selection Models and Criteria for Scientific Library Collection Development. *Nauchniye i Tekhnicheskiye Biblioteki* [Research and Technical Libraries], (1), 31–50 (in Russian).
8. Lazarev V. S. (1996) On Chaos in Bibliometric Terminology. *Scientometrics*, 35 (2), 271–277.
9. Garfield E. (1972) Citation Analysis as a Tool of Journal Evaluation. *Science*, 148 (4060), 471–479.
10. Akoev M., Markusova V., Moskaleva O., Pisyakov V. (2014) *Scientometrics Manual: Indices of Science and Technology Development*. Yekaterinburg, Ural University Publ. 250 (in Russian).
11. Sengupta I. N. (1972) Impact of Scientific Serials on the Advancement of Medical Knowledge: an Objective Method of Analysis. *International Library Review*, 4, 169–195.
12. Hafner, A. W. (1975) Citation Characteristics of Physiology Literature, 1970–1972. *International Library Review*, 7, 85–115.
13. Ulrich's Periodicals Directory. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ulrich%E2%80%99s_Periodicals_Directory. (Accessed 20 June 2016).
14. Price D. J. de Solla. (1970) Citation Measures of Hard Science, Soft Science, Technology and Nonscience. C. E. Nelson, D. K. Pollock (ed.). *Communication Among Scientists and Engineers*. Lexington, Mass.: Heath Lexington, 3–22.
15. Energy Procedia. Available at: <http://www.journals.elsevier.com/energy-procedia>. (Accessed 15 May 2016).
16. Colledge L., Verlinde R. (2014) *SciVal: SciVal Metrics Guidebook. Version 1.01. February 2014*. Elsevier. 96.
17. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.: International Scientific-and-Technical Journal]. Available at: <http://energy.bntu.by> (Accessed 20 June 2016) (in Russian).
18. Skalaban A. V., Yurik I. V. (2014) Trends in Promotion and Publicizing of Scientific Publications of the Higher Educational Establishment Researchers: the Experience of the BNTU Research Library. *Libraries in the Information Society: Customs Preservation and New Technologies Development: Presentations at the International Scientific Conference, Minsk, Dec. 3–4, 2014, Belarusian Agricultural Library*. Minsk, Kovcheg, 138–144 (in Russian).