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

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

# ЭНЕРГЕТИКА

Том 63, № 1

2020

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

## Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Simulation of Thin-	
Film Solar Cells with a CuInSe <sub>2</sub> Chalcopyrite Structure	
(Есман А.К., Зыков Г.Л., Потачиц В.А., Кулешов В.К. Моделирование	
тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe <sub>2</sub> )	5
Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. Maintaining the Sustainable Energy Systems:	
Turning from Cost to Value	
(Письменная У. Е., Трипольская Г. С. Обеспечение устойчивого развития	
энергетических систем: переход от стоимости к ценности	14
Нгуен Т. Н., Сизов В. Д., Ву М. Ф., Ку Т. Т. Х. Оценка эффективности работы	
солнечной электростанции на крыше здания в Ханое	30

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., Дерюгина Е. А. Сниже-	
ние влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих	
входных сигналов релейной защиты	42
Бладыко Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разны-	
ми натяжными гирляндами изоляторов	55
Баламетов А. Б., Халилов Э. Д. Моделирование режимов электрических сетей	
на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса	66

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Iokova I. L., Kalinichenko A. S. Calculation of Heat Exchange on the Surface	
of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals	
(Иокова И. Л., Калиниченко А. С. Расчет теплообмена на поверхности гибко-	
го теплообменника для применения в мобильных госпиталях)	81
Кравченко В. В., Цыганкова С. Д. Влияние коррозии конструкционных мате-	
риалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР	89

#### Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

#### Редакционная коллегия

В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),

В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),

М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),

В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ППІ 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),

И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина), П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша).

А. С. КАЛИ́НИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),

А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),

А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),

Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),

Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),

А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),

НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),

Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),

А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),

В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),

И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),

Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),

В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),

Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),

Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),

Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)

#### Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

#### Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г. Регистрационный номер 1257

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

Подписано к печати 30.01.2020. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . 2020. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, 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, 2020

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

# PROCEEDINGS OF THE CIS HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS



V. 63, No 1

2020

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

## Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

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

## CONTENTS

#### ENGINEERING

<b>Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K.</b> Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe <sub>2</sub> Chalcopyrite Structure	5
<b>Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S.</b> Maintaining the Sustainable Energy Systems:	14
Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. Evaluation of Work Efficiency	14
of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City	30
ELECTRICAL POWER ENGINEERING	
<b>Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A.</b> Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals	42
Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. Re- ducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals	42 55

#### HEAT POWER ENGINEERING

Iokova I. L., Kalinichenko A. S. Calculation of Heat Exchange on the Surface of	
a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals	81
Kravchenko V. V., Tsygankova S. D. Effect of Corrosion of the Fuel Rod Construc-	
tion Materials on the Radiation Safety of Nuclear Power Plants with PWR	89

#### Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

#### **Editorial Board**

W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),

- 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 State Technological University, Minsk, Republic of Belarus) (First Deputy Editor-in-Chief),
- A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation).

A. KONNOV (Lund University, Sweden),

Federation).

B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation).

K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),

A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),

NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine), E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk,

Russian Federation),

A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),

V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),

I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),

B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),

V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),

V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),

E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),

E. UŚPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),

- B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
- L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)

#### **Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk**

Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th Reg. No 1257

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

Passed for printing 30.01.2020. Dimension of paper  $60 \times 84^{1/8}$ . Coated paper. Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,25. An edition of 100 copies. Date of publishing 2020. 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, 2020

V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13

UDC 621.383.51

## Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe<sub>2</sub> Chalcopyrite Structure

A. K. Esman<sup>1)</sup>, G. L. Zykov<sup>1)</sup>, V. A. Potachits<sup>1)</sup>, V. K. Kuleshov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. By using numerical simulation, the operating temperatures of a thin-film solar cell based on CuInSe<sub>2</sub> have been determined and the solar radiation density values, at which stabilization of the temperature operating conditions of the thin-film solar cell is not required, have been optimized. The maximum possible efficiency value of ~14.8 % is achieved under actual operating conditions, and is maintained by the incoming thermal energy as both emitted in this cell and infrared radiation of the sun and the environment. A model of the proposed thin-film solar cell was implemented in the COMSOL Multiphysics program environment with the use of the Heat Transfer Module. The operating temperatures of the solar cell without thermal stabilization under conditions of the diurnal and seasonal variations of both the ambient temperature and the power density of the AM1.5 solar spectrum have been determined. The maximum value of this power density was varied from 1.0 to 500 kW/m<sup>2</sup> when using concentrators. The obtained values of operating temperatures of the thin-film solar cell were used to determine its main parameters in the SCAPS-1D program. The graphs of the operating temperature, efficiency and fill factor of the thin-film solar cell versus the solar radiation density are provided. It is shown that in order to obtain the highest possible efficiency of a solar cell, it is necessary to use concentrated solar radiation with a power density, the maximum value of which should be 8 kW/m<sup>2</sup> in July and 10 kW/m<sup>2</sup> in January. In the case of lower and higher values of power density, an appropriate thermal stabilization of the cell under consideration is necessary. The dependencies of efficiency, fill factor and open-circuit voltage versus the stabilization temperature of the solar cell, temperature gradients at the interfaces of the thermoelectric layer were also calculated. It is shown that by choosing optimal values of the thermal stabilization, the efficiency of the proposed solar cell may be about 15 % or more.

**Keywords:** CuInSe<sub>2</sub> thin-film solar cell, numerical simulation, COMSOL Multiphysics, SCAPS-1D, thermoelectric layer, photoelectric converter, solar concentrator, solar radiation density, current-voltage characteristic, fill factor, efficiency

For citation: Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. (2020) Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe<sub>2</sub> Chalcopyrite Structure. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 5–13. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13

# Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe<sub>2</sub>

А. К. Есман<sup>1)</sup>, Г. Л. Зыков<sup>1)</sup>, В. А. Потачиц<sup>1)</sup>, В. К. Кулешов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. С помощью численного моделирования определены рабочие температуры тонкопленочного солнечного элемента на основе CuInSe<sub>2</sub> и оптимизированы значения плотности мощности солнечного излучения, при которых не требуется стабилизация температурного

Адрес для переписки	Address for correspondence
Есман Александр Константинович	Esman Alexander K.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65,	65 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-00-50	Tel.: +375 17 331-00-50
ak_esman@bntu.by	ak_esman@bntu.by

режима данного элемента. Максимально возможное значение КПД ~14.8 % достигается при реальных условиях эксплуатации и поддерживается за счет поступающей тепловой энергии, как выделяющейся в этом элементе, так и инфракрасных излучений – солнца и окружающей среды. Модель предлагаемого тонкопленочного солнечного элемента была реализована в программной среде COMSOL Multiphysics с использованием модуля «Теплопередача». Определены рабочие температуры солнечного элемента без термостабилизации в условиях сезонного и суточного изменения температуры окружающей среды и плотности мощности солнечного излучения спектра АМ1,5, максимальное значение которой варьировалось в пределах от 1 до 500 кВт/м<sup>2</sup> при использовании концентраторов. Полученные значения рабочих температур тонкопленочного солнечного элемента использовались при определении основных его параметров в программе SCAPS-1D. Приведены графики зависимостей рабочей температуры, коэффициента полезного действия и коэффициента заполнения тонкопленочного солнечного элемента от плотности мощности солнечного излучения. Показано, что для получения максимально возможного КПД солнечного элемента необходимо использовать концентрированное солнечное излучение с максимальным значением плотности мощности 8 кВт/м<sup>2</sup> в июле и 10 кВт/м<sup>2</sup> в январе. В случае более низких и высоких этих величин необходима соответствующая термостабилизация рассматриваемого элемента. Также рассчитаны зависимости КПД, коэффициента заполнения и напряжения холостого хода от температуры стабилизации солнечного элемента, градиенты температур на границах раздела термоэлектрического слоя. Показано, что при выборе оптимальных значений термостабилизации эффективность предлагаемого солнечного элемента может составлять порядка 15 % и более.

Ключевые слова: тонкопленочный солнечный элемент CuInSe<sub>2</sub>, численное моделирование, COMSOL Multiphysics, SCAPS-1D, термоэлектрический слой, фотоэлектрический преобразователь, концентратор солнечного излучения, плотность мощности солнечного излучения, вольт-амперная характеристика, коэффициент заполнения, коэффициент полезного действия

Для цитирования: Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe<sub>2</sub> / А. К. Есман [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 5–13. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13

#### Introduction

Special attention in modern solar energy is paid to the search for new semiconductor compounds that could replace single-crystal silicon cells. For example, CuInSe<sub>2</sub> ternary compounds with the chalcopyrite structure can be used as these compounds. Such compounds are being actively investigated as materials for thin-film solar cells. As it is known, light absorption in a solar cell with a CuInSe<sub>2</sub> structure is accompanied by direct optical transitions. Compared to monocrystalline silicon, direct exposure to sunlight is not a prerequisite for efficient operation of a CuInSe<sub>2</sub>-based solar cell. Advantages of CuInSe<sub>2</sub>-based thinfilm solar cells are also homo- and heterojunctions, flexibility, high radiation resistance, environmental safety and cost [1]. The efficiency of such solar cells is approaching 23 % yet [2–4]. However, the used vacuum processes and the emerging technological difficulties in the production of photovoltaic modules with the target efficiency value lead to the fact that the final product cost is increased significantly.

Naturally, one of the crucial tasks is the development of methods for manufacturing low-cost thin-film solar cells (SCs) with acceptable values of efficiency. Development and research in this direction made it possible to create CuInGaSe<sub>2</sub>-based thin-film solar cells with an efficiency of 14–17 % [5]. These solar cells are a finished product for commercialization.

Another crucial task is to increase the efficiency of solar cells and to expand the range of operating temperatures at which these solar cells can be efficiently operated under irradiation with concentrated solar radiation, even in the absence of thermal stabilization. The study of the solar cells parameters when their operating temperature is changed is of a practical interest, since these cells in terrestrial conditions are most often exposed to temperatures ranging from 15 °C to 50 °C and more when using solar radiation concentration systems [6]. Moreover, the performance of a solar cell is affected by temperature, since its operating parameters such as open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), short circuit current ( $J_{sc}$ ), fill factor (*FF*) and efficiency are depended on the operating temperature ( $T_{op}$ ) [7].

The purpose of this work is to simulate a  $CuInSe_2$ -based cell under conditions of increased operating temperature by using concentrators and to optimize the values of the solar power density when the maximum possible efficiency of the SCs is maintained in the absence of operating temperature stabilization. To solve this problem, the used software is taken into account whole energy of both released in the cell under study and visible and infrared radiation (IR): the sun and the environment.

#### Construction of the thin-film solar cell



The original thin-film solar cell with a CuInSe<sub>2</sub> chalcopyrite structure is shown in the Fig. 1 [8], where the first electrode layer 2, the thermoelectric layer 3 based on CuInSe<sub>2</sub>, the second electrode layer 4, the photoelectric converter 5 and 6 consisting of CuInSe<sub>2</sub> and CdS layers respectively, as well as a transparent electrode 7 are electrically connected and sequentially arranged on the polished face surface of the substrate 1 made of stainless steel. The transparent electrode 7 is comprised of zinc oxide with a band gap of 3.3 eV and a visible light transmittance of more than 80 %.



## Operation algorithm of the thin-film solar cell

The visible part of the input solar radiation transmitted through the electrode 7 is absorbed in the photoelectric converter 5 and 6, which generates electric charges. At the same time, the infrared part of the input radiation heats the photoelectric converter 5 and 6. Moreover, the generated charges in the CuInSe<sub>2</sub> layer of the converter 5 and 6 are separated by the electric field of the p-n junction, which leads to the generation of a photo-electromotive-force (photo-emf) between the transparent electrode 7 and the second electrode layer 4. In addition, the remaining fraction of the photoelectric converter 5 and 6. Therefore, a temperature gradient is generated between the first 2 and the second 4 electrode layers. This gradient induces thermo-electromotive-force (thermo-emf) between the upper and lower sides of the thermoelectric layer 3. That, in its turn, leads to the appearance of the output voltage of the solar cell consisting of photo and thermal EMF between the first electrode layer 2, electrically connected to the underside

of thermoelectric layer 3, and the transparent electrode 7. In its turn, the latter leads to the occurrence of the output voltage of the solar cell consisting of photoand thermo-emf between the first electrode layer 2, electrically connected to the lower side of the thermoelectric layer 3, and the transparent electrode 7.

Since the part of thermal energy in the proposed solar cell is used to increase the efficiency of solar energy conversion, there will be no need to stabilize the solar cell temperature and its efficiency will be as high as possible at the certain value of the power density of the AM1.5 solar spectrum.

## **Computer simulation**

Numerical simulation is usually used for designing of solar cells and batteries based on them using concentrators. Moreover, the maximum possible number of parameters affecting the performance of thin-film solar cells is taken into account. The used COMSOL Multiphysics program environment allows you to take into account all of the specified and/or variable parameters when solving most scientific and engineering problems. The simulation was performed by using the Heat Transfer Module of this program environment [9], in which the developed numerical model of a thin-film solar cell was calculated in the absence of stabilization of its temperature [10, 11]. The calculations were carried out taking into account the diurnal and seasonal variations of both the ambient temperature and the power density of the AM1.5 solar spectrum for the geographical coordinates of Minsk. The values of the solar power density ranged from 1 to 500 kW/m<sup>2</sup> by using concentrators. The average minimum and maximum monthly ambient temperatures data in Minsk (from the site: http://belmeteo.net) were taken into account in the modeling.

The obtained values of the operating temperatures of the proposed solar cell were used in the SCAPS-1D program, the description and calculation procedure of which are given in the literature [12, 13], and the action panel is shown in Fig. 2.



Fig. 2. SCAPS-1D action panel

This program was developed for the numerical solution of the Poisson equation and the continuity equation for charge carriers. It can be used to calculate one-dimensional thin-film solar cells [6, 14]. The physical parameters used in the simulation of each layer of a thin-film solar cell are shown in the Tab. 1.

Table 1

Parameters	Transparent electrode (ZnO)	Layer of photo- electric con- verter (CdS)	Layer of photo- electric con- verter (CuInSe <sub>2</sub> )	Second electrode layer (Mo)	Thermoelectric layer (CuInSe <sub>2</sub> )	First electrode layer (Mo)
Layer thickness d, µm	0.05	0.05	1.00	1.00	1.00	1.00
Bandgap $E_g$ , eV	3.30	2.40	1.04	1.20	1.04	1.20
Electron affinity $X_e$ , eV	4.55	4.45	4.30	4.50	4.30	4.50
Dielectric constant, ɛ	9.00	10.00	10.00	13.60	10.00	13.60
Density of states at con- duction band $N_C$ , cm <sup>-3</sup>	4·10 <sup>18</sup>	$4 \cdot 10^{18}$	2.2·10 <sup>18</sup>	2.2·10 <sup>18</sup>	2.2·10 <sup>18</sup>	2.2·10 <sup>18</sup>
Density of states at valence band $N_V$ , cm <sup>-3</sup>	4·10 <sup>18</sup>	$4 \cdot 10^{18}$	1.8·10 <sup>19</sup>	1.8·10 <sup>19</sup>	1.8·10 <sup>19</sup>	1.8·10 <sup>19</sup>
Thermal velocity of electrons $v_e$ , cm/s	1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>7</sup>	1.107	1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>7</sup>
Thermal velocity of holes $v_p$ , cm/s	1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>7</sup>	1·10 <sup>7</sup>	$1.10^{7}$	1·10 <sup>7</sup>	$1 \cdot 10^{7}$
Electron mobility $\mu_n$ , cm <sup>2</sup> /(V·s)	100	50	100	100	100	100
Hole mobility $\mu_p$ , $cm^2/(V \cdot s)$	25	20	25	50	25	50
Donor concentration $N_D$ , cm <sup>-3</sup>	$1.10^{18}$	$1 \cdot 10^{18}$	$4 \cdot 10^{16}$	0	4·10 <sup>16</sup>	0
Acceptor concentra- tion $N_A$ , cm <sup>-3</sup>	0	0	$2 \cdot 10^{16}$	$2.7 \cdot 10^{16}$	$2.10^{16}$	$2.7 \cdot 10^{16}$

Physical parameters of the proposed thin-film solar cell

#### Analysis of the results

From the graphs shown in Fig. 3, it follows, that with an increase in the solar power density, the maximum value of which varies within 1 kW/m<sup>2</sup> <  $P_{\text{max}}$  < 8 kW/m<sup>2</sup> (in July) and 1 kW/m<sup>2</sup> <  $P_{\text{max}}$  < 10 kW/m<sup>2</sup> (in January), the operating temperature  $T_{op}$  increases even during thermal stabilization (Fig. 3a, curve 1). At the same time, to achieve maximum efficiency of a thin-film solar cell, this cell heating or lighting by concentrated solar radiation is required (Fig. 3b). At the specified simulation conditions, the efficiency has maximum values under the stabilization conditions at  $P_{\text{max}} = 2 \text{ kW/m^2}$  and without it at  $P_{\text{max}} = 8 \text{ kW/m^2}$  (in July) and  $P_{\text{max}} = 10 \text{ kW/m^2}$  (in January). In this case, the fill factor would increase to ~69.6 % (Fig. 3c) and the open circuit voltage would decrease to ~0.49 V (Fig. 3d). With a further increase in the solar power density of  $P_{\text{max}} > 8 \text{ kW/m^2}$  (in July) and  $P_{\text{max}} > 10 \text{ kW/m^2}$  (in January), in order to maintain the maximum efficiency, cooling of the solar cell is required. In the absence of solar cell cooling, the open circuit voltage would decrease and the fill factor

would change slightly. Values of solar power density of  $P_{\text{max}} = 8 \text{ kW/m}^2$  (in July) and  $P_{\text{max}} = 10 \text{ kW/m}^2$  (in January) are optimal when using proposed thin-film solar cell, since in this case there is no need to stabilize its temperature to maintain the maximum value of efficiency.

Similarly, the parameters of the considered solar cell are temperature dependent, with the only difference being that the extremes in the efficiency graphs are more pronounced, i. e., the dependencies of the fill factor have both maxima and minima at  $P_{\text{max}} > 2 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 4a, b). However, at sufficiently high concentrations of solar radiation, such as, for example, at  $P_{\text{max}} = 500 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 4b, curve 5), the fill factor reaches maximum values already at lower stabilization temperatures (*T*). In this case, the dependencies of the fill factor no longer have a minimum in the considered stabilization temperature range. This efficiency behavior (Fig. 4a) is determined by the opposite direction of the change in the fill factor (Fig. 4b) and by the change in the open circuit voltage (Fig. 4c), which determine the maximum output power of the solar cell together with the short circuit current.



*Fig. 3.* The dependencies of operating temperature (a), efficiency (b), fill factor (c) and open circuit voltage (d) of CuInSe<sub>2</sub>-based thin-film solar cell with the temperature stabilization (curve 1) and without it in the middle of July (curve 2) and January (curve 3) versus the different values of the solar power density

The proposed CuInSe<sub>2</sub>-based solar cell, when exposed to solar radiation with a power density  $P_{\text{max}} = 1 \text{ kW/m}^2$  and stabilization temperatures of more than 50 °C, has an efficiency higher than, for example, the CuInGaSe<sub>2</sub>-based solar cell, proposed in [6], when exposed to solar radiation with the same solar power density (Fig. 4a, curve 1').

According to conducted calculations, the efficiency of the proposed CuInSe<sub>2</sub>based thin-film solar cell with temperature stabilization at T = 77.5 °C reaches 15.02 % when a solar power density is equal to 2 kW/m<sup>2</sup> (Fig. 4a, curve 2). At the indicated power density and the absence of temperature stabilization, the thin-film solar cell heats up to 48.6 °C in July and 29.3 °C in January (Fig. 3a, curves 2, 3). At the same time, its efficiency reaches 14.61 % and 13.43 %, respectively, in July and January (Fig. 3b, curves 2, 3).



Fig. 5 shows the daily changes of the temperature gradients at the upper and lower boundaries of the thermoelectric layer, i. e. between the electrode layers that cause the generation of thermo-emf at  $P_{\text{max}} = 8$  and 10 kW/m<sup>2</sup>, respectively, in July and January. As it can be seen from the dependencies plotted in Fig. 5, the temperature gradient has a maximum value between 13 and 14 hours of the day at the lower boundary of the thermoelectric layer based on CuInSe<sub>2</sub>, and this value in the morning and in the evening is much smaller.



*Fig.* 5. The temperature gradients of CuInSe<sub>2</sub>-based solar cell at the lower (curve 1) and upper (curve 2) boundaries of the thermoelectric layer without the temperature stabilization in July at  $P_{\text{max}} = 8 \text{ kW/m}^2$  (a) and in January at  $P_{\text{max}} = 10 \text{ kW/m}^2$  (b) during the day

The current-voltage characteristics of the CuInSe<sub>2</sub>-based thin-film solar cell were obtained at average temperatures in July at  $P_{\text{max}} = 8 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 6a) and in January at  $P_{\text{max}} = 10 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 6b), when stabilization temperature (*T*) is the operating temperature (*T*<sub>op</sub>).



From the obtained characteristics plotted in Fig. 6c it follows that the cell under consideration at  $P_{\text{max}} = 1 \text{ kW/m}^2$  generates the maximum output power when its temperature is 70 °C, which is the operating temperature in this case (Fig. 3a). A significant increase in the short circuit current up to  $J_{SC} = 435 \text{ mA/cm}^2$  at  $P_{\text{max}} = 10 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 6b) compared to  $J_{SC} = (41-44) \text{ mA/cm}^2$  at  $P_{\text{max}} = 1 \text{ kW/m}^2$  (Fig. 6c) leads to a corresponding increase in the output electric power when using a concentrator.

#### CONCLUSION

The performed simulation demonstrates that the proposed thin-film solar cell, when using a concentrator, does not require temperature stabilization at solar power densities, the maximum values of which in July and January are 8 and 10 kW/m<sup>2</sup> respectively. Moreover, its maximum efficiency value is ~14.8 % and its operating temperature during the year varies from ~102 °C to ~106.6 °C. Such an operating temperature is maintained by whole energy, absorbed in this cell, viz. both the infrared radiation of the environment and the visible (sun) radiation, which is not used for photogeneration (which is lost during recombination). Consequently, by choosing a solar concentrator and operating temperatures at any time of the year, it is possible to maintain the optimal operating temperatures.

ture of the CuInSe<sub>2</sub>-based solar cell and to implement a mode with increased output power at a fixed area of this cell. Extreme points on the characteristics of the fill factor, efficiency and other characteristics are caused by the solar cell structure consisting of sequentially connected photo and thermal layers.

#### REFERENCES

- Voggu V. R., Sham J., Preffer S., Pate J., Fillip L., Harvey T. B., Brown R. M. Jr., Korgel B. A. (2017) Flexible CuInSe<sub>2</sub> Nanocrystal Solar Cells on Paper. ACS Energy Letters, 2 (3), 574–581. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00001.
- Green M. A., Hishikawa Y., Dunlop E. D., Levi D. H., Holf-Ebinger J., Yoshita M., Ho-Baillie A. W. Y. (2019) Solar Cell Efficiency Tables (version 53). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27, 3–12. https://doi.org/10.1002/pip.3102.
- Jackson P., Hariskos D., Wuerz R., Kiowski O., Bauer A., Friedlmeier Th. M., Powalla M. (2015) Properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells with New Record Efficiencies Up to 21.7 %. *Physica Status Solidi (RRL) Rapid Research Letters*, 9 (1), 28–31. https://doi.org/10.1002/pssr. 201409520.
- Jackson P., Wuerz R., Hariskos D., Lotter E., Witte W., Powalla M. (2016) Effects of Heavy Alkali Elements in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells with Efficiencies Up to 22.6 %. *Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 10 (8), 583–586. https://doi.org/10.1002/pssr.201670747.
- Mandati S., Sarada B., Dey S. R., Joshi S. V. (2018) Pulsed Electrochemical Deposition of CuInSe<sub>2</sub> and Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Semiconductor Thin-Films. *Semiconductors – Growth and Characterization*, 109–132. https://doi.org/10.5772/intechopen.71857.
- Heriche H., Rouabah Z., Bouarissa N. (2017) New Ultra Thin CIGS Structure Solar Cells Using SCAPS Simulation Program. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (15), 9524–9532. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.099.
- Singh P., Singh S. N., Lal M., Husain M. (2008) Temperature Dependence of I-V Characteristics and Performance Parameters of Silicon Solar Cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92 (12), 1611–1616. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.010.
- 8. Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L., Zalesski V. B., Leonova T. R. (2016) *Method for Fabrication Thin-Film Solar Cell*. Patent of the Republic of Belarus No 20481 (in Russian).
- 9. Analyze Thermal Effects with the Heat Transfer Module. *COMSOL, Inc. USA*. Available at: https://www.comsol.com/heat-transfer-module. (Accessed 10 May 2019).
- Esman A. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2018) Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe<sub>2</sub>. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 61 (5), 385–395. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395.
- Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A. (2018) Simulation of Solar Cell Characteristics Based on CuInSe<sub>2</sub>. *Priborostroenie-2018: Materialy 11<sup>-i</sup> Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.*, 14–16 Noyab. 2018, Minsk [Instrument Engineering-2018: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference, 14–16 Nov., 2018, Minsk]. Minsk, Belarusian National Technical University, 279–281 (in Russian).
- Verschraegen J., Burgelman M. (2007) Numerical Modeling of Intraband Tunneling for Heterojunction Solar Cells in SCAPS. *Thin Solid Films*, 515 (15), 6276–6279. https://doi.org/10. 1016/j.tsf.2006.12.049.
- Decock K., Khelifi S., Burgelman M. (2011) Modelling Multivalent Defects in Thin-Film Solar Cells. *Thin Solid Films*, 519 (21), 7481–7484. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.039.
- Esman A. K., Potachits V. A., Zykov G. L. (2016) Energy Efficiency of Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>. *Problemy Fiziki, Matematiki i Tekhniki = Problems of Physics, Mathematics and Technics*, 26 (1), 30–33 (in Russian).

Received: 11 September 2019 Accepted: 19 November 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29

UDC 338.1; 338.2

## Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value

## U. Ye. Pysmenna<sup>1,2)</sup>, G. S. Trypolska<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute for Economics and Forecasting, National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),

<sup>2)</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. The economies of the world are influenced by the rapidly changing global energy policy agenda. Understanding energy trends implications in the long-term perspective is crucial for responsible and informed sustainability-policy making, with respect to transformations required to enhance the security of energy supply, resource efficiency and affordability, as well to as transformations required to minimize energy poverty and mitigate ecological footprint. Nowadays the price (value) competitiveness of technologies and products as their ability to respond to sustainability demands is becoming the appreciable criterion in choosing the pathways of technological growth or economic strategies designing. The transition to energy sustainability is the so-called quiet energy [r]evolution, or the transition towards 100 % renewable energy supply. Using the sociotechnical transition, vulnerability and sustainable development theories for the assessment of the energy safety level, this article aims to contribute to the understanding of cultural, institutional and innovation prerequisites of sustainable energy transitions. Basing on historical examples, it argues that, despite the cultural dimensions, energy resources and energy mix disparity, geographic location and income per capita, the value instead of cost philosophy in choosing energy pathways maintains the sustainable energy transitions. The key findings are the defined prerequisites of energy transitions sustainability; among them there are cultural dimensions, innovations and the speeds of movement along learning curves when adopting new energy technologies as well as energy policy patterns, applied in a country: value versus cost-driven. The Value vs Cost Energy Policy matrix has been developed in order to determine if a country is sufficiently value-driven in its energy policy.

**Keywords:** energy system, energy transition, energy sustainability, value competitiveness, valuedriven policy, cost-based competitiveness, cost-driven policy

For citation: Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 14–29. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29

Адрес для переписки	Address for correspondence
Письменная Ульяна Евгеньевна	Pysmenna Uliana Ye.
Институт экономики и прогнозирования	Institute for Economics and Forecasting,
НАН Украины	National Academy of Sciences of Ukraine
ул. Панаса Мирного, 26,	26 Panasa Myrnoho str.,
01011, г. Киев, Украина,	01011, Kyiv, Ukraine
Тел.: +380 97 109-13-02,	Tel.: +380 97 109-13-02,
uliamyxa@gmail.com	uliamyxa@gmail.com

# Обеспечение устойчивого развития энергетических систем: переход от стоимости к ценности

У. Е. Письменная<sup>1, 2)</sup>, Г. С. Трипольская<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт экономики и прогнозирования НАН Украины (Киев, Украина),

<sup>2)</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Киев, Украина)

Реферат. Экономики мира находятся под влиянием быстроменяющейся повестки дня глобальной энергетической политики. Понимание последствий энергетических тенденций в долгосрочной перспективе имеет решающее значение для принятия ответственных и обоснованных решений по вопросам устойчивости в отношении преобразований, необходимых для повышения надежности энергоснабжения, эффективности использования ресурсов и их доступности, а также для нивелирования энергетической бедности и уменьшения негативного воздействия на окружающую среду. В настоящее время ценовая (стоимостная) конкурентоспособность технологий и продуктов в качестве их способности отвечать требованиям устойчивости становится весомым критерием при выборе путей технологического роста или разработки экономических стратегий. Переход к энергетической устойчивости это так называемая «тихая» энергетическая [p]еволюция или переход к 100%-му возобновляемому энергоснабжению. Используя теории социально-технических трансформаций, уязвимости при оценке уровня энергетической безопасности, а также теорию устойчивого развития, данная статья призвана содействовать пониманию культурных, институциональных и инновационных предпосылок перехода к устойчивой энергии. Основываясь на исторических примерах, мы утверждаем, что, несмотря на культурные аспекты, неравенство в энергетических ресурсах и структуре энергопотребления, географическом положении и размере дохода на душу населения, ценностная, а не стоимостная философия при выборе путей энергетической политики обеспечивает устойчивые энергетические трансформации. Ключевыми результатами является определение предпосылок устойчивости энергетических трансформаций, среди которых: культурные аспекты, инновации и скорость движения по кривым обучения при внедрении новых энергетических технологий, а также шаблоны энергетической политики, применяемые в стране, ценностные против стоимостных. Матрица энергетической политики «ценность против стоимости» разработана с целью определения степени ценностной ориентации энергетической политики той или иной страны.

Ключевые слова: энергетическая система; энергетическая трансформация; энергетическая устойчивость; ценностная конкурентоспособность; ценностно-ориентированная политика; конкурентоспособность, основанная на стоимости; политика, основанная на стоимости

Для цитирования: Письменная, У. Е. Обеспечение устойчивого развития энергетических систем: переход от стоимости к ценности / У. Е. Письменная, Г. С. Трипольская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 14–29. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29

### Introduction

Over the last two decades, the sustainable energy trend, being an important prerequisite of sustainable economy, has been embracing more and more countries and regions of the world. Wind and solar photovoltaic sources globally became the fastest growing sources of electricity. The energy access slowly expands. The growing energy needs in fast growing countries are accompanied by green investments enhancement in these countries. Ecologic and climate concerns are forcing a plenty of global players of energy markets to redesign their energy systems and energy balances by means of sustainable energy transformations. However, the sustainable energy trend faces challenges all over the world, but its density differs in a great way.

The primacy factor of energy transitions is often considered to be energy policy that, in turn, is considered as a compromise of interests of global players (countries, supranational formations or regional energy systems). Thus, the energy policy as the "direction of actions, accepted and restrained by governments" [1], can be entirely determined by geopolitics, i. e. by conformities of distribution and redistribution of spheres of the different states and interstate associations. The growing influence on energy politics of "transnational governance networks involving non-state actors" should also be considered. This influence would increase in the future and could take many forms [2].

IEA defined the following directions of world energy system development: a) meeting of growing world demand on energy after growing profits and population of developing countries; b) providing of access to energy for low-income part of the planet's population; c) reaching the aims of climate change mitigation, particularly the enhancement of renewables deployment [3]. However, with the strengthening of integration processes, the efficiency of energy systems as the ability to provide goods and services in environmentally sound way at reasonable price is more and more based not on the efficiency within the limits of the country economy, but on the compromise of interests of totality of energy systems and energy markets of some countries, non-state intergovernmental or supranational institutes.

The changes in world energy regional structure are accompanied by the increase of the clean energy ratio as well as the increase of number of countries, whose domestic supply ratio by an energy resource is less than 20 % and/or decreasing promptly. The influence of regional energy disproportions on large regions and developing countries creates the growing dependence on import of energy resources and enhance resource competition. The tendencies of providing the increase of demand and sustainable import of energy resources in the world, the instability of energy prices form the considerable challenge for the most world economies. As a result, the introduction of new resource bases and transit facilities changes a geographic structure and world energy markets rules, viz. the regions of production and consumption, strategic supply pathways of energy resources, demand and supply disparity, legal and organizational principles of markets functioning. Such increasing tension makes a challenge to the performance of energy transitions towards sustainable energy systems [4]. And there is a need to understand the prerequisites of sustainable energy transitions.

The aim of this paper is to consider energy transitions in terms of the values they serve, which is a more comprehensive way of viewing them than only a cost-benefit analysis.

### The main part

Acknowledging to sociotechnical transition theory [5] we can consider energy policies and strategies (action plans of their implementation) as energy transitions management. This includes: establishing prerequisites for their appearance; their speeding up/slowing down, protecting existing ones; minimizing negative externalities and social vulnerabilities of sociotechnical regimes changes; maintaining optimal energy mix. Under such consideration, the success or failure of policy implementation greatly depends on the differences in energy transitions performance (the first key factor). Cherp et al. [6] stated that the differences in performance of energy transitions (which are divided by three types, viz. techno-economic, socio-technical and political) in different countries could be explained by the performance of five mechanisms: a) states working with incumbents for secure supply/demand balance; b) regimes gaining/losing strengths from energy resources and infrastructure dynamics; c) regimes self-reproduction through vested political interests; d) states nurturing niches as a parallel strategy; e) cross-border technology diffusion and niche innovation.

Some researchers, e. g. Coenen, Benneworth & Truffer [7], make explicit transition geographies, stressing the importance of regional factor of transitions development. Thus, they also speak about the need of understanding the international, translocal nature of transition dynamics. Moreover, in the comparative analysis of energy transitions of key countries fulfilled by Hauff, Bode, Neumann & Haslauer [8] the "global energy transitions" vs "country pattern transitions" are discussed. They emphasize that despite the fact that the reasons, management, development pathways, threats and perspectives of transitions greatly differ from country to country, the main characteristics and processes being "amazingly similar" in many countries.

Along with the performance, the second key factor of energy transitions management is the vulnerability of energy systems under the influence of externalities, caused by energy transitions. Externalities are not necessarily negative, being the part of the economic transaction concerned and emerging outside the transaction. The vulnerability is "the exposure of vital energy systems to risks" [2]. Even sustainable transitions are often being postponed, slowed down or rejected to avoid negative externalities that could threaten the energy system stability. The special policy measures to avoid negative externalities of energy transitions are needed. For example, the 2016 increased shutdown of French nuclear power units, accompanied by the coal- and oil-fueled power plants closure has decreased base load capacity. In order to maintain the security of supply in the energy transition, the state has to launch its capacity market [9].

Basing on sociotechnical transition theory, an energy transition is claimed to be the energy-related sociotechnical regime shift. The question is how the sociotechnical regime shift could be measured. Obviously, energy systems can be estimated by the number of indexes: capacity, reserves, ecological impact, by the structure of "fuel mix" etc. [10]. The energy policy of a country on a number of energy resources or technologies can be defined by the dynamics of the set of indexes, such as: the structure of energy generation by technologies, volumes of investments, volumes of subsidies, income by the types of activity, rent volumes, barriers etc. However it complicates for the estimation or modeling of energy transitions.

The third key factor of the managing of energy transitions is how much the energy transition management leads to the change of energy sustainability level, or the sustainability of energy transitions. The sustainability transitions generally are described as the transitions that adapt societies and economies to sustainable modes of production and consumption [7, 11, 12] (Coenen & Diaz Lopez, 2009; Coenen, Benneworth & Truffer, 2012; Turnheim, Berkhout, Geels, Hof, McMeekin, Nykvist, & van Vuuren, 2015). Also given are the common examples of a sustainability transition: the decarbonization of energy and transport systems, biodiversity and food security transitions, waste or water management and urban development.

The question is could every transition towards the sustainable modes of energy production, transformation and consumption (aka energy balance) be marked as an energy sustainability transition. The energy sustainability Trilemma (energy security; energy affordability; ecological sustainability), annually published by World Energy Council (WEC), ranged countries by Energy Sustainability Index (ESI) [13]. If an energy transition performance maintains the rise along all three axes of Trilemma and the negative externalities are overcome by positive ones in a way that the overall score grows, that is an energy sustainability transition. Therefore, the transition to energy stability is a primary change in at least one parameter of the energy balance, which is sufficient to cause a shift in the sociotechnical regime, leading to the overall effect of the rise within the Trilemma of energy stability Trilemma.

WEC points out the similarities and the differences between first 10 ESI topranked countries. Among the similarities are: high GDP income per capita, OECD membership, postindustrial, service-based economies, more than 25 % share of low- and zero-carbon power generation technologies [13]. The differences are sufficient: energy mix, energy import dependence and reserves levels, nuclear power share, geographic location. Is the economic welfare of a country is necessary and enough to form the sustainable energy system? Or is the energy sustainability the "engine" of economic welfare and overall sustainability? By answering these questions, we aim to find out the prerequisites of energy sustainability.

**Cultural dimensions.** Maintaining the sustainability is known to be the balancing between social welfare, economic growth and ecological imprint. When speaking about the energy sustainability, we often mention sustainable energy consumption and sustainable energy life style or behavior that has cultural roots. Seeking for the cultural prerequisites for energy sustainability we compared ESI top, middle and low-ranked countries' cultural dimensions (Fig. 1a), using G. Hofstede cultural dimensions theory [14] and the energy sustainability dimensions [13].



Fig. 1. Selected Hofstede cultural dimensions (power distance; individualism; long term orientation): a – 10 ESI top-, 4 middle- and 4 low-ranked countries;
b – OPEC countries (based on 2018 ESI and 2018 Hofstede publications) [13, 14]

The comparative analysis points out that high ESI rank of a country is accompanied by the achievement of high level of individualism and at least one of two other dimensions: low power distance or high long-term orientation.

Why does high individualism have relation to the energy sustainability? As G. Hofstede stated, "in societies with collectivism, common aims and welfare are placed higher than personal ones" [14]. However, any of ESI top-ranked countries has not high collectivism cultural dimension. The individualism level above the middle helped them to form the societies with huge middle class and low corruption. In terms of an energy system, this gave the prerequisites for the development of highly effective energy systems with sufficient demand side management, Smart Grid and high ratio of individual and middle-capacity power units.

Low power distance is described as the following: "people strive to equalize the distribution of power and demand justification for inequalities of power" [14]. This helps to establish the effective institutional structure and operation of governmental and non-governmental institutions, which maintain the sustainable energy goals achievement. Among the ESI top-ranked countries only France has the power distance index higher than the mid-level (68 out of max 120 points).

High long-term orientation means achieving long-term goals and values results highly. Such time horizon view helps to meet the needs of a generation without harming the next generations' ability to meet their needs. This characteristic ensures the vision of energy technology perspectives with the consideration of the fossil fuels limited nature and the need of ecological sustainability. Despite that, from the general point of view, this cultural parameter seems to be primarily important for maintaining the sustainable energy; its high level does not in itself guarantee high energy sustainability. For example, China and Russia both have high level of long-term orientation (87 and 81 points respectively), but also have high power distance (80 and 93) and, the most important, their individualism is rather low (20 and 39). Other cultural characteristics (masculinity/femininity, uncertainty avoidance index; indulgence/restraint) seem not to have the significant influence on ESI ranking.

From multi-level perspective (MLP) point of view on transitions [5], high level of individualism prepares a ground for niche-innovations. Low level of power distance helps to generate effective institutions. This prevents the blocking and postponing of socio-technical landscape development by different political lobbies, and then such development pressures the existing sociotechnical regime and creates opportunity windows for novelties. Long-term perspective view via expectations and networks enhances the external influences on niches resulting in the socio-technical regime shift.

Fig. 1b shows that OPEC countries, with their Hofstede dimensions similar to low-ranked countries, are placed mostly in the middle of ESI rank, due to their high energy security level. Rich resource base and high GDP favor the possibilities to maintain the constituents of energy sustainability, but do not guarantee it. After Michael Porter, more important is not the current stock of factors of a nation, but the "rate end efficiency" or the intensity of their creation (or reimbursement), upgrade and deployment [15]. And nowadays in some ESI middle-ranked countries, e. g. in Saudi Arabia and Indonesia, such intensity is rising towards the sustainable goals. The increasing energy demand and low oil prices forced Saudi Arabia to declare plans to develop almost 10 GW of renewable energy by 2023 with up to USD 50 bln investments to substitute 80,000 barrels of oil in domestic consumption [16]. Indonesia, forced with demographic MLP growth, shows the progress being the first among 20 fast-moving countries in energy access enhancement with 4.3 % annual rate [17]. So, despite the cultural prerequisites and material resources disparity of different countries of the world, their energy policies could enhance Porter's "rate end efficiency of factors", that leads to more efficient, secure and ecologically sustainable energy systems.

**Innovations and movement along learning curves.** Energy transitions are not always innovation transitions. Do the energy sustainability transitions always deal with innovations or could we solve the Trilemma and considerably enhance energy security, energy affordability and ecological sustainability without novelties? Or such enhancement could be maintained only by extensive change of energy mix and deployed energy technologies parity? The analysis of the efficiency of energy policies proves that the considerable enhancement of Trilemma is not possible without the innovation transitions [18–21].

Renewable energy technologies are among the best examples of energy innovations. Renewables in general provide prospects of lower GHG emissions, jobs creation, technological improvements, but some negative externalities as well (such as structural unemployment, difficulties in maintaining of the loadgeneration balance, the increase of a power system electricity prices due to the feed-in tariffs and some other). Environmentally friendly technologies at their early stages of deployment have higher prices than conventional energy technologies, thus subsidies and other forms of support are needed to make environmentally friendly technologies viable. Numerous studies [22–24] indicate that that early technology adoption brings larger cost reduction in the long run. Over time technologies become more mature, producers and users gain experience, economy of scale takes place, and the level of direct and indirect support diminishes. Understanding of importance of new technologies, measured by the level of direct financial and indirect support by means of well-tailored regulatory energy policies, make countries not only cost-driven, but also value-driven.

Let us consider some aspects of technology adoption. Such a consideration makes us to apply to the learning curves. The concept of the learning curve, in its turn, is a measure of cost decline for every doubling of capacity or of energy output. The "learning curve" is a concept that describes the relationship between cost and experience over a defined period [24]. The learning curve is used to measure production efficiency and to forecast costs. The Learning Curve Model states that for each doubling of the total quantity of items produced/ installed, costs decrease by a fixed proportion, the corresponding change in price is a Progress ratio (Investopedia, 2019). In other words, learning curves show the degree of technological developments spread. Understanding learning effects is important to design sufficient support schemes [25], i. e. different learning rates may result in refining support rates based on technology type. This, in its turn, might affect the very structure of energy system of the country. For many renewable energy sources, the learning factor varies between 0.11 and 0.95 (for more mature technologies). A learning factor 0.9 means that costs will 10 % decline when cumulative installed capacity increases twofold [26]. The learning rate equals 100 minus a Progress ratio [27].

The largest number of learning rates studies so far has focused on photovoltaics and onshore wind power plants. In case of renewables, one should bear in mind that there is difference in industry producing equipment for renewables and renewable electricity/heat. The first one could be easily traded in open economics, while export/import of renewable electricity/heat is more difficult to trace. Learning effects can be easier traced in case of new technologies, than for existing technologies, because in order to reach the significant price reductions the latter need to increase installed capacities in order of terawatts. That is why the mean learning rate for coal technologies is 8.3 %, 15 % for natural gas turbines, negative to 6 % for nuclear power plants [28].

In accordance with IEA, learning effect lead to decreasing of wind turbines cost globally by a factor of 4 since 1980s, whereas since 2004 until 2007 they have increased by 20–80 % in different countries because of high commodity prices and insufficient turbines output. After 2007, the learning rate has acelerated, and most of the progress in wind turbines is attributed to increase in turbine size [29].

Modern renewable energy technologies show great possibilities for cost reduction, especially in case of photovoltaics, by improving the materials for modules output, transiting from crystalline silicon to dye sensitive solar cells and thin films. In 2015, International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) stated that global PV module capacity at the end of 2015 was 60 GW, and the PV learning rate was 21 % globally, which indicated high rate of technical learning. The average crystalline-silicon PV module price declined from USD 0.62/W in 2014 to USD 0.58/W in 2015, which corresponds to manufacturing capacities of 39.3 GW in 2014 and 50 GW in 2015 [9]. This learning factor for solar PV remained relatively stable within the last 30 years in the majority of countries where solar PV is employed, whereas for wind power plants it varied between 0.75 in the UK and 0.95 in Germany. Rubin et al. [30] defines the average learning rate of 23 % for the PV in 1959–2011.

The installed capacity of wind farms globally was 539.2 GW (Global Cumulative Installed Wind Power Capacity from 2001 to 2017) [31]. Growing demand for wind farms led not to the market expansion, but to supply constraints and slowing the market growth by 2014. Rapid market growth started in 2015, growing up to 10 GW annually worldwide [26]. The average learning rate for both onshore and offshore wind farms was 12 % [28].

For biomass-based electricity generation the learning rates was 11 %, in particular in case of fluidized bed combustion for combined heat and power and for biogas output it was also 11 %. For specific bioenergy crop (sugarcane, corn, and rapeseed) production the average learning rate was 32 %. For hydroelectric technology the learning rate was 1.4 % [28]. However, Rubin et al. [30] states that the developed countries such as USA have already used their sites for hydroelectric, thus this technology has a good potential of deployment in developing countries. For geothermal technology, there is no single learning rate, as this technology is largely dependent on-site characteristics (temperature, chemical content of geothermal fluid etc.)

Ocean energy is an important, highly potential and predictable source of energy without GNG emissions. There are several types of technologies allowing obtaining energy from waves, tides and currents. Now the cost of energy varies between 11–80 eurocents/(kW·h). The learning factor was projected to be 10–15 % for offshore wave and 5–10 % for tidal stream [26].

Energy storage nowadays exists in a form of large pumped hydropower and small industrial and commercial installations of battery storage. Large pumped hydropower had a capacity of 149 GW globally in 2014, whereas small installations had a cumulative capacity of 5 GW in 2014. In 2015–2016 and onwards, both significant technological improvements, installation of new capacities as well as regulatory policy developments took place. Since 2010, global learning rate for lithium-ion based technology in e-vehicles and electronics reached 22 %. Developed countries with liberalized energy markets are encouraging the emergence of new storage technologies as a means of decentralizing energy supply and developing additional service markets, such as capacity or frequency markets.

In order to make RES technologies viable, significant investments are needed. According to IEA, there are so called "learning investments", i. e. "additional costs for the technology compared with the cost of the same service from technologies which the market presently considers cost-efficient" [27]. Governmentfunded RD&D usually make the part of these learning investments, which directly affects the level of the countries innovation profiles. Environmentally friendly technologies such as RES obtain financial support even for initially expensive technologies which otherwise would not be deployed without considerations for climate change mitigation (by means of feed-in tariffs, carbon taxes, obligations and quotas etc.).

There are studies showing that technology development and diffusion are global, thus no national boundaries are needed to define learning effects [32, 33]. However, the rate of increase of learning factor varies even between neighboring countries, as well as the cost of technologies. Above mentioned learning factor for wind power plants varies between 0.75 in the UK and 0.95 in Germany [26]. The first wind power units in UK were deployed in 1951, but only in 2007 along with 20 % renewables EU policy they began to raise significantly. In Germany this technology was introduced much later, but with Energiewende it has developed amazingly from 55 MW in 1990 to 27 GW in 2010 and 50 GW in 2016. The cost of renewable energy technologies in France has been coming down over the past few years, but not as fast as in other EU countries due to, inter alia, the stable nuclear socio-technical regime [9].

The earlier an energy technology has been introduced in a country and the more intensively its capacity has been installed, the faster is the movement along learning curve. And it is the matter of an energy policy and value consciousness.

Value-driven vs cost-driven policies. In the XXI century, in the context of the competition between energy resources, energy technologies, between the producers of energy products within an energy technology and, at last, between energy policies, the impact of non-cost and non-price criteria becomes more and more determinative. It is rather a value competition. When a country's energy policy envisages more cost-intensive but also more widely applicable energy access strategy, based on domestic and renewable resources, which would enhance the energy security, this strategy is more value-driven. When someone chooses the most energy-efficient, low-emission and socially responsible aircooling technology instead of the cheapest one, this is also the case.

Value competition is a form of non-price competition that envisages a gaining not as the quantitative gaining (e. g. cost and income), but as the integrity of quantitative, qualitative and cost parameters of a technology or a product, which format its impact on the sustainability. The competition based on values differs from Michael Porter's competition based on innovations, because it is not always innovation-based but always sustainability-based. The Indonesian Kerosene to Liquid Propane Gas Conversion Program, Bolivian exploration of new natural gas resources and the natural gas to solid and biomass fueled boilers replacement in a number of gas-dependent countries are far not novelties introduction but all of them are energy sustainability improvements.

The competing technologies or products are compared not by their unique value, but by their sustainable value, i. e. their ability to impact on the sustainability.

Based on this, we can understand that value-oriented energy policies, value competitive energy technologies and energy products are those that can meet the requirements of sustainable development.

Let us look at how countries choose their energy transition paths depending on their geopolitical role. The belonging of a country to a group of countries with common geopolitical interests determines its energy policy and strategy. For considering of such belonging it is sufficient to use the matrix division of countries after primary methods of providing the collective energy security, that are concentrated on three basic groups of countries and regions after the dominant type of activity: producers (net exporters), consumers (net importers) and countries – transmitters of energy resources and on three basic groups of countries after geopolitical belonging (Tab. 1).

Table 1

Matrix of balance of interests and energy policy of world energy market participants

The group of countries	OECD countries	OPEC countries	Countries, which are not OECD and OPEC members	
Net exporters	Net portersDevelopment of standby hydrocarbon production capacities. Preservation of national sovereignty and control of the strategic resources. Consolidation on strategic export markets, providing of guarantees of sustainable demand on exported energy resources. Provision of investments in the development of resources production and infra- structure. 			
Transmitters	Selection of reservoirs (deposits) for storage of reserves of hydrocarbons with the special legal state and special mechanism of bringing in to exploitation. Provision of capital and financing of investments in a transit infrastructure. Provision of safety of transit infrastructure			
	_	_	Maximization of transit rent and cost of hydrocarbons storage services	

25

<b>F</b> 1	T 1	- 1
нпа	ian	
LIII	I UU.	- 1

TT1	OFOD			
The group	OECD	OPEC countries	Countries, which are not	
of countries	countries		OECD and OPEC members	
Net	Development of standby hydrocarbon production capacities.			
importers	Meeting the dema	and on imported energy, the guaran	tees of sufficient supply of	
	energy resources	in a prospect.		
	Provision of ener	gy infrastructure security, reliability	y and uninterruptness of energy	
	supplies.			
	Obtaining of proc	duction and supply control over ene	ergy resources from other	
	countries.			
	Diversification of	f energy products supply, diversific	ation of their transportation	
	routes and variety	y of their suppliers.		
	Diversification of	t fuel and energy balances due to th	e development of production	
	of domestic (first	of all renewable) energy resources		
	Flexibility of production, reduction of energy intensity due to the introduction			
	of new technologies to decrease the dependence on the import of energy resources,			
	the development of market mechanisms of energy efficiency stimulation.			
	in the development and functioning of infrastructure			
	Gradual liberalization and development of compatition on energy markets			
	and markets of constrained services			
	and markets of constrained services			
	Political stability Provision of people's basic needs in energy resources. forming of			
	of suppliers	active demand on the energy sector	r services	
	Stabilization of	Balancing of price politics	Provision with cheap energy	
	energy resources	in relation to energy resources	resources for attaining	
	prices at accep-	at acceptable level for support	maximum economy growth	
	table level for	of competitiveness of the		
	support of	economy		
	economy com-			
	petitiveness			
The source	e: [4].		1	

As it was mentioned above, rich resource base, favorable geographic location and high income favor the possibilities to maintain the energy sustainability, but do not guarantee it. Being in a one of the cells of the balance of interests matrix forms the energy policy pattern of a country, but with the value extent. The extent to which a country's energy policy depends on cost retains its position in the following matrix, the Cost and vs Value Matrix of energy policy (Tab. 2).

The value-driven energy policies maintain the equable movement towards multiple sustainable goals, with simultaneous measures to overcome negative externalities of transitions. Germany, facing the need to compensate backup capacities during a period of energy transition to more than 50 % share of decentralized power generators by 2033, decided to redesign the electricity market structure and maintain the financing of larger-scale generation capacity to keep the optimal level of system security. Also, Germany shared some reserve capacities between transmission system operators in order to reduce system reserve requirements. The clear visibility of the need of fast development of renewables

in France comes from their possible contribution to reduce the share of nuclear energy from 78 % to 50 % by 2025. But it also needs the substantial redesigning of power market and the investments into energy storage capacities.

Table 2

	Cost	Value
High ESI-ranked countries	Short-term economic profitability of energy transitions is a mandatory condition (e. g. France). Higher-cost energy imports is replaced by domestic carbon-intensive technologies (e. g. UK)	Equable movement towards multiple sustainable goals, with simultaneous measures to overcome negative externalities of transitions. Dynamic and flexible energy investment policies. Carbon prices and commitments are meaningful signals. Energy market is able to provide secure supply and demand to utilize high-priced but low-carbon and renewable energy resources and comparatively high-LCOE energy technologies. Fast moving along energy technologies learning curves. Regional and supranational interests on energy markets rather than domestic: solidarity principle
Middle ESI-ranked countries and OPEC	Stabilization of energy prices at acceptable level to support the economy. Energy subsidies slow down energy efficien- cy progress. Renewables are weakly penetrating TPES. High entry costs prevent new energy markets entrants. Energy markets liberalization and deregula- tion are slowed down or postponed because of instable energy prices externality concerns. Maximization of exported energy resources prices instead of market coupling and integra- tion (OPEC)	Understanding the need of strong support of renewables to reduce of the nuclear and fossil fuels share. Attaining the progress in the rate towards the achievement of sustainable energy goals and commitments, while the potential is still huge. The progress in moving along energy technologies learning curves differs between countries and depends on the transfer of technologies
Low ESI-ranked countries	Provision of cheap energy resources for attaining maximum economic growth. Maximization of exported energy resources prices instead of market coupling and integration. Cost savings vs energy efficiency. High costs of doing business for distributed generation, which influences energy access. No/small progress in moving along energy technologies learning curves because of late start and slow rates of deployment. Postponing the achievement of the declared sustainable energy goals and commitments	Domestic interests on energy markets rather than regional and supranational. Expanding the energy access in the demographic growth concerns
Th	e source: developed by the authors.	

Cost vs Value Energy Policy Matrix (energy policy patterns)

#### Main results and discussion

The value-driven energy policy should envisage dynamic and flexible investment policies for renewables, as well as for highly demand and frequency responsible conventional power plants, and storages (for example, support policies for renewables in China, Germany etc.) Energy storages development is highly investment-intensive and needs energy policies able to reduce investment risks. The special energy storages funding programs are bundled with decentralized and renewable power generation development programs (e. g. in Germany), tax credits for the battery, kinetic, compressed air and hydro pumped storages operators (e. g. in the USA).

Understanding the importance of early adoption of sustainable energy technologies encourages countries to support the ease of implementation and development of such technologies. The value-driven energy policy in many countries provided faster movement along learning curves and guaranteed the decrease of LCOE comparatively to common technologies in a short and medium term.

The innovation-based energy policies form the considerable transition from cost to value competitiveness, becoming the ground for domestic novelties. Some innovation growth programs are itself the action plans for achieving sustainable development in 3 dimensions: economical, ecological and social by means of: establishing knowledge resources (universities), complementing a biased industrial structure towards diversification, business-to-business and universities-to-business cooperation, etc. (good example is the Swedish innovation doctrine). The development of knowledge in industrial and commercial sectors (problem-oriented university research) is a so-called "third assignment" for universities after education and research. The demand on energy-related novelties mainly comes from the large energy utilities, but the demands placed by global competition are also increasing the need for small and medium-sized energy-related companies to cooperate with universities and research institutions.

#### CONCLUSIONS

1. To contribute to the understanding of cultural, institutional and innovation prerequisites of sustainable energy transitions we addressed to F. Geels' sociotechnical transition theory and considered energy policies as energy transitions management. It envisages: establishing prerequisites for their appearance; their speeding up/ slowing down, protecting existing ones; minimizing negative externalities and social vulnerabilities of sociotechnical regimes changes; maintaining optimal energy mix. We defined three key factors of the efficient energy policy as an energy transitions management: energy transitions performance, vulnerability of energy systems under their externalities and their influence on the energy sustainability.

2. Acknowledging to G. Hofstede cultural dimensions theory and data, we found that high Energy Sustainability Index rank of a country is accompanied by the achievement of high level of individualism and at least one of two other cultural dimensions: low power distance or high long-term orientation.

3. We defined value-driven energy policies as those which are able to respond to the sustainability demands. It also has been shown, that, despite the different cultural prerequisites and material resources disparity of different countries of the world, their value-driven energy policies could enhance Porter's "rate and efficiency of factors" and lead to more efficient, secure and ecologically sustainable energy systems. The extent of how much a country's energy policy is value-driven maintains a country's position in the Cost vs Value Energy Policy Matrix.

#### Abbreviations:

WEC – World Energy Council; ESI – Energy Sustainability Index; MLP – multilevel perspective; GHG – greenhouse gas; ITRPV – International Technology Roadmap for Photovoltaic; IEA – International Energy Agency; PV – photovoltaic; RD&D – research, development and demonstration; RES – renewable energy sources; COE – levelized cost of electricity.

#### REFERENCES

- 1. Kilievich O. (1999) *State Policy Analysis: Microeconomic View. Part 1. Modern Economic Theory and State Finances.* Kyiv, National Academy for Public Administrationunder the President of Ukraine (in Ukrainian).
- Cherp A., Jewell J. (2014) The Concept of Energy Security: Beyond the Four As. *Energy Poicy*, 75, 415–421. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005.
- IEA/OECD (2012) World Energy Outlook 2012: Executive Summary. Available at: https://ru. scribd.com/document/124814693/IEA-World-Energy-Outlook-2012. (Accessed 12 February 2019).
- Potapenko V., Podolets R., Mukhin V. (2013). Organizational and Economic Mechanisms of Balance of Interests in the Energy Sector of Ukraine. *Efektivna Ekonomika* [Efficient Economics], (11). Available at: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2451. (Accessed 30 December 2019) (in Ukrainian).
- Geels F., Schot J. (2007) Typology of Sociotechnical Transition Pathways. *Research Policy*, 36 (3), 399–417. https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003.
- Cherp A., Vinichenko V., Jewell J., Suzuki M., Antal M. (2017) Comparing Electricity Transitions: a Historical Analysis of Nuclear, Wind and Solar Power in Germany and Japan. *Energy Policy*, 101, 612–628. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.044.
- Coenen L., Benneworth P., Truffer B. (2012) Toward a Spatial Perspective on Sustainability Transitions. *Research Policy*, 41 (6), 968–979. https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.02.014.
- Hauff A., Bode D., Neumann F., Haslauer F. (2014) Global Energy Transitions. A Comparative Analysis of Key Countries and Implications for the International Energy Debate. Berlin, Weltenergierat – Deutschland, 30.
- 9. International Energy Agency (2016) Next Generation Wind and Solar Power. Full Report. Paris. https://doi.org/10.1787/9789264258969-en.
- Araujo K. (2014) The Emerging Field of Energy Transitions: Progress, Challenges, and Opportunities. *Energy Research & Social Science*, 1, 112–121. https://doi.org/10.1016/j.erss. 2014.03.002.
- Coenen L., Diaz Lopez F. J. (2009) Comparing Systems Approaches to Innovation and Technological Change for Sustainable and Competitive Economies: an Explorative Study into Conceptual Commonalities, Differences and Complementarities. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1149–1160. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.003.
- Turnheim B., Berkhout F., Geels F., Hof A., McMeekin A., Nykvist B., van Vuuren D. P. (2015) Evaluating Sustainability Transitions Pathways: Bridging Analytical Approaches to Address Governance Challenges. *Global Environmental Change*, 35, 239–253. https://doi.org/10. 1016/j.gloenvcha.2015.08.010.
- 13. World Energy Council (2018) *Energy Sustainability Trilemma Index 2018*. Available at: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Trilemma-Index-2018.pdf. (Accessed 30 December 2019).

- Hofstede Insights. Country Comparison. Available at: https://www.hofstede-insights.com/countrycomparison. (Accessed 10 February 2019).
- Porter M. (1990) The Competitive Advantage of Nations. *Harvard Business Review*, March-April, 73–91.
- 16. Dipaola A. (2017) OPEC's Top Producer is Turning to Wind and Solar Power. *Bloomberg*. Available at: https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-02-14/saudis-warm-to-solar-asopec-s-top-producer-aims-to-help-exports. (Accessed 30 December 2019).
- International Energy Agency (2015) Energy Policies Beyond IEA Countries: Indonesia 2015. Energy Policies Beyond IEA Countries. Paris, IEA, https://doi.org/10.1787/9789264065277-en.
- Dearing A. (2000) Sustainable Innovation: Drivers and Barriers. Available at: https://www.oecd. org/innovation/inno/2105727.pdf. (Accessed 30 December 2019).
- Mulder K. F. (2007) Innovation for Sustainable Development: from Environmental Design to Transition Management. *Sustainable Science*, 2 (2), 253–263. https://doi.org/10.1007/ s11625-007-0036-7.
- International Energy Agency (2000) Experience Curves for Energy Technology Policy. Paris, IEA. https://doi.org/10.1787/9789264182165-en.
- International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) (2017) Results 2016, Including Maturity Report. https://www.worldfutureenergysummit.com/\_\_\_media/libraries/products/A493 E2 AF-5056-B73B-0D765674956C42F6-pdf.pdf.
- 22. Mattsson N., Wene C. O. (1997) Assessing New Energy Technologies Using an Energy System Model with Endogenized Experience Curves. *International Journal of Energy Research*, 21 (4), 385–393. https://doi.org/10.1002/(sici)1099-114x(19970325)21:4<385::aid-er275>3.0.co;2-1.
- Goulder L., Mathai K. (2000) Optimal CO<sub>2</sub> Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39 (1), 1–38. https://doi.org/10.1006/jeem.1999.1089.
- Nordhaus W. D. (2009) The Perils of the Learning Model for Modeling Endogenous Technological Change. https://doi.org/10.3386/w14638.
- International Energy Agency (2016) Energy Technology Perspectives 2016. Towards Sustainable Urban Energy Systems: Executive Summary. https://doi.org/10.1787/energy\_tech-2016-en.
- Canton J., Johannesson Linden A. (2010) Support Schemes for Renewable Electricity in the EU. Economic Papers 408. Available at: https://ec.europa.eu/economy\_finance/publications/ economic\_paper/2010/pdf/ecp408\_en.pdf. (Accessed 3 January 2020).
- Kagan J. (2019) Learning Curve. *Investopedia*. Available at: http://www.investopedia.com/ terms/l/ learning-curve.asp#ixzz4WmWb9fM0. (Accessed 10 February 2019).
- Greenpeace International, Global Wind Energy Council Solar Powereurope (2015) Energy [R]evolution. A Sustainable World Energy Outlook 2015. 100 % Renewable Energy for all. Available at: https://www.duesseldorf.greenpeace.de/sites/www.duesseldorf.greenpeace.de/files/ greenpeace energy-revolution erneuerbare 2050 20150921.pdf. (Accessed 3 January 2020).
- 29. IEA/OECD (2008) *Renewable Energy Essentials: Wind*. Available at: https://www.iea.org/ reports/renewable-energy-essentials-wind. (Accessed 3 January 2020).
- Rubin E., Azevedo I., Jaramillo P., Yeh S. (2015) A Review of Learning Rates for Electricity Supply Technologies. *Energy Policy*, 86, 198–218. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.011.
- The Statistics Portal. Global Cumulative Installed Wind Power Capacity from 2001 to 2018 (in Megawatts). *Statista*. Available at: https://www.statista.com/statistics/268363/installedwind-power-capacity-worldwide/. (Accessed 10 February 2019).
- Junginger M., Faaij A., Turkenburg W. (2005) Global Experience Curves for Wind Farms. Energy Policy, 33 (2), 133–150. https://doi.org/10.1016/s0301-4215(03)00205-2.
- 33. Chazov E. L., Grakhov V. P., Krivorotov V. V., Simchenko O. L. (2019) Improving the Efficiency of Planning as a Basis for Management the Investment Activity of an Industrial Enterprise. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 62 (1), 88–100. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-88-100 (in Russian).

Received: 26 September 2019 Accepted: 28 November 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41

УКД 621.311.243

## Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое

## Т. Н. Нгуен<sup>1)</sup>, В. Д. Сизов<sup>2)</sup>, М. Ф. Ву<sup>1)</sup>, Т. Т. Х. Ку<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Научный институт энергетики, Вьетнамская академия наук и технологий (Ханой, Вьетнам),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Вьетнам – страна с огромным солнечным потенциалом, в которой могут быстро развиваться солнечные технологии. Инвесторы заинтересованы в строительстве солнечных электростанций на крышах, установка которых поможет владельцам снизить ежемесячные расходы на электроэнергию и даже получить экономическую выгоду, продавая избыточную электроэнергию, поступающую от них в электрическую сеть. В исследовании представлены результаты моделирования с использованием программы PVsyst солнечной электростанции мощностью 26 кВтп на крыше коммерческого здания в Ханое, что дает возможность оценить ее работоспособность в условиях солнечной радиации в северо-восточном регионе Вьетнама. Результаты позволили рассчитать потенциал солнечной энергии, количество вырабатываемой электроэнергии и эффективность солнечной электростанции, подключенной к сети. Солнечная энергия используется во Вьетнаме с 1990-х гг., но в основном в районах, удаленных от государственной электросети, таких как горные местности, острова. Также с 2010 г. солнечная энергия используется в отдельных жилых кварталах для удовлетворения потребности в электроэнергии мелких и средних потребителей. Общая мощность произведенной солнечными электростанциями электрической энергии во Вьетнаме к 2017 г. составила около 8 MBт, что очень незначительно. Это связано с отсутствием политики поддержки развития солнечной энергетики со стороны правительства. В соответствии с текущим графиком повышения цен на электроэнергию во Вьетнаме инвестиции в строительство на крышах зданий солнечных электростанций, подключенных к сети, могут быть экономически целесообразными, внося при этом положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата за счет сокращения выбросов СО2.

**Ключевые слова:** солнечные батареи, инвертор, соединение солнечной электростанции с электрической сетью, потери

Для цитирования: Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 30–41. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41

Адрес для переписки	Address for correspondence
Нгуен Тху Нга	Nguyen Thuy Nga
Научный институт энергетики,	Institute of Energy Science,
Вьетнамская академия наук и технологий	Vietnam Academy of Science and Technology
ул. Хоанг Куок Вьет, 18,	18 Hoang Quoc Viet str.,
г. Ханой, Вьетнам	Hanoi, Vietnam
Тел.: +84 903 22-44-48	Tel.: +84 903 22-44-48
nguyenthuynga@ies.vast.vn	nguyenthuynga@ies.vast.vn

## Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City

## T. N. Nguyen<sup>1)</sup>, V. D. Sizov<sup>2)</sup>, M. P. Vu<sup>1)</sup>, T. T. H. Cu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institute of Energy Science, Vietnam Academy of Science and Technology (Hanoi, Vietnam), <sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Vietnam is a country of a great solar potential; solar technology is growing rapidly in Vietnam and investors are very interested in building solar power plants. Construction of the rooftop solar power stations can help owners reduce monthly electricity costs and even get economic benefits by selling excess electricity coming from a solar power plant (PV) to the utility grid. In this study, the design results of a rooftop grid-tied solar power station with the capacity of 26 kWp for a commercial building were introduced to have a basis to assess the operation ability of solar power station under solar radiation conditions in Hanoi city, Vietnam. The simulation results using the PVsyst program have made it possible to calculate the solar energy potential in Hanoi city, the power generation and efficiency of the grid-tied solar power station. Solar power has been applied in Vietnam since the 1990s but is mainly used for areas that were far from national power grid such as mountainous areas, islands. Small scale grid-tied solar power has been developed since 2010 and mainly is used for residential applications or small and medium scale consumers. The total capacity of electricity produced by solar power plants in Vietnam by 2017 was only about 8 MW; this value is very low as compared to the potential of solar power in Vietnam. This is due to the absence of the government support for the policy of developing solar power. In accordance with the current roadmap of raising electricity prices in Vietnam, construction investment of rooftop solar power stations is economically feasible while contributing to environmental protection and counteracting climate change phenomenon by reducing the amount of  $CO_2$ emitted into the environment.

Keywords: solar panels, inverter, connection of solar power station to the grid, losses

For citation: Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. (2020) Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 30–41. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41 (in Russian)

### Введение

В настоящее время в мире быстро развивается технология использования солнечной энергии: в 2017 г. общее количество электроэнергии, произведенной солнечными энергетическими установками, подключенными к электрическим сетям, возросло до 99,1 ГВт [1, 2]. Китай, США, Япония и Германия – страны, вырабатывающие наибольшее количество электроэнергии на солнечных электростанциях (рис. 1).

Солнечная энергия используется во Вьетнаме с 1990-х гг., но в основном в районах, удаленных от государственной электросети, таких как горные местности, острова. Также с 2010 г. развивается использование солнечной энергии в отдельных жилых кварталах для удовлетворения потребности в электроэнергии мелких и средних потребителей. Общая мощность произведенной солнечными электростанциями электрической энергии во Вьетнаме к 2017 г. составила около 8 МВт [3], что очень незначительно. Это связано с отсутствием до недавнего времени политики поддержки развития солнечной энергетики со стороны правительства.



*Fig. 1.* The total power generated by solar power plants in the world [1]

В апреле 2017 г. правительство Вьетнама объявило о политике поддержки развития солнечной энергетики в целом и солнечных электростанций, устанавливаемых на крышах, в частности [4]. Избыточная электроэнергия, произведенная солнечной электростанцией, может быть продана национальной сети по цене 9,35 цента США за 1 кВт.ч. Поэтому инвесторы заинтересованы в создании солнечных электростанций на крышах домов во Вьетнаме.

Вьетнам – страна с большим потенциалом солнечной энергии [5–9], со средней солнечной радиацией от 4 до 5 кВт·ч/м<sup>2</sup> в день и средним количеством солнечного света от 1600 до 2700 ч в год. По оценкам экспертов, центральный и южный регионы Вьетнама имеют наибольший потенциал для реализации проектов солнечных электростанций, а северо-восточный регион обладает низким потенциалом солнечной радиации.

В статье анализируется техническая эффективность солнечной электростанции мощностью 26 кВтп, установленной на крыше коммерческого здания в г. Ханое, с целью оценки возможностей ее эксплуатации в условиях солнечной радиации в северо-восточном регионе Вьетнама. В ходе исследования была использована программа PVsyst (Photovoltaic system simulation program) для определения потенциала солнечной энергии в Ханое, возможностей выработки электроэнергии и эффективности солнечной электростанции, подключенной к электросети.

#### Технология работы солнечной электростанции на крыше здания

При благоприятных погодных условиях солнечные панели поглощают солнечную энергию и вырабатывают электрическую. Постоянный ток, получаемый от солнечных батарей, через инвертор преобразуется в переменный с необходимыми напряжением и частотой для подключения к промышленной электрической сети (через счетчик для учета мощности, отданной в сеть). Пользователи получают электроэнергию из сети через второй счетчик, установленный для учета ее домашнего использования. Каждый месяц местная электроэнергетическая компания сверяет показания

счетчиков, сравнивая количество использованной электроэнергии с количеством переданной в сеть. Если количество электроэнергии, переданной в сеть, превышает количество использованной, домовладелец получает оплату от электрокомпаний.

В то время как солнечные батареи вырабатывают электроэнергию, общая электрическая сеть страны играет роль накопителя электроэнергии и при необходимости возвращает ее потребителям. Два счетчика можно заменить на один комбинированный, имеющий двустороннее вращение диска, который измеряет разность количества отданной в сеть электроэнергии и использованной потребителем.

Основные компоненты подключенной к сети солнечной энергосистемы (рис. 2):

 панели солнечных батарей, в том числе модули панелей солнечных батарей. В зависимости от требований, предъявляемых к мощности, напряжению и силе тока, соединение панелей солнечных батарей может быть последовательным, параллельным или комбинированным. Каждый день, когда солнечная батарея получает энергию солнца, она генерирует постоянный ток в системе. Выходная мощность солнечных батарей прямо пропорциональна интенсивности солнечного излучения;

• выключатель постоянного тока (используется для отключения подачи постоянного тока от солнечных батарей при проверке и ремонте);

• высокоэффективный инвертор (преобразует постоянный ток в переменный стандартного синусоидального вида со стабильной частотой);

• выключатель переменного тока (используется для отключения от промышленной электрической сети солнечной батареи для ее проверки и ремонта);

• двусторонние счетчики (используются для измерения количества электроэнергии, передаваемой в сеть и получаемой из нее).



Шина переменного тока

*Рис. 2.* Принципиальная схема солнечной фотоэлектрической системы на крыше здания во Вьетнаме

*Fig. 2.* Schematic diagram of the solar PV system on the rooftop in Vietnam

Рассмотрим преимущества такой системы.

• Ежемесячное снижение оплаты за используемую электроэнергию – главное из них. Поскольку система не требует ежемесячных расходов и является малообслуживаемой, получение электроэнергии всегда стабильно и экономично. Солнечные энергетические системы большой мощности также могут приносить дополнительный доход домохозяйствам или компаниям от продажи электроэнергии местным энергетическим компаниям.

• Солнечные энергетические установки являются экологически чистым источником энергии. Использование солнечной энергии позволяет снизить зависимость от ископаемых источников энергии (нефть, уголь и др.).

 Во Вьетнаме правительство проводит политику поддержки и поощрения использования домашними хозяйствами и административными учреждениями систем преобразования солнечной энергии в электрическую, подключенных к государственной сети.

Способ подключения. Все солнечные панели соединяются последовательно для повышения напряжения в соответствии с диапазоном рабочих напряжений инвертора, подключенного к сети. После устойчивого соединения с солнечной панелью инвертор подключается к трехфазной электрической сети внутри здания.

Мониторинг системы. Солнечная электростанция, подключенная к сети с использованием инвертора, обладает способностью работать стабильно, точно, долго и имеет функцию беспроводного дистанционного мониторинга. Таким образом, все технические характеристики станции могут удаленно контролироваться портативными электронными устройствами, что позволяет клиентам точно, гибко и удобно управлять работой всей солнечной электростанции.

#### Проект солнечной электростанции, подключенной к сети

В данном исследовании проект солнечной электростанции мощностью 26 кВтп, установленной на крыше коммерческого здания в Ханое и подключенной к сети, проанализирован с помощью специализированного программного обеспечения PVsyst [10–12].

Ханой является регионом Вьетнама с относительно средним солнечным потенциалом при среднегодовой солнечной радиации около 3,85 кВт·ч/м<sup>2</sup> в сутки (рис. 3). В периоды с января по март и с октября по декабрь среднесуточные значения солнечной радиации самые низкие – от 2,49 до 3,66 кВт·ч/м<sup>2</sup>, а с апреля по сентябрь включительно достигают наивысших значений – от 3,79 до 4,67 кВт·ч/м<sup>2</sup> (табл. 1, рис. 4).

Таблица 1

Среднесуточная солнечная радиация по месяцам и за год в Ханое Daily total average solar radiation by month and per year in Hanoi

Показатель	Значение по месяцам												
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й	Среднее
													за год
Средне-													
суточная													
солнечная	2,49	2,86	3,66	4,07	4,59	4,67	4,6	4,56	4,39	3,79	3,39	3,02	3,85
радиация,													
кВт·ч/м <sup>2</sup>													



*Puc. 3.* Потенциал солнечной энергии во Вьетнаме [6] *Fig. 3.* The potential of solar energy in Vietnam [6]



*Puc. 4.* Распределение среднесуточной радиации по месяцам в г. Ханое *Fig. 4.* The distribution of average daily radiation by months in Hanoi

Коммерческое здание, на крыше которого установлена подключенная к сети солнечная электростанция, имеет географические координаты 21,3° с. ш. и 105,5° в. д. В здании используются различные виды электрического оборудования, такие как лифты, кондиционеры, холодильники, освеще-

ние и другое, поэтому ежемесячно потребляется большое количество электроэнергии. Поверхность крыши представляет собой потолочную систему большой площади, подходящую для установки солнечной электростанции (рис. 5).



*Puc. 5.* Коммерческое здание с установленной на нем солнечной электростанцией *Fig. 5.* A commercial building with solar power station on its rooftop

Для достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии, а также для обеспечения простоты обслуживания и эстетики здания солнечные панели устанавливаются на крыше на кронштейнах под углом 5° в направлении на юг (рис. 6).



*Puc.* 6. Схема расположения солнечных панелей на крыше *Fig.* 6. The layout of solar panels on the rooftop
Общая площадь крыши составляет около 255 м<sup>2</sup>, при этом она почти вся пригодна для размещения солнечной электростанции. На ней можно смонтировать четыре модуля, каждый из которых состоит из двадцати последовательно соединенных солнечных панелей из поликристаллического кремния мощностью 325 Втп. Таким образом, максимальная установленная мощность составляет 26 кВтп (80 солнечных панелей по 325 Втп). В данном случае выбрана система из четырех модулей солнечных элементов, подключенных к двум инверторам трехфазного тока мощностью 12 кВт, на каждый из которых приходится по два модуля.

Оборудование солнечной электростанции, подключенной к сети, представлено в табл. 2.

Таблица 2

Оборудование	Единица измерения	Количество	
Солнечная панель JA Solar 325 Втп	панель	80	
Инвертор Growatt 12 кВт	ШТ.	2	
Установочная арматура для панелей	комплект	1	
Электрический шкаф	ШТ.	1	
Вспомогательное оборудование (соединительные коробки, электрокабели, система заземления и др.)	комплект	1	

Оборудование солнечной электростанции, подключенной к сети Solar power station equipment connected to the grid

В целом из-за ограниченной площади крыши мощность солнечной установки сможет только частично удовлетворить потребность всего здания в электроэнергии.

Потери, рассчитанные программным обеспечением PVsyst, включают два типа: потери PV array loss и System loss [12].

#### Результаты исследований

Программное обеспечение PVsyst используется для расчета выходной мощности, производительности, а также полных потерь станции, подключенной к сети.

Из диаграммы, представленной на рис. 7, видно, что потери электроэнергии солнечных батарей, связанные с температурным режимом, максимальны и составляют около 10,1 %. Это обусловлено большой разницей сезонных температур окружающего воздуха в Ханое. При стандартной рабочей температуре солнечных панелей (25 °C) разница с сезонными температурами в этой местности довольно высока: летом температура воздуха может достигать 40 °C, а зимой понижаться до 8 °C.

Наименьшие потери, соответствующие значению 0,1 %, наблюдаются в электрических соединительных кабелях, поскольку их длина не превышает 5 м.



*Puc.* 7. Потери электроэнергии в системе солнечной электростанции, подключенной к сети *Fig.* 7. Electricity losses in the grid-connected solar power system

Потери снижают количество энергии, передаваемой в сеть, и эффективность работы электростанции, подключенной к сети. Как показано на рис. 8, потери мощности, связанные с солнечными панелями, составляют ~0,7 кВт·ч/кВтп в сутки, в то время как потери в системе – около 0,2 кВт·ч/кВтп.

Normalized productions (per installed kWp): Nominal power 26.00 kWp



При этом полезная выходная мощность инвертора – около 3,03 кВт·ч/кВтп в сутки. На рис. 9 показана производительность солнечной электростанции, КПД которой в среднем составляет ~77,1 %.



Fig. 9. Productivity of the investigated solar power station

Очевидно, что мощность, передаваемая в сеть солнечной электростанцией, соответствует количеству солнечной радиации (табл. 3). С мая по сентябрь вырабатывается наибольшее количество электроэнергии, в январе и феврале – наименьшее. Поскольку солнечные панели установлены под углом 5°, значение солнечного излучения GlobInc примерно на 2 % выше, чем у горизонтально расположенных солнечных панелей GlobHor. Общий среднегодовой объем электроэнергии, который солнечная электростанция передает в сеть, составляет 28713 кВт·ч/год.

Таблица 3

#### Количество электроэнергии, полученной от подключенной к сети солнечной электростанции

	GlobHor, kW·h/m <sup>2</sup>	T Amb, ℃	GlobInc, kW·h/m <sup>2</sup>	GlobEff, kW·h/m <sup>2</sup>	EArray, kW⋅h	E_Grid, kW⋅h	EffArrR, %	EffSysR, %
January	77.2	11.70	81.4	76.8	1851	1737	14.66	13.75
February	80.1	13.50	83.2	78.7	1855	1745	14.38	13.54
March	113.5	17.20	116.3	110.4	2530	2284	14.03	12.67
April	122.1	21.50	123.1	116.8	2637	2499	13.81	13.09
Мау	142.3	24.20	141.6	134.7	2953	2803	13.45	12.77
June	140.1	26.10	138.6	131.7	2892	2747	13.45	12.78
July	142.6	26.30	141.3	134.3	2922	2771	13.33	12.65
August	141.4	26.00	141.7	134.7	2949	2715	13.42	12.36
September	131.7	24.30	134.3	127.8	2792	2650	13.41	12.72
October	117.5	21.10	122.2	116.1	2600	2466	13.72	13.01
November	101.7	17.30	108.2	102.4	2377	2253	14.16	13.42
December	93.6	13.29	100.7	94.9	2259	2043	14.47	13.09
Year	1403.8	20.24	1432.5	1359.3	30614	28713	13.78	12.93

The amount of electricity received from a solar power plant connected to the grid

 Legends:
 GlobHor
 Horizontal global irradiation
 EArray

 T Amb
 Ambient Temperature
 E\_Orid

 GlobInc
 Global incident in coll. plane
 EffArrR

 GlobEff
 Effective Global, corr. for IAM and shadings
 EffSysR

Effective energy at the output of the array Energy injected into grid Effic. Eout array / rough area Effic. Eout system / rough area В соответствии с текущим графиком повышения цен на электроэнергию во Вьетнаме инвестиции в строительство на крышах зданий солнечных электростанций, подключенных к сети, могут быть экономически целесообразными, внося при этом положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата за счет сокращения выбросов CO<sub>2</sub>. Среднегодовое снижение выбросов CO<sub>2</sub> рассчитывается по формуле

$$t_{\rm CO2e} = E_{\rm Grid} \cdot EF_{\rm grid} = 28713 \cdot 0,66 / 1000 = 18,9 \, \text{т/год},$$

где E\_Grid – среднегодовое количество электроэнергии, вырабатываемой солнечной электростанцией, МВт·ч; EF<sub>grid</sub> – коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> при производстве электроэнергии, во Вьетнаме EF<sub>grid</sub> = 0,66 т CO<sub>2</sub>/(МВт·ч) [13].

#### выводы

1. Северо-восточный регион Вьетнама в целом и столица страны Ханой в частности оцениваются как районы, имеющие относительно средний потенциал солнечной радиации со среднегодовым значением около 3,85 кВт ч/м<sup>2</sup> в сутки. Периоды с января по март и с октября по декабрь имеют самые низкие среднесуточные значения солнечной радиации, в то время как с апреля по октябрь они наивысшие.

2. Выходная мощность, количество передаваемой в сеть электроэнергии и эффективность работы солнечных электростанций зависят также от различных типов потерь. Потери в солнечных батареях максимально составляют ~10,1 %, что обусловлено большой разницей сезонных температур в Ханое. Таким образом, эффективность солнечной электростанции достигнет ~77,1 %. Строительство солнечных электростанций поможет уменьшить количество выбрасываемого CO<sub>2</sub>, внесет положительный вклад в защиту окружающей среды и борьбу с изменением климата.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Global Market Outlook for Solar Power 2018–2022 [Electronic Resource] // Solar Power Europe. Mode of Access: https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2018-2022/.
- Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Саникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. https://doi.org/10.21122/ 1029-7448-2019-62-2-105-123.
- 3. Renewable Capacity Statistics 2018 [Electronic Resource] / International Renewable Energy Agency. Mode of access: https://nangs.org/analytics/irena-renewable-capacity-statistics-2018-eng-pdf.
- 4. Decision on the Support Mechanisms for the Development of Solar Power Projects in Vietnam: Prime Minister of Vietnam No: 11/2017/QD-TTg [Electronic Resource]. Mode of access: https://ru.scribd.com/document/408725603/Decision-11-2017-of-PM-on-Solar-PV-FIT-Eng.
- Nguyen, Khanh Q. Alternatives to Grid Extension for Rural Electrification: Decentralized Renewable Energy Technologies in Vietnam / Khanh Q. Nguyen // Energy Policy. 2007. Vol. 35, No 4. P. 2579–2589. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.004.
- Maps of Solar Resource and Potential in Vietnam, 2015 [Electronic Resource] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam. Mode of access: https://www.research gate.net/publication/288761369 Maps of Solar Resource and Potential in Vietnam.
- Khanh Toan, P. Energy Supply, Demand, and Policy in Viet Nam, with Future Projections / P. Khanh Toan, N. Minh Bao, N. Ha Dieu // Energy Policy. 2011. Vol. 39, No 11. P. 6814–6826. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.021/.

- Spatial Variability and Clustering of Global Solar Irradiation in Vietnam from Sunshine Duration Measurements / J. Polom [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1326–1334. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.014.
- Large-Scale Integration of Renewable Power Sources into the Vietnamese Power System / A. Kies [et al.] // Energy Procedia. 2017. Vol. 125. P. 207–213. https://doi.org/10.1016/j.egypro. 2017.08.188/.
- Soualmia, A. Modeling and Simulation of 15 MW Grid-Connected Photovoltaic System Using Pvsyst Software / A. Soualmia, R. Chenni // IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference. Marrakech, 2016. P. 702–705. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984069.
- Shiva, Kumar B. Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India / B. Kumar Shiva, K. Sudhakar // Energy Reports. 2015. Vol. 1. P. 184–192. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2015.10.001.
- 12. PVsyst Photovoltaic Software [Electronic Resource]. Mode of access: http://www.pvsyst. com/en/.
- Operational Manual for MRV on City-Level Climate Change Mitigation Actions / Japan International Cooperation Agency. 2017.

Поступила 11.09.2019 Подписана в печать 19.11.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

#### REFERENCES

- 1. Global Market Outlook for Solar Power 2018–2022. Solar Power Europe. Available at: https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2018-2022/.
- Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 62 (2), 105–123. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123 (in Russian).
- 3. International Renewable Energy Agency (2018) *Renewable Capacity Statistics 2018*. Available at: https://nangs.org/analytics/irena-renewable-capacity-statistics-2018-eng-pdf.
- 4. Decision on the Support Mechanisms for the Development of Solar Power Projects in Vietnam: Prime Minister of Vietnam No: 11/2017/QD-TTg. Available at: https://ru.scribd.com/document/ 408725603/Decision-11-2017-of-PM-on-Solar-PV-FIT-Eng.
- Nguyen Khanh Q. (2007) Alternatives to Grid Extension for Rural Electrification: Decentralized Renewable Energy Technologies in Vietnam. *Energy Policy*, 35 (4), 2579–2589. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.10.004.
- Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam (2015) Maps of Solar Resource and Potential in Vietnam. Available at: https://www.researchgate.net/publication/ 288761369\_Maps\_of\_Solar\_Resource\_and\_Potential\_in\_Vietnam.
- Khanh Toan P., Minh Bao N., Ha Dieu N. (2011) Energy Supply, Demand, and Policy in Viet Nam, with Future Projections. *Energy Policy*, 39 (11), 6814–6826. https://doi.org/10.1016/ j.enpol.2010.03.021.
- Polom J., Gastón M., Vindel J. M., Pagola I. (2015) Spatial Variability and Clustering of Global Solar Irradiation in Vietnam from Sunshine Duration Measurements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1326–1334. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.014.
- Kies A., Schyska B., Thanh D. V., Lueder von Bremen L., Heinemann D., Schramm S. (2017) Large-Scale Integration of Renewable Power Sources into the Vietnamese Power System. *Energy Procedia*, 125, 207–213. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.188.
- Soualmia A., Chenni R. (2016) Modeling and Simulation of 15 MW Grid-Connected Photovoltaic System Using Pvsyst Software. *IEEE International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Marrakech, 702–705. https://doi.org/10.1109/IRSEC.2016.7984069.
- Shiva Kumar B., Sudhakar K. (2015) Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India. *Energy Reports*, 1, 184–192. https://doi.org/10.1016/j. egyr. 2015.10.001.
- 12. PVsyst Photovoltaic Software. Available at: http://www.pvsyst.com/en/.
- 13. Japan International Cooperation Agency (2017) Operational Manual for MRV on City-Level Climate Change Mitigation Actions.

Received: 11 September 2019 Accepted: 19 November 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54

УДК 621.316.925

42

## Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты

#### Ф. А. Романюк<sup>1)</sup>, В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, Ю. В. Румянцев<sup>1)</sup>, Е. А. Дерюгина<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020

Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Цифровые фильтры, выполненные с использованием дискретного преобразования Фурье, применяются в большинстве микропроцессорных защит как отечественного, так и зарубежного производства. При отклонении частоты входного сигнала от значения, на которое настроены указанные фильтры, на их выходе формируется сигнал с амплитудой колебаний, пропорциональной отклонению частоты сигнала от заданной. В статье предложен алгоритм компенсации колебаний ортогональных составляющих выходных сигналов цифровых фильтров, реализованных на основе дискретного преобразования Фурье, при отклонении частоты входного сигнала от номинальной. В среде динамического моделирования MatLab-Simulink реализована математическая модель предлагаемого цифрового фильтра с алгоритмом компенсации колебаний его ортогональных составляющих, а также модели сигналов для воспроизведения входных воздействий. В модели цифрового фильтра предусмотрены два канала - канал тока и канал напряжения, что позволяет моделировать их работу применительно к защитам, использующим одну или две входные величины, например для токовой и дистанционной защиты. Проверка функционирования модели цифрового фильтра с компенсацией колебаний его выходного сигнала проводилась с применением двух видов тестовых воздействий – синусоидального сигнала с частотой 48-51 Гц (идеализированное воздействие), а также воздействий, приближенных к реальным вторичным сигналам измерительных трансформаторов тока и напряжения при коротких замыканиях, сопровождающихся понижением частоты. Проведенные вычислительные эксперименты при отклонении частоты от номинальной выявили наличие незатухающих колебаний на выходе стандартных цифровых фильтров Фурье и практически полное их отсутствие у предлагаемых цифровых фильтров, что позволяет рекомендовать к использованию в микропроцессорных защитах цифровые фильтры на основе дискретного преобразования Фурье, дополненные алгоритмом компенсации колебаний амплитуд выходных сигналов.

Ключевые слова: микропроцессорная защита, ортогональные составляющие, цифровые фильтры, тестовое воздействие, фазовый сдвиг, модель, трансформатор тока, дискретное преобразование Фурье, MatLab, Simulink

Для цитирования: Снижение влияния изменений частоты на формирование ортогональных составляющих входных сигналов релейной защиты / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 42–54. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54

Адрес для переписки	Address for correspondence
Романюк Федор Алексеевич	Romaniuk Fiodar A.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 331-00-51	Tel.: +375 17 331-00-51
faromanuk@bntu.by	faromanuk@bntu.by

## Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals

#### F. A. Romaniuk<sup>1)</sup>, V. Yu. Rumiantsev<sup>1)</sup>, Yu. V. Rumiantsev<sup>1)</sup>, A. A. Dziaruhina<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Digital filters made with the use of discrete Fourier Transform are applied in most microprocessor protections produced both in the home country and abroad. When the input signal frequency deviates from the value to which these filters are configured, a signal is generated at their output with oscillation amplitude that is proportional to the deviation of the signal frequency from the specified one. The article proposes an algorithm for compensating the oscillations of orthogonal components of the output signals of digital filters implemented on the basis of a discrete Fourier transform, when the input signal frequency deviates from the nominal one. A mathematical model of the proposed digital filter with an algorithm for compensating the oscillations of its orthogonal components, as well as a signal model for reproducing input effects, is implemented in the MatLab-Simulink dynamic modeling environment. The digital filter model is provided with two channels, viz. a current channel and a voltage channel, which makes it possible to simulate their operation in relation to protections that use one or two input values, for example, for current and remote protection. Verification of the functioning of the digital filter model with compensation for fluctuations in its output signal was carried out with the use of two types of test effects, viz. a sinusoidal signal with a frequency of 48-51 Hz (idealized effect), and the effects that are close to the real secondary signals of measuring current transformers and voltage transformers in case of short circuits accompanied by a decrease in frequency. The conducted computational experiments with deviation of frequency from the nominal one, revealed the presence of undamped oscillations at the output of standard digital Fourier filters and their almost complete absence in the proposed digital filters. This makes us possible to recommend digital filters based on a discrete Fourier transform supplemented by an algorithm for compensation of fluctuations in the amplitudes of the output signals for the use in microprocessor protection.

**Keywords:** microprocessor protection, orthogonal components, digital filters, test exposure, phase shift, model, current transformer, discrete Fourier transform, MatLab, Simulink

**For citation:** Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A. (2020) Reducing the Impact of the Frequency Change on the Formation of Orthogonal Components of the Relay Protection Input Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 42–54. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-42-54 (in Russian)

#### Введение

Для определения информационных параметров контролируемых величин в устройствах релейной защиты широко используются ортогональные составляющие (ОС) входных токов и напряжений. Формирование ОС указанных сигналов основывается главным образом на применении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и его модификаций [1]. Реализация ДПФ осуществляется путем параллельной фильтрации входного сигнала косинусным и синусным частотными фильтрами, в результате чего формируются два сигнала с одинаковыми амплитудами и фазовым сдвигом между ними, равным  $\pi/2$  для основной частоты. Для формирования ОС входных сигналов релейной защиты также находят применение алгоритмы, основанные на выделении одной из ОС с помощью соответствующего

цифрового фильтра и вычислении второй ОС по отсчетам мгновенных значений первой составляющей. Главный недостаток обозначенных выше подходов формирования ОС состоит в том, что коэффициенты используемых цифровых фильтров выбраны для основной частоты, а при ее изменении в формирование ОС вносится дополнительная погрешность, которая оказывает влияние на достоверность определения информационных параметров контролируемых величин. Непосредственное проявление указанной погрешности при отклонении частоты от основного значения - возникновение колебаний амплитуд ОС и фазовых сдвигов между ними. Это может потребовать введения ограничений при выборе коэффициента возврата измерительных органов, что в конечном итоге явится сдерживающим фактором в достижении высокой чувствительности устройств релейной защиты. Снижение влияния изменений частоты на выделение ОС входных сигналов может быть достигнуто за счет использования формирователей с соответствующей адаптивностью. В основу их построения предлагается положить ДПФ или его модификации, дополненные алгоритмом компенсации колебаний амплитуд с последующим уточнением отсчетов мгновенных значений ОС. Данная задача в микропроцессорных защитах решается относительно несложно на программном уровне.

#### Основная часть

44

В большинстве микропроцессорных защит используются цифровые фильтры (ЦФ) на основе ДПФ в силу простоты их реализации и устойчивости функционирования [2].

При возникновении короткого замыкания (КЗ) сигнал, контролируемый микропроцессорной защитой, характеризуется наличием одновременно одной или нескольких особенностей: содержит апериодическую составляющую, имеет частоту, отличную от номинальной, а также искаженную форму вследствие насыщения измерительных трансформаторов, что приводит к погрешностям функционирования ЦФ [3]. В частности, при отклонении частоты входного сигнала от номинальной на выходе ЦФ формируется сигнал в виде незатухающего колебательного процесса. Это объясняется тем, что частота дискретизации аналогового сигнала выбирается исходя из условия получения целого числа выборок на период основной частоты, а при ее отклонении данное условие нарушается. Для устранения этого недостатка используются специализированные алгоритмы, которые обеспечивают функционирование ЦФ в условиях отклонения частоты от номинальной [4]. Реализация подобных алгоритмов усложняется тем, что необходимо дополнительно контролировать частоту сигнала для коррекции количества выборок. Уменьшить амплитуду колебательного процесса на выходе ЦФ также позволяет использование усредняющих ЦФ, что, однако, вносит дополнительную задержку в установление выходного сигнала.

Предлагаемый в статье алгоритм компенсации колебаний на выходе ЦФ при отклонении частоты входного сигнала от номинальной в значи-

тельной степени свободен от перечисленных недостатков. Для его реализации необходимо выполнить такую последовательность действий.

1. С использованием ДПФ выделяются синусная  $u_{sn0}$  и косинусная  $u_{cn0}$  OC:

$$u_{sn0} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \sin \frac{2\pi n}{N};$$

$$u_{cn0} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \cos \frac{2\pi n}{N},$$
(1)

где *u<sub>n</sub>* – входной сигнал; *N* – число выборок на период основной частоты.

Амплитуда сигнала основной гармоники для произвольной выборки *п* 

$$U_{mn0} = \sqrt{u_{sn0}^2 + u_{cn0}^2}.$$

При отклонении частоты сигнала  $u_n$  от номинальной наблюдаются незатухающие колебания амплитуды  $U_{mn0}$ , которые устраняются на следующих шагах предлагаемого алгоритма.

2. Определяются амплитуды синусного  $U_{msn0}$  и косинусного  $U_{mcn0}$  сигналов по текущим  $u_{sn0}$ ,  $u_{cn0}$  и предыдущим  $u_{s(n-1)0}$ ,  $u_{c(n-1)0}$  выборкам, зафиксированным через период дискретизации T [5]:

$$U_{msn0} = \frac{\sqrt{u_{sn0}^2 - 2u_{sn0}u_{s(n-1)0}\cos\frac{2\pi}{N} + u_{s(n-1)0}^2}}{\sin\frac{2\pi}{N}};$$

$$U_{mcn0} = \frac{\sqrt{u_{cn0}^2 - 2u_{cn0}u_{c(n-1)0}\cos\frac{2\pi}{N} + u_{c(n-1)0}^2}}{\sin\frac{2\pi}{N}},$$
(2)

где  $T = \frac{1}{f_0 N}$  – период дискретизации;  $f_0 = 50$  Гц.

К достоинствам использования выражений (2) следует отнести минимальную задержку в один период дискретизации T при определении амплитуды сигнала, что особенно важно для построения быстродействующих измерительных органов микропроцессорных защит [6], а также принципиальную невозможность обращения знаменателя в нуль.

Далее вычисляется среднее значение амплитуд сигналов

$$U_{mn0} = \frac{U_{msn0} + U_{mcn0}}{2}.$$
 (3)

С использованием модели, рассмотренной ниже, получены результаты (рис. 1) по выражениям (2) и (3) для входного синусоидального сигнала с частотой 48 Гц.





Fig. 1. Amplitudes of sine and cosine orthogonal components magnitudes and their mean value:
 1 – input sinusoidal signal; 2, 3 – sine and cosine orthogonal components;
 4 – digital filter output signal mean value

Приведенные на рис. 1 зависимости показывают, что амплитуды синусного и косинусного сигналов (кривые 2 и 3), рассчитанные по (2), носят колебательный характер, причем колебания указанных сигналов находятся в противофазе. Среднее значение, полученное по (3), компенсирует колебания, и выходной сигнал ЦФ (прямая 4) остается неизменным при отклонении частоты от 50 Гц.

Для защит, в которых контролируется один параметр (например, токовые защиты), дальнейшие шаги алгоритма компенсации излишние, в противном случае выполняются последующие действия.

3. Определяется первое уточненное значение косинусной ОС

$$u_{cn1} = u_{cn0} \frac{U_{mn0}}{U_{mcn0}}.$$
 (4)

4. Определяется первое уточненное значение синусной ОС

$$u_{sn1} = \frac{u_{sn0}}{|u_{sn0}|} \sqrt{|U_{mn0}^2 - u_{cn1}^2|}.$$
 (5)

5. Определяется второе уточненное значение синусной ОС

$$u_{sn2} = u_{sn0} \frac{U_{mn0}}{U_{msn0}}.$$
 (6)

6. Определяется второе уточненное значение косинусной ОС

$$u_{cn2} = \frac{u_{cn0}}{|u_{cn0}|} \sqrt{|U_{mn0}^2 - u_{sn1}^2|}.$$
(7)

7. Определяются средние уточненные значения ОС:

$$u_{cn} = \frac{u_{cn1} + u_{cn2}}{2};$$
(8)

$$u_{sn} = \frac{u_{sn1} + u_{sn2}}{2}.$$

8. Определяются амплитуда и текущая фаза уточненного сигнала:

$$U_{mn} = \sqrt{u_{sn}^2 + u_{cn}^2};$$
 (9)

$$\varphi_n = \frac{u_{sn}}{|u_{sn}|} \arccos \frac{u_{cn}}{U_{mn}}.$$
 (10)

#### Модель цифрового фильтра

Оценка эффективности предлагаемого алгоритма компенсации колебаний амплитуды выходного сигнала при гармоническом входном воздействии проводилась с использованием модели ЦФ [7], реализованной в среде динамического моделирования MatLab-Simulink (рис. 2).



*Puc. 2.* Структура модели испытаний предлагаемого цифрового фильтра *Fig. 2.* Test model structure of the proposed digital filter

Рассмотрим блоки, которые входят в состав модели.

ЦФ на основе ДПФ (блок «ДПФ») представляется двумя стандартными блоками моделей *Digital Filter*, параметрами которых являются предварительно рассчитанные коэффициенты для косинусной и синусной ОС согласно (1) [8]. На выходе блока формируется амплитудное значение сигнала  $U_{mn0}$ , а также его ортогональные составляющие  $u_{sn0}$  и  $u_{cn0}$ .

Алгоритм компенсации. В одноименном составном блоке с использованием стандартных математических блоков Simulink реализован алгоритм в соответствии с выражениями (2)–(10). На выходе блока формируются уточненные значения амплитуды и ОС контролируемого сигнала.

Блок «Измерение разности фаз» используется для контроля фазовых сдвигов между ОС сигналов. Он строится на основе двух стандартных блоков *Discrete Furier*, каждый из которых измеряет фазу подведенного сигнала, а затем определяется их разность.

Для формирования синусоидального сигнала с заданными частотой, амплитудой, фазой и смещением используется источник *Sine Wave*, а для контроля результатов моделирования – осциллограф *Scope*.

#### Моделирование работы цифрового фильтра

Проверку работоспособности модели ЦФ целесообразно проводить с использованием двух видов тестовых воздействий – синусоидального сигнала с частотой 48–51 Гц (идеализированное воздействие), а также сигнала, приближенного к реальным вторичным токам измерительных трансформаторов тока (TT) и напряжениям трансформаторов напряжения (TH) при K3, сопровождающемся понижением частоты.

Гармоническое воздействие. Исследования проводились при синусоидальном входном воздействии с единичной амплитудой сигнала и частотой 48 Гц. Результаты функционирования двух ЦФ – стандартного на основе ДПФ (в дальнейшем – ДПФ) и предлагаемого на основе ДПФ с компенсацией колебаний амплитуды выходного сигнала (в дальнейшем – ДПФ с компенсацией) – приведены на рис. 3. ЦФ ДПФ (кривая 1) в установившемся режиме формирует на своем выходе незатухающий колебательный сигнал (рис. 3а), а у ЦФ ДПФ с компенсацией (кривая 2) колебания выходного сигнала полностью отсутствуют. В то же время фазовый сдвиг между ОС у обоих ЦФ практически одинаков и изменяется с небольшими колебаниями относительно уровня 90° (рис. 3b).



Рис. 3. Колебания выходных сигналов цифрового фильтра (а) и угла сдвига фаз между ортогональными составляющими (b) при частоте входного сигнала 48 Гц: 1 – дискретное преобразование Фурье; 2 – то же с компенсацией

Fig. 3. Oscillation of the digital filter output signal (a) and of the phase angle between orthogonal components (b) at the input signal frequency of 48 Hz: 1 – DFT-based digital filter;
 2 – DFT-based digital filter with compensation

Зависимости размаха отклонений амплитуды выходного сигнала, ограниченные пунктирными линиями 2, 3, от среднего значения (кривая 1) при уходе частоты от номинальной приведены на рис. 4. Как видно из представленных зависимостей, у ЦФ ДПФ наблюдаются колебания амплитуды выходного сигнала, размах которых пропорционален отклонению частоты от номинальной. Для ЦФ ДПФ с компенсацией характерно практически полное отсутствие колебаний амплитуды выходного сигнала при изменении частоты в диапазоне 48–51 Гц.







Средние отклонения фазовых сдвигов между ОС от уровня 90° при изменении частоты входного сигнала в пределах 48–51 Гц для обоих ЦФ одинаковы и не превышают одного градуса (рис. 5).





of the phase angle between orthogonal components at an input signal frequency deviation from the nominal value

Сложное входное воздействие. Для получения сложного входного воздействия модель ЦФ, приведенная на рис. 2, была дополнена блоками моделей энергосистемы, нагрузки, ТТ, ТН и блоком КЗ (рис. 6), реализованных в Simulink-SimPowerSystems (SPS) [9, 10]. В модели используются два канала – канал тока и канал напряжения, что позволяет исследовать работоспособность алгоритма ЦФ ДПФ с компенсацией колебаний выходного сигнала для защит, использующих два входных сигнала, например для органа сопротивления. Входными воздействиями для данных каналов являются разность фазных токов  $I_a - I_b$  и междуфазное напряжение  $U_{ab}$ .



*Рис. 6.* Структура модели испытаний предлагаемого органа сопротивления *Fig. 6.* Test model structure of the proposed impedance measuring element

Энергосистема представляется блоком модели трехфазного источника напряжения 3-Phase Source из библиотеки SPS с постоянной времени затухания апериодической составляющей токов K3  $T_s = (10-20)$  с, которая оказывает определяющее влияние на форму вторичного тока TT.

**Трехфазная группа TT** с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом» (блок TT). Используется модель, все геометрические параметры которой рассчитываются по паспортным данным TT [11, 12].

**Трансформатор напряжения** (блок TH). Используется идеализированная модель, реализуемая стандартным блоком *Gain*, параметром которой является коэффициент трансформации измерительного TH.

Нагрузка (блок Нагрузка) представляется блоком модели 3-Phase Series RLC Load из библиотеки SPS.

**Короткое замыкание** (блок КЗ) представляется блоком модели *3-Phase Fault* из библиотеки SPS.

**Орган сопротивления.** Реализуется для обоих ЦФ – ДПФ и ДПФ с компенсацией. В составных блоках с использованием стандартных математических блоков Simulink рассчитываются полное сопротивление  $Z_n$ , а также его активная  $R_n$  и реактивная  $X_n$  составляющие и угол между ними  $\varphi_n$ :

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}; \tag{11}$$

$$R_n = \frac{v_{cn}i_{cn} + v_{sn}i_{sn}}{i_{cn}^2 + i_{sn}^2};$$
(12)

$$X_{n} = \frac{v_{sn}i_{cn} - v_{cn}i_{sn}}{i_{cn}^{2} + i_{sn}^{2}};$$
(13)

$$\rho_n = \operatorname{arctg} \frac{X_n}{R_n},\tag{14}$$

где *i*<sub>sn</sub>, *i*<sub>cn</sub> – ОС канала тока; *v*<sub>sn</sub>, *v*<sub>cn</sub> – ОС канала напряжения.

Результаты расчетов выходных сигналов рассматриваемых ЦФ, полученные с использованием только канала тока, при постоянной времени затухания апериодической составляющей в энергосистеме  $T_s = 10$  с, приведены на рис. 7. В момент времени t = 0,03 с происходит трехфазное КЗ (рис. 7а), при котором форма тока  $I = I_a - I_b$  существенно отличается от синусоидальной, а частота в энергосистеме снижается до 48 Гц. Время существования КЗ намеренно выбрано завышенным, чтобы продемонстрировать, как ЦФ реагируют на указанное воздействие. После затухания апериодической составляющей, начиная с момента времени t = 0.25 с и до отключения КЗ при t = 0,30 с, ток I становится по форме близким к синусоидальному и выходной сигнал ЦФ ДПФ с компенсацией устанавливается на неизменном уровне (кривая 2) в отличие от ЦФ ДПФ, выходной сигнал которого продолжает носить колебательный характер (кривая 1). Фазовые сдвиги между ОС в рассматриваемых ЦФ так же, как и при гармоническом воздействии, оказываются практически совпадающими как по величине, так и по форме (рис. 7b).





Для проверки функционирования органа сопротивления использовались канал тока и канал напряжения модели, представленной на рис. 6. Результаты моделирования указанного органа на основе предлагаемого ЦФ ДПФ с компенсацией сравнивались с аналогичными результатами при ЦФ ДПФ (рис. 8). В случае возникновения трехфазного K3 (t = 0.02 с), сопровождающегося снижением частоты сети до 49 Гц, сопротивления, замеряемые органами сопротивления с обоими ЦФ, уменьшаются от номинального значения Z = 3,1 Ом до сопротивления при КЗ  $Z_{K3} = 0,2$  Ом (рис. 8а). Незначительные отличия сопротивлений, определяемых ЦФ в переходных режимах, объясняются, в первую очередь, различной реакцией указанных фильтров на несинусоидальный характер вторичного тока ТТ. Кроме того, использование двух одинаковых каналов в значительной степени взаимно компенсирует колебания контролируемого сопротивления. Снижение частоты существенно сказывается на величине вычисляемого сопротивления после отключения КЗ, а также на фазовом сдвиге между активной и реактивной составляющими полного сопротивления (рис. 8b). На выходе блока «Орган сопротивления», реализованного на основе ДПФ, присутствуют колебания сопротивления, а в случае применения ЦФ ДПФ с компенсацией сопротивление устанавливается и поддерживается на неизменном уровне.



*Рис. 8.* Значения полного сопротивления на выходах цифровых фильтров (а) и фазовые сдвиги между активной и реактивной составляющими полного сопротивления (b): 1 – дискретное преобразование Фурье; 2 – то же с компенсацией

*Fig. 8.* Calculated impedance value at the outputs of the digital philters (a) and phase shifts between active and inductive components of the impedance (b): 1 - DFT-based digital filter; 2 - DFT-based digital filter with compensation

#### выводы

1. Предложен цифровой фильтр, основанный на дискретном преобразовании Фурье, формирующий ортогональные составляющие входных сигналов релейной защиты, дополненный алгоритмом компенсации колебаний их амплитуд при отклонении частоты сигнала от номинальной.

2. В результате проведенных вычислительных экспериментов установлено, что предложенный цифровой фильтр с алгоритмом компенсации колебаний, в отличие от стандартного цифрового фильтра Фурье, устраняет колебания контролируемых величин при использовании в измерительных органах защит как с одним, так и с двумя входными сигналами.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 594 с.
- Ramamurthy, M. Application of Digital Computers to Power System Protection / M. Ramamurthy // Journal of Inst. Eng. (India). 1972. Vol. 52, is. 10. P. 235–238.
- Johns, A. T. Digital Protection for Power Systems / A. T. Johns, S. K. Salman // IET. 1995. P. 216.
- Kasztenny, B. Two New Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying / B. Kasztenny, E. Rosolowski // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13, is. 4. P. 1053–1059.
- 5. 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. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
- 6. Increase of Operation Speed of Digital Measuring Elements of Microprocessor Protection of Electrical Installations / F. Romaniuk [et al.] // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations: 11<sup>th</sup> International Conference, Zakopane, Poland, June 25–28 / Lublin University of Technology. Zakopane, 2019. P. 56.
- 7. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412.
- 8. Comparative Assessment of Digital Filters for Microprocessor-Based Relay Protection / F. Romaniuk [et al.] // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). 2016. Vol. 92, No 7. P. 128–131.
- 9. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011.
- 10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPower-Systems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
- 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.
- Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink / F. Romanyuk [et al.] // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). 2015. Vol. 1, No 11. P. 294–297.

Поступила 22.10.2019 Подписана в печать 24.12.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

#### REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 594 (in Russian).

- 2. Ramamurthy M. (1972) Application of Digital Computers to Power System Protection. *Journal of Institution of Engineers (India)*, 52 (10), 235–238.
- Johns A. T., Salman S. K. (1995) Digital Protection for Power Systems. IET. 216. https://doi. org/10.1049/pbp0015e.
- Kasztenny B., Rosolowski E. (1998) Two New Measuring Algorithms for Generator and Transformer Relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13 (4), 1053–1059. https://doi.org/ 10.1109/61.714447.
- Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh* Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 59 (5), 397–417 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417.
- 6. Romaniuk F., Rumiantsev V., Dziaruhina A., Kachenya V. (2019) Increase of Operation Speed of Digital Measuring Elements of Microprocessor Protection of Electrical Installations. *New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations: 11<sup>th</sup> International Conference, Zakopane, Poland, June 25–28.* Zakopane, 56.
- Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 62 (5), 403–412 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412.
- Romaniuk F., Rumiantsev V., Rumiantsev Y., Boiko O. (2016) Comparative Assessment of Digital Filters for Microprocessor-Based Relay Protection. *Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review)*, 1 (7), 130–133. https://doi.org/10.15199/48.2016.07.28.
- SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011. Available at: http://www.math works.com/help/releases/R2011a/pdf\_doc/physmod/powersys/powersys.pdf. (Accessed 1 December 2015).
- 10. Chernykh I. V. (2011) Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink. Moscow, DMK Press; St.-Perersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
- 11. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh* Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, (5), 23–38 (in Russian).
- Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P. (2015) Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MatLab-Simulink. *Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review)*, 1 (11), 294–297. https://doi.org/10.15199/48.2015.11.67.

Received: 22 October 2019 Accepted: 24 December 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65

УДК 621.315.176

## Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разными натяжными гирляндами изоляторов

#### Ю. В. Бладыко<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В проектной практике встречаются решения, когда в одном пролете используются различные натяжные гирлянды изоляторов. В работе приведен расчет стрел провеса и коэффициентов нагрузки для пролета с двумя разными натяжными гирляндами изоляторов при одинаковой высоте подвеса. Система «первая натяжная гирлянда изоляторов - токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов» описана уравнениями параболы. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса и коэффициентами, учитывающими наличие натяжных гирлянд изоляторов. Полученная компактная формула коэффициента увеличения стрелы провеса подходит в общем случае для любого сочетания гирлянд в пролете. Показано совпадение расчета для конкретных случаев, известных из литературных источников. Выведена формула расчета коэффициента нагрузки для уравнения состояния, учитывающая наличие разных гирлянд в пролете. Достоверность формулы доказана совпадением результатов для частных случаев расположения гирлянд. Полученные выражения могут применяться как для вертикальных (весовых и гололедных) нагрузок, так и для горизонтальных (ветровых). В случае действия нагрузок в двух плоскостях уравнение состояния должно учитывать все составляющие при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости. Выполнены расчеты для разных длин пролетов распределительных устройств с разными проводами и гирляндами изоляторов. Рассмотрен пролет с одной и двумя натяжными гирляндами изоляторов, с одинаковыми высотами подвеса, при отсутствии ветра и гололеда. Построены кривые провисания провода для разных гирлянд. Показано, что при расчете стрел провеса и тяжений нельзя пренебрегать различием гирлянд.

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

Для цитирования: Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов пролетов с разными натяжными гирляндами изоляторов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 55–65. https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2020-63-1-55-65

## Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tensioning Insulator Strings

#### Y. V. Bladyko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** In design activities, technical solutions are practiced, which provide for the use of different tension strings of insulators in a single span. The present paper considers the calculation of the sag and load factors for a span with two different tensioning insulator strings that are

Адрес для переписки	Address for correspondence
Бладыко Юрий Витальевич	Bladyko Yuri V.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел. +375 17 292-71-93	Тел. +375 17 292-71-93
eie@bntu.by	eie@bntu.by

55

of identical suspension heights. The system of "the first tension insulators string - the wire the second tension insulators string" was described by the equations of a parabola. A relationship has been established between the sag increase factor and the coefficients that take into account the presence of tensioning insulators strings. The resulting compact formula for sag increase is generally suitable for any combination of strings in a span. The coincidence of the calculation is shown for particular cases known from the literature. The formula for calculating the load factor for the equation of state was derived, taking into account the presence of different strings in the span. The reliability of the formula has been proved by the coincidence of results for particular cases of the arrangement of strings. The obtained expressions can be used both for vertical (weight and ice) loads and for horizontal (wind) ones. In the case of loads in two planes, the equation of state must take into account all the components when calculating the resulting reduced load on the wire along the inclined plane. Calculations were performed for different lengths of spans of switchgear with different wires and strings of insulators. A span with one and two tensioning strings of insulators, with the same suspension heights, in the absence of wind and ice is considered. The curves of the sagging wires to different strings have been plotted. It is demonstrated that when calculating sags and tensions, the difference between strings must not be neglected.

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

For citation: Bladyko Y. V. (2020) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Spans with Different Tensioning Insulator Strings. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 55–65 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-55-65

#### Введение

Механический расчет гибких токопроводов распределительных устройств (РУ) и воздушных линий (ВЛ) сводится к расчету стрел провеса и тяжений проводов в различных климатических режимах. Провес проводов должен удовлетворять необходимым габаритам, а тяжение не превышать допустимых значений для провода и опор. Тяжения определяются при решении уравнения состояния, учитывающего изменение нагрузки на провод вследствие климатических воздействий и механических нагрузок. Для этого выведены коэффициенты нагрузки, учитываемые в решении уравнений состояния, при наличии одной или двух одинаковых натяжных гирлянд изоляторов, а также при их отсутствии [1]. Однако в проектной практике встречаются решения, когда в одном пролете используются различные гирлянды. Цель статьи – определение коэффициентов для расчета стрел провеса и тяжений при наличии в пролете разных гирлянд изоляторов.

В методике [1] для перехода от неоднородной нити, получающейся при представлении системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов», к эквивалентной однородной при любой схеме загружения пролета определяется переходный коэффициент нагрузки *К*. Для пролетов высокого напряжения применяют расщепление токопровода, в этом случае учитываются параметры эквивалентного провода фазы с распределением нагрузок от внутрифазных распорок. Приведенная нагрузка всей системы вычисляется как произведение величины равномерно распределенной нагрузки для проводов фазы на коэффициент нагрузки, учитывающий наличие гирлянд изоляторов, сосредоточенных нагрузок от шлейфов, отпаек, распорок, заградительных шаров [2–6].

При длинах пролета до 500–700 м уравнение цепной линии заменяют параболой, что не дает большую погрешность. В [4] проведены расчеты по существующим методикам, которые дали схожие результаты, наиболее близкие – в случае представления провода цепной линией и использования

56

двух слагаемых разложения в ряд при расчете стрел провеса. Представление провода параболой дает абсолютную погрешность в расчетах всего несколько сантиметров. Тяжение провода при наличии сосредоточенной нагрузки рассчитано по уравнению состояния и совпадает с результатами расчета по программе MR2.20 [7–11]. В [7] сделан вывод, что при известных значениях составляющих сосредоточенных сил можно пользоваться принятой в проектной практике моделью провода в виде параболы.

Стрела провеса (рис. 1) в любом месте пролета может быть определена по формуле

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

где M(x) – балочный изгибающий момент в точке x; H – горизонтальная проекция тяжения в проводе.





*Fig. 1.* The estimated span scheme:

a – span with loads of the wire q, of insulator strings  $q_{r1}$  and  $q_{r2}$ ;

b - span in a form of a simple beam with hinged supports, loaded in the same way

#### Расчет стрел провеса

Стрелы провеса определяются на основании общей формулы (1). Опорные балочные реакции рассчитываются согласно рис. 1 по формулам:

$$A = \frac{ql}{2} + (q_{r1} - q)l_{r1} + \frac{qc - d}{2l};$$

$$B = \frac{ql}{2} + (q_{r2} - q)l_{r2} - \frac{qc - d}{2l},$$

где  $c = l_{r1}^2 - l_{r2}^2$ ;  $d = q_{r1}l_{r1}^2 - q_{r2}l_{r2}^2$ ; q – погонный вес проводов фазы (если фаза не имеет расщепления, то вес 1 м провода);  $q_{r1}$ ,  $q_{r2}$  – погонный вес первой и второй гирлянд изоляторов (с учетом возможного многоцепного исполнения, а также арматуры, зажимов, коромысел, ушек, скоб, серег, промежуточных звеньев и узлов крепления); l – длина пролета (горизонтальное расстояние между точками крепления);  $l_{r1}$ ,  $l_{r2}$  – длины первой и второй натяжных гирлянд изоляторов.

Вводим обозначения:  $K_{\rm B1} = \frac{q_{\rm r1}}{q}; K_{\rm B2} = \frac{q_{\rm r2}}{q}$  – кратности веса первой

и второй натяжных гирлянд изоляторов относительно веса провода;  $K_{r1} = \frac{l_{r1}}{l}; \quad K_{r2} = \frac{l_{r2}}{l}$  – кратности длин первой и второй натяжных гирлянд

изоляторов относительно длины пролета.

После преобразования получим опорную балочную реакцию

$$A = \frac{ql}{2} \left[ 1 + \delta_1 \left( \frac{2l}{l_{r1}} - 1 \right) + \delta_2 \right],$$

где  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – коэффициенты, учитывающие наличие первой и второй натяжных гирлянд изоляторов,  $\delta_1 = (K_{\rm B1} - 1)K_{\rm F1}^2$ ;  $\delta_2 = (K_{\rm B2} - 1)K_{\rm F2}^2$ .

Рассмотрим случай расположения максимальной стрелы провеса на проводе (рис. 1). На этом участке провода до точки *x* имеем балочный изгибающий момент

$$M_{2}(x) = Ax - q_{r1}l_{r1}\left(x - \frac{1}{2}l_{r1}\right) - \frac{1}{2}q\left(x - l_{r1}\right)^{2},$$

откуда по формуле (1) рассчитаем стрелу провеса

$$y_{2}(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - q_{r1} l_{r1} \left( x - \frac{1}{2} l_{r1} \right) - \frac{1}{2} q \left( x - l_{r1} \right)^{2} \right] \quad \text{при} \quad l_{r1} \le x \le l - l_{r2}.$$
(2)

Максимальная стрела провеса находится решением уравнения

$$\frac{dy_2(x)}{dx} = 0,$$

которое дает расстояние  $x_0$  от начала пролета до этой точки

$$x_0 = \frac{l}{2} + \frac{1}{2l} \left( c - \frac{d}{q} \right)$$
или  $x_0 = \frac{1}{2} \left( l + \frac{c}{l} - \frac{d}{ql} \right) = \frac{1}{2} \left( l + \frac{qc - d}{ql} \right),$  (3)

#### и равна

$$f_{0} = y_{2}(x_{0}) = \frac{1}{8H} \left[ ql^{2} + 2(q_{r1} - q)l_{r1}^{2} + 2(q_{r2} - q)l_{r2}^{2} + \frac{(qc - d)^{2}}{ql^{2}} \right]$$
$$f_{0} = \frac{ql^{2}}{8H}K_{f}, \qquad (4)$$

где  $K_f$  – коэффициент увеличения стрелы провеса, обусловленный наличием натяжных гирлянд изоляторов,

$$K_{f} = 1 + 2(K_{B1} - 1)K_{r1}^{2} + 2(K_{B2} - 1)K_{r2}^{2} + \left[(K_{r1}^{2} - K_{r2}^{2}) - (K_{B1}K_{r1}^{2} - K_{B2}K_{r2}^{2})\right]^{2}$$

или

или

$$K_f = 1 + 2\delta_1 + 2\delta_2 + \delta_{12},$$
 (5)

где  $\delta_{12} = \left[ (K_{r1}^2 - K_{r2}^2) - (K_{B1}K_{r1}^2 - K_{B2}K_{r2}^2) \right]^2 = (\delta_1 - \delta_2)^2 -$ коэффициент, учитывающий разницу в параметрах гирлянд изоляторов.

Для построения зависимости стрелы провеса от координаты x определим y(x) на других участках:

$$y_1(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - \frac{q_{\Gamma 1} x^2}{2} \right] \text{ при } 0 \le x < l_{\Gamma 1};$$
 (6)

$$y_{3}(x) = \frac{1}{H} \left[ Ax - q_{r1}l_{r1} \left( x - \frac{1}{2}l_{r1} \right) - ql_{1} \left( x - l_{r1} - \frac{l_{1}}{2} \right) - q_{r2} \frac{\left( x - l + l_{r2} \right)^{2}}{2} \right]$$
  

$$\Pi pu \ l - l_{r2} < x \le l, \tag{7}$$

где  $l_1 = l - l_{r1} - l_{r2}$  – длина провода без учета провеса.

Для случаев расположения максимальной стрелы провеса на участках натяжных гирлянд изоляторов расстояние до нее рассчитывается по формулам:

$$x_{0} = l_{r1} + \frac{q}{q_{r1}} \left( \frac{l}{2} - l_{r1} \right) + \frac{qc - d}{2q_{r1}l} < l_{r1};$$
(8)

$$x_{0} = l - l_{r2} + \frac{q}{q_{r2}} \left( l_{r2} - \frac{l}{2} \right) + \frac{qc - d}{2q_{r2}l} > l - l_{r2}.$$
(9)

При выполнении одного из этих неравенств для нахождения максимальной стрелы провеса нужно пользоваться формулами (6) или (7).

По выражениям (2), (6) и (7) построены зависимости провеса провода от координаты *x* вдоль пролета для разных гирлянд изоляторов (рис. 2). Практически для всех случаев максимальная стрела провеса приходится на провод и рассчитывается по (4), а расстояние до нее – по (3). Для тяжелых длинных гирлянд (рис. 2d) максимум стрелы провеса пришелся на гирлянду и может быть рассчитан по (7), а расстояние до него – по (9).



Полученная компактная формула (5) для расчета коэффициента увеличения стрелы провеса, обусловленного наличием гирлянд изоляторов, может быть проверена и использована для частных случаев: 1) в пролете только одна левая гирлянда изоляторов ( $\delta_2 = 0$ ):

$$K_{f1} = 1 + 2\delta_1 + \delta_1^2 = (1 + \delta_1)^2$$
 на расстоянии  $x_0 = \frac{l}{2}(1 - \delta_1);$ 

2) в пролете только одна правая гирлянда изоляторов ( $\delta_1 = 0$ ):

$$K_{f2} = (1 + \delta_2)^2$$
 на расстоянии  $x_0 = \frac{l}{2} (1 + \delta_2);$ 

3) в пролете одинаковые гирлянды изоляторов ( $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ ):

$$K_f = 1 + 4\delta$$
 на расстоянии  $x_0 = \frac{l}{2}$ ,

что совпадает с формулой, приведенной в [1].

Полученные выражения (2)–(9) могут применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок, а результирующая стрела провеса в наклонной плоскости рассчитываться после нахождения составляющих в обеих плоскостях [3].

#### Расчет коэффициента нагрузки

Длина эквивалентного провода (системы «первая натяжная гирлянда изоляторов – токопровод – вторая натяжная гирлянда изоляторов») определяется [1]

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

где K – коэффициент нагрузки, учитывающий конструктивные элементы для различных климатических нагрузок,  $K^2 = \frac{12D}{q^2 l^2 l_1}$ ; D – интеграл,

 $D = \int_{0}^{l} Q^{2}(x) dx; Q(x)$  – балочная поперечная сила.

Для рис. 1 интеграл D определяется как

$$D = \int_{0}^{l_{r_{1}}} Q_{1}^{2}(x) dx + \int_{l_{r_{1}}}^{l_{-l_{r_{2}}}} Q_{2}^{2}(x) dx + \int_{l_{-l_{r_{2}}}}^{l} Q_{3}^{2}(x) dx,$$

где  $Q_1(x)$ ,  $Q_2(x)$ ,  $Q_3(x)$  – балочные поперечные силы соответственно на первой гирлянде, проводе и второй гирлянде,

$$Q_{1}(x) = A - q_{r1}x; \quad Q_{2}(x) = A - q_{r1}l_{r1} - q(x - l_{r1});$$
$$Q_{3}(x) = A - q_{r1}l_{r1} - q(l - l_{r1} - l_{r2}) - q_{r2}(x - l + l_{r2}).$$

Окончательно получаем коэффициент нагрузки при разных гирляндах

$$K^{2} = \frac{1}{l_{1}} \left[ l + \frac{8(l_{r1}^{3} + l_{r2}^{3})}{l^{2}} - \frac{6(l_{r1}^{2} + l_{r2}^{2})}{l} - \frac{3c^{2}}{l^{3}} \right] + \frac{6}{ql^{2}l_{1}} \left[ q_{r1}l_{r1}^{2}(l - 2l_{r1}) + q_{r2}l_{r2}^{2}(l - 2l_{r2}) + \frac{cd}{l} \right] + \frac{1}{q^{2}l^{2}l_{1}} \left[ 4q_{r1}^{2}l_{r1}^{3} + 4q_{r2}^{2}l_{r2}^{3} - \frac{3d^{2}}{l} \right].$$
(10)

Коэффициент нагрузки при одинаковых гирляндах ( $q_{r1} = q_{r2} = q_r$ ;  $l_{r1} = l_{r2} = l_r$ ) совпадает с формулой [1]

$$K^{2} = \frac{l_{1}(l+4l_{r})}{l^{2}} + \frac{12q_{r}l_{r}^{2}}{q^{2}l^{2}l_{1}} \left(ql_{1} + \frac{2}{3}q_{r}l_{r}\right).$$

Коэффициент нагрузки, рассчитанный по (10) при одной гирлянде в пролете ( $q_{r1} = q_r$ ;  $l_{r1} = l_r$ ;  $q_{r2} = 0$ ;  $l_{r2} = 0$ ), также совпадает с [1]

$$K^{2} = \frac{l_{2}^{2}(l+3l_{r})}{l^{3}} + \frac{6q_{r}l_{r}^{2}}{q^{2}l^{3}} \left[ql_{2} + \frac{1}{2}q_{r}l_{r}\left(1 + \frac{l}{3l_{2}}\right)\right],$$

где  $l_2 = l - l_{\Gamma}$ .

При отсутствии гирлянд в пролете ( $l_{r1} = l_{r2} = 0$ ) коэффициент нагрузки K = 1.

Полученные коэффициенты позволяют определить для всех режимов эквивалентные погонные и удельные нагрузки, после чего составляется уравнение состояния, позволяющее определить напряжение в проводе в любом режиме нагрузок, в том числе климатических. При этом учитываются упругие и температурные удлинения провода на длине  $l_1$  [2]. Полученное выражение (10) может применяться и для горизонтальных ветровых нагрузок, тогда уравнение состояния должно учитывать эту составляющую при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости [3].

Расчеты выполнены для разных длин пролетов РУ с разными проводами и гирляндами (табл. 1). Рассмотрен пролет с одной и двумя натяжными гирляндами изоляторов, с одинаковыми высотами подвеса, без ветра и гололеда. Первые пять строк таблицы соответствуют кривым провисания провода на рис. 2.

Из табл. 1 видно влияние разных гирлянд в пролете на коэффициенты увеличения стрелы провеса и нагрузки, которое особенно заметно для малых пролетов РУ с легкими проводами. С утяжелением проводов и переходом к пролетам ВЛ влияние разных гирлянд по концам пролета становится менее значительным. Однако пренебрегать различием гирлянд при расчете стрел провеса и тяжений нельзя.

#### Таблица 1

Длина пролета <i>l</i> , м	Вес провода <i>q</i> , даН/м	Длина первой гирлянды <i>l</i> <sub>r1</sub> , м	Длина второй гирлянды <i>l</i> <sub>r2</sub> , м	Вес первой гирлянды q <sub>r1</sub> , даН/м	Вес второй гирлянды q <sub>12</sub> , даН/м	Коэффициент учета первой гирлянды δ <sub>1</sub>	Коэффициент учета второй гирлянды δ <sub>2</sub>	Коэффициент учета различия гирлянд δ <sub>12</sub>	Расстояние до максимальной стрелы провеса x <sub>0</sub> , м	Коэффициент увеличения стрелы провеса К <sub>f</sub>	Коэффициент нагрузки К <sup>2</sup>
		4	4	60	60	0,290	0,290	0	20,00	2,160	13,720
		4	6	60	60	0,290	0,652	0,131	27,25	3,016	27,294
40	2	4	4	60	120	0,290	0,590	0,090	26,00	2,850	28,683
40	2	4	6	60	120	0,290	1,327	1,076	34,11*	5,199*	75,894
		4	0	60	0	0,290	0	0,084	14,20	1,664	6,373
		0	4	0	60	0	0,290	0,084	25,80	1,664	6,373
	4	4	0	60	0	0,035	0	0,001	38,60	1,071	1,366
		0	4	0	60	0	0,035	0,001	41,40	1,071	1,366
		4	4	60	60	0,035	0,035	0	40,00	1,140	1,780
		4	6	60	60	0,035	0,079	0,002	41,75	1,229	2,371
80		6	6	60	60	0,079	0,079	0	40,00	1,315	3,011
80		4	8	60	60	0,035	0,140	0,011	44,20	1,361	3,336
		4	4	60	120	0,035	0,073	0,001	41,50	1,216	2,375
		4	6	60	120	0,035	0,163	0,016	45,13	1,413	4,115
		6	6	60	120	0,079	0,163	0,007	43,38	1,491	4,832
		4	8	60	120	0,035	0,290	0,065	50,20	1,715	7,169
* I	<sup>*</sup> Расчет по (7) и (9), так как $x_0 > (l - l_{r_2})$ .										

#### Расчет коэффициентов увеличения стрел провеса и коэффициентов нагрузки Calculation of sag increase factors and load factors

#### выводы

1. В проектной практике встречаются решения, когда в одном пролете используются различные натяжные гирлянды изоляторов. Установлена связь между коэффициентом увеличения стрелы провеса  $K_f$  и коэффициентами  $\delta$ , учитывающими наличие натяжных гирлянд изоляторов. Полученная компактная формула (5) расчета коэффициента увеличения стрелы провеса  $K_f$  подходит в общем случае для любого сочетания гирлянд в пролете. Показано совпадение расчета для частных случаев, известных из литературных источников.

2. Выведена формула (10) расчета коэффициента нагрузки для случая разных гирлянд в пролете. Достоверность формулы доказана совпадением результатов для частных случаев расположения гирлянд.

3. Полученные выражения (2)–(10) могут применяться как для вертикальных (весовых и гололедных) нагрузок, так и для горизонтальных (ветровых). В случае действия нагрузок в двух плоскостях уравнение состояния должно учитывать все составляющие при расчете результирующей приведенной нагрузки на провод в наклонной плоскости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Бошнякович, А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. Л.: Энергия, 1975. 248 с.
- 2. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенных сил распределенной нагрузкой / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 97–107. https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2018-61-2-97-107.
- Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких токопроводов при замене сосредоточенной нагрузки распределенной с учетом конструктивных элементов / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 220–234. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234.
- 4. Сергей, И. И. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами / И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 4. С. 299–309. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-4-299-309.
- 5. Бладыко, Ю. В. Механический расчет гибких проводов воздушных линий с заградительными шарами в различных климатических режимах / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 24–36. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36.
- 6. Бладыко, Ю. В. Учет распорок в механическом расчете гибких проводов воздушных линий и распределительных устройств / Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 219–231. https://doi.org/10.21122/ 1029-7448-2019-62-3-219-231.
- 7. Стрелюк, М. И. Численный метод расчета статики гибкой ошиновки ОРУ в различных режимах климатических воздействий / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1983. № 8. С. 8–14.
- Стрелюк, М. И. Векторно-параметрический метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Математические методы в электроэнергетике: материалы II Междунар. симпоз. / Польская академия наук. Закопане, 10–12 нояб. 1988. Закопане, 1988. С. 173–181.
- 9. Анализ действия гололедно-ветровых и электродинамических нагрузок в пролетах с произвольным расположением проводов / И. И. Сергей [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 38–44.
- Streliuk, M. I. Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design / M. I. Streliuk, I. I. Sergey, Y. V. Bladyko // New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University. Lublin (Poland), 7–8 Sept. 1995. Lublin, 1995. P. 15–19.
- Стрелюк, М. И. Численный метод механического расчета гибких токопроводов электроустановок энергосистем / М. И. Стрелюк, И. И. Сергей, Ю. В. Бладыко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1995. № 3–4. С. 21–29.

Поступила 30.11.2018 Подписана в печать 04.02.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

#### REFERENCES

- 1. Boshnyakovich A. D. (1975) Calculation of the Wires of Substations and Large Transitions of Transmission Lines. Leningrad, Energia Publ. 248 (in Russian).
- Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Forces are Replaced by a Distributed Load. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 97–107 (in Russian). https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2018-61-2-97-107.
- 3. Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires when the Concentrated Load is Replaced by Distributed One Taking into Account the Structural Elements. *Energetika*.

Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, 61 (3), 220–234 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-220-234.

- 4. Sergey I. I., Bladyko Y. V. (2018) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (4), 299–309 (in Russian). https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2018-61-4-299-309.
- 5. Bladyko Y. V. (2019) Mechanical Calculation of Flexible Wires of Overhead Lines with Barrage Balls in Different Climatic Regimes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*; 62 (1), 24–36 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-24-36.
- 6. Bladyko Y. V. (2019) Accounting for Spacers in the Mechanical Calculation of Flexible Wires for Overhead Lines and Switchgears. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 219–231 (in Russian). https://doi. org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-219-231.
- Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1983) Numerical Method for Calculating the Statics of a Flexible Busbars of Open Distribution Devices in Various Modes of Climatic Influences. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions, (8), 8–14 (in Russian).
- Strelyuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1988) Vector-Parametric Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Wires of Electrical Installations of Power Systems. *Mathematical Methods in the Electric Power Industry: Materials of the II International Symposium. Zakopane, 10–12 Nov. 1988.* Zakopane, 1988. 173–181 (in Russian).
- 9. Sergey I. I., Bladyko Y. V., Panamarenka Y. G., Tsemekhman B. D., Tarasov V. E. (2012) Action Analysis for Ice, Wind and Electro Dynamic Loads in Spans with Arbitrary Wire Layout. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edenenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations, (1), 38–44 (in Russian).
- Streliuk M. I., Sergey I. I., Bladyko Y. V. (1995) Computer Aided Program of Mechanical Calculation of Flexible Conductors for Substations and Overhead Lines Design. New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation: Proc. Int. Conf. Lublin Technical University, (Poland), 7–8 Sept. Lublin, 1995. 15–19.
- Strelyuk M. I., Sergei I. I., Bladyko Y. V. (1995) Numerical Method of Mechanical Calculation of Flexible Current Conductors of Power Units of Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3–4), 21–29 (in Russian).

Received: 30 November 2018 Accepted: 4 February 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80

УДК 621.311

## Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса

#### А. Б. Баламетов<sup>1)</sup>, Э. Д. Халилов<sup>1)</sup>

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В традиционных расчетах установившегося режима электрической сети не учитываются зависимости активных сопротивлений провода воздушной линии от температуры окружающей среды и токов в ветвях. Однако температура является функцией потерь активной мощности, потери – функцией сопротивления и тока, а сопротивление зависит от температуры. Поэтому эти соотношения должны быть связаны с традиционными уравнениями для стационарных режимов. Для повышения точности расчетов установившегося режима требуется температурная коррекция сопротивления ветвей. В работе представлен метод. основанный на совместном решении нелинейных уравнений установившегося режима электрической сети и теплового баланса проводов воздушных линий. Разработаны алгоритм и программа расчета установившегося режима электрической сети с учетом зависимости активных сопротивлений провода воздушной линии от температуры окружающей среды и токов в ветвях. Произведена оценка количественного влияния тока нагрузки, температуры провода, скорости ветра, солнечной радиации на активное сопротивление проводов, а также определены погрешности расчета годовых переменных потерь электроэнергии. Проводились численные эксперименты для шестиузловой модифицированной версии тестовой системы ІЕЕЕ и эквивалентной схемы 110 кВ. Результаты проведенных расчетов установившегося режима на различных тестовых схемах показали, что неучет температурной зависимости активных сопротивлений может привести к ошибкам в потере мощности для отдельных нагруженных линий до 10 % и для суммарных потерь системы до 30 %, что является недопустимым в моделировании режимов электрической сети. Приведены результаты моделирования установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений проводов на примерах шести- и семиузловых схем.

**Ключевые слова:** установившийся режим, уравнения теплового баланса, электрическая сеть, погодные условия, ток линии, активное сопротивление, температура провода, решение нелинейных уравнений

Для цитирования: Баламетов, А. Б. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 66–80. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80

Адрес для переписки	Address for correspondence
Халилов Эльман Дамир оглы	Halilov Elman D.
Азербайджанский научно-исследовательский	Azerbaijan Scientific-Research and Design-
и проектно-изыскательский институт энергетики	Prospecting Power Engineering Institute
пр. Г. Зардаби, 94,	94 G. Zardabi Ave.,
Аз1012, г. Баку, Азербайджанская Республика	Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Тел.: +994012 432-80-76	Tel.: +994012 432-80-76
elmanxalilov2010@mail.ru	elmanxalilov2010@mail.ru

# Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations

A. B. Balametov<sup>1)</sup>, E. D. Halilov<sup>1)</sup>

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

Abstract. In the traditional calculations of the steady-state mode of the electrical network, the dependences of the active resistances of the overhead line wire on the ambient temperature and currents in the branches are not taken into account. However, the temperature is a function of the active power losses, the power losses are a function of the resistance and current, and the resistance is temperature dependent. Therefore, these relations should be related to the traditional equations for stationary regimes. In order to increase the accuracy of steady-state calculations, a temperature correction of the resistance of the branches is required. In this paper, we present a method based on the joint solution of nonlinear equations of the steady-state electric network regime and the thermal balance of the wires of overhead lines. The algorithm and the program of calculation of the steady-state mode of an electric network taking into account dependence of active resistances of a wire of an overhead line on ambient temperature and currents in branches have been developed. The quantitative influence of the load current, wire temperature, wind speed, solar radiation on the active resistance of the wires has been estimated, and the errors in calculating annual variable energy losses have been determined. Numerical experiments were carried out for a 6-node modified version of the IEEE test system and equivalent circuit of 110 kV. The results of the calculations of the steady-state regime on various test circuits showed that the non-account of the temperature dependence of the active resistances might cause errors in power loss for individual loaded lines up to 10 %, and for total losses of the system - up to 30 %. This is unacceptable in simulating the modes of the electric network. The results of simulation of steady-state regimes taking into account the temperature dependence of the resistance of the wires are presented on the example of 6-node and 7-node circuits.

**Keywords:** steady state, heat balance equations, electric network, weather conditions, line current, active resistance, wire temperature, solution of nonlinear equations

For citation: Balametov A. B., Halilov E. D. (2020) Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 66–80. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80 (in Russian)

#### Введение

Продолжительный рост нагрузки в электрических сетях (ЭС) требует наличия достоверной информации о состоянии линии, а также фактических данных о температуре проводов и плотности протекающего тока для максимального использования пропускной способности воздушных линий (ВЛ).

Учет температуры провода необходим для мониторинга ВЛ с целью учета тепловых ограничений и допустимости провисания, оценки потерь в рамках оценки состояния для распределения затрат, оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС), изучения влияния температурной зависимости кольцевых ЭС на неоднородность ЭС.

Повышение точности расчета переменных потерь электроэнергии в воздушных линиях электропередачи возможно с учетом протекающего по линиям рабочего тока, температуры окружающего воздуха, скорости ветра и теплоты солнечного излучения при оценке активных сопротивлений проводов в зависимости от их температур.

Температура провода, в свою очередь, зависит от режимных и метеорологических факторов: плотности тока, температуры окружающего воздуха  $t_{\rm B}$ , силы и направления ветра, интенсивности солнечной радиации и др. [1–12]. Однако при использовании известных традиционных алгоритмов расчета установившегося режима электрических сетей (РУРЭС) и оценке состояния пренебрегают температурными зависимостями, которые в соответствующих программах сопротивления трансформаторов, воздушных линий и кабелей принимаются постоянными. В связи с этим результаты режимных расчетов содержат погрешности. В вышеуказанных исследованиях установлено, что пренебрежение коррекцией сопротивления ветви в зависимости от температуры может привести к существенным ошибкам в потерях при сильно загруженных режимах до 10 %. Для отдельных ветвей этот показатель равен ~30 %.

Моделирование воздушных линий предполагает постоянное сопротивление провода при исходно заданной температуре 20 °C. Однако фактическая температура провода ВЛ обычно достигает 90–120 °C и более. Таким образом, важно анализировать влияние повышения температуры при эксплуатации линии электропередачи на такие величины, как потери и потоки мощности.

В [7] предложена модель ВЛ, основанная на упрощении уравнения теплового баланса (УТБ) IEEE Std. 738 [3]. В данной модели тепловые потери на излучение и конвекцию аппроксимированы в виде линейной функции от температуры воздуха.

В [8] рассматривается температурная зависимость потокораспределения.

В традиционном потокораспределении сопротивления проводов линий принимаются постоянными, потому что они оказывают небольшое влияние на изменения напряжения ЭС. Но, с другой стороны, температура провода, сопротивление и потери являются взаимозависимыми и изменяются значительно при нормальном функционировании. Отказ от учета изменения сопротивления относительно температуры может привести к существенным ошибкам в результатах расчета.

В [5, 8, 10–12] исследованы различные алгоритмы потокораспределения с учетом температуры:

– полный метод Ньютона – Рафсона;

 – частично разделенный алгоритм, в котором температура обновляется отдельно от традиционных переменных;

- быстрый разделенный метод;

- последовательно разделенный метод.

В частности, в [10] разработаны алгоритм и программа расчета удельного активного сопротивления проводов ВЛ и их характеристики с учетом температуры воздуха, рабочего тока, скорости ветра и солнечной радиации и получены зависимости температуры проводов от температуры воздуха, рабочего тока, скорости ветра.

Таким образом, в настоящее время возникла необходимость разработки специальных компьютерных программ для расчета и анализа установившихся режимов, основанных на совместных уравнениях потокораспределения и теплового баланса, позволяющих осуществлять непосредственную оценку значений температуры элементов ЭС.

Цель статьи – разработка алгоритма и оценка количественного влияния тока нагрузки, температуры провода, скорости ветра, солнечной радиации на активное сопротивление проводов, а также определение погрешностей расчета годовых переменных потерь электроэнергии. При этом температура является функцией потерь, потери – функцией сопротивления и тока, а сопротивление зависит от температуры. В данном случае эти соотношения связываются с традиционным потокораспределением с помощью совместных уравнений для стационарных режимов сопротивлений, потерь и температур.

#### Уравнение теплового баланса для воздушных линий

Удельное активное сопротивление *r* проводов ВЛ рассчитывается по формуле

$$r = r_{20} \Big[ 1 + \alpha \Big( t_{\rm np} - 20 \Big) \Big],$$

где  $r_{20}$  – удельное активное сопротивление при температуре провода 20 °C, Ом/км;  $\alpha = 0,00403$  – температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминиевых проводов, 1/°C;  $t_{np}$  – температура провода, °C.

Температура провода в вышеуказанной формуле, как правило, неизвестна. Она зависит от различных факторов и, в первую очередь, от протекающего по проводу электрического тока, температуры окружающего воздуха и скорости ветра. В традиционных расчетах переменных потерь электроэнергии активные сопротивления, приведенные в справочниках, соответствуют температуре 20 °C и пересчитываются с учетом температуры воздуха  $t_{\rm B}$ .

Уравнение теплового баланса для установившегося теплового режима ВЛ выглядит следующим образом [6, 9, 10]:

$$I^{2}R_{20}\left[1+\alpha(t_{\rm np}-20)\right]+P_{\rm c}=\pi d_{\rm np}(k_{\rm \kappa}+k_{\rm m})(t_{\rm np}-t_{\rm B}), \tag{1}$$

где *I* – ток линии, А; *R*<sub>20</sub> – сопротивление провода при 20 °C, Ом/м; *t*<sub>в</sub> – температура воздуха, °C; *k*<sub>к</sub>, *k*<sub>л</sub> – коэффициенты теплоотдачи провода при конвективном и лучистом теплообмене, Bt/(м<sup>2</sup>.°C); *P*<sub>c</sub> – теплота солнечно-го излучения, поглощаемая 1 м провода в единицу времени, Bt; *d*<sub>пр</sub> – диаметр провода, м.

Коэффициенты уравнения (1) для различных случаев впервые были получены Бургсдорфом [2]. Левая часть в данном уравнении представляет собой теплоту, получаемую проводом от протекающего тока и солнечного излучения, а правая часть состоит из суммы конвективных потерь и потерь на радиацию.

Коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется по формуле Стефана – Больцмана [4, 6]

$$k_{\rm m} = \frac{5,67\varepsilon}{t_{\rm mp} - t_{\rm B}} \left[ \left( \frac{273 + t_{\rm mp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_{\rm B}}{100} \right)^4 \right],\tag{2}$$

где є – постоянная лучеиспускания (степень черноты провода).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией в общем виде определяется исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена. Однако в реальных условиях всегда есть некоторое движение воздуха. Согласно результатам исследований, при антициклоническом характере погоды минимальную скорость ветра можно принять равной 0,6 м/с, при циклоническом характере погоды – 2 м/с [7].

Авторы [2, 6] установили, что при малых скоростях ветра (v < 5 м/с) коэффициент теплоотдачи конвекцией приближенно рассчитывается по выражению

$$\alpha_{\kappa} = 3,5\psi\sqrt{\frac{\gamma}{d}},\tag{3}$$

где  $\psi$  – коэффициент зависимости теплоотдачи при конвективном теплообмене от угла атаки ветра.

Сопротивление проводов пропорционально температуре в соответствии с [7]

$$R_{tnp} = R_{20} \left( \frac{t_{np} + t_F}{20 + t_F} \right), \tag{4}$$

где  $R_{tnp}$  – сопротивление провода при температуре  $t_{np}$ ;  $t_{np}$  – температура провода;  $t_F$  – температурная константа.

Температурная константа  $t_F$  зависит от металла провода: 234,5 °C – для меди; 228,1 °C – для алюминия [7].

В модели теплового сопротивления превышение температуры устройства принимается линейно пропорциональным тепловой мощности устройства, то есть потерям устройства:

$$\frac{t_{\rm np} - t_{\rm B}}{\Delta P_t} = R_{\rm \theta}.$$
(5)

Температура провода не может быть ниже температуры окружающей среды. Температура провода *t*<sub>np</sub> равна сумме температуры окружающей

среды  $t_{\rm B}$  и превышения температуры провода  $\Delta t$  над температурой окружающей среды  $t_{\rm np} = t_{\rm B} + \Delta t$ . Таким образом, из (5) получаем

$$t_{\rm up} = t_{\rm B} + R_{\rm \theta} \Delta P_t. \tag{6}$$

Выражая  $\Delta P_t$  в виде функции от напряжения энергосистемы и температуры состояния  $t_{np}$ , выражение (6) может быть непосредственно включено в алгоритм расчета уравнения установившегося режима (УУР).

Согласно [8], при нормальных условиях эксплуатации коэффициенты лучистого и конвективного теплообмена  $Q_{\pi}$  и  $Q_{\kappa}$  могут быть аппроксимированы как линейные функции превышения температуры провода над температурой окружающего воздуха:

$$Q_{\rm n} \approx K_{\rm n} \left( t_{\rm np} - t_{\rm B} \right); \quad Q_{\rm k} \approx K_{\rm k} \left( t_{\rm np} - t_{\rm B} \right). \tag{7}$$

 $Q_{\pi}$  и  $Q_{\kappa}$  постоянны для заданных условий: температуры окружающей среды, барометрического давления и скорости ветра [8]. Используя  $K_{\pi}$  и  $K_{\kappa}$ , (1) можно представить в виде

$$I^{2}R_{20}\left[1+\alpha(t_{\rm np}-20)\right]+P_{c}=(K_{\rm n}+K_{\rm k})\Delta t.$$
(8)

Это позволяет записать выражение для проводов воздушной линии

$$t_{\rm np} = t_{\rm \scriptscriptstyle B} + \left(\Delta P + Q_{\rm p}\right) \frac{1}{K_{\rm \scriptscriptstyle II} + K_{\rm \scriptscriptstyle K}}.$$
(9)

Для любого заданного провода  $Q_{\pi}$ ,  $Q_{\kappa}$  и  $Q_{p}$  могут быть определены по заданным погодным условиям, принимаемым постоянными для решения уравнений установившихся режимов (УУР) ЭС с учетом изменений температуры проводов.

#### Уравнения установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений

Как было отмечено выше, уравнения установившихся режимов с учетом температурной зависимости сопротивлений используют три основные модификации обычного УУР методом Ньютона – Рафсона:

$$P_{i}\left(\delta, U, t_{np}\right) = V_{i} \sum_{j=1}^{n} V_{j}\left(G_{ij}\left(t_{np}\right)\cos\left(\delta_{i}-\delta_{j}\right) + B_{ij}\left(t_{np}\right)\sin\left(\delta_{i}-\delta_{j}\right)\right) = P_{r,i} - P_{n,i};$$
(10)

$$Q_{i}\left(\delta, U, t_{np}\right) = V_{i} \sum_{j=1}^{n} V_{j}\left(G_{ij}\left(t_{np}\right)\sin\left(\delta_{i}-\delta_{j}\right) - B_{ij}\left(t_{np}\right)\cos\left(\delta_{i}-\delta_{j}\right)\right) = P_{r,i} - P_{\frac{1}{2},i};$$
(11)

$$H_{ij}\left(\delta, U, t_{np}\right) = t_{ij} - \left(T_{B} + R_{\theta, ij}g_{ij}\left(t_{np}\right)\left(U_{i}^{2} + U_{j}^{2}\right)\right) - 2g_{ij}\left(t_{np}\right)U_{i}U_{j}\cos\left(\delta_{i} - \delta_{j}\right).$$

$$(12)$$

Уравнения (10)–(11) отличаются от традиционных тем, что в проводимостях  $G_{ij}$  и  $B_{ij}$  учитываются температурные зависимости.

Небалансы вычисляются по уравнениям:

$$\Delta P_i = \left(P_{\mathrm{r},i} - P_{\mathrm{H},i}\right) - P_i\left(\delta, U, t_{\mathrm{np}}\right); \tag{13}$$

$$\Delta Q_i = \left( Q_{\mathrm{r},i} - Q_{\mathrm{H},i} \right) - Q_i \left( \delta, U, t_{\mathrm{np}} \right); \tag{14}$$

$$\Delta H_{ij} = 0 - H_{ij} \left( \delta, U, t_{np} \right). \tag{15}$$

Небалансы, полученные по (13)–(15), позволяют уточнить вектор состояния решением уравнений (10)–(12) методом Ньютона – Рафсона. В связи с добавлением температуры к вектору состояния матрица Якоби представляется следующим образом:

$$J(\delta, U, t_{\rm np}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} & \frac{\partial P}{\partial t_{\rm np}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} & \frac{\partial Q}{\partial t_{\rm np}} \\ \frac{\partial H}{\partial \delta} & \frac{\partial H}{\partial U} & \frac{\partial H}{\partial t_{\rm np}} \end{bmatrix}.$$
 (16)

Составляющие частных производных H относительно  $\delta$  и U могут быть рассчитаны из (12).

Активная  $g_{ij}$  и реактивная  $b_{ij}$  проводимости ветви ij являются функцией параллельного активного  $r_{ij}$  и реактивного  $x_{ij}$  сопротивлений:

$$g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}; \ b_{ij} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}.$$

Частные производные неявной функции  $\frac{\partial P}{\partial t_{kn}}$  по температуре провода

определяются по формуле

$$\frac{\partial P}{\partial t_{kn}} = \frac{\partial P_i}{\partial g_{kn}} \frac{\partial g_{kn}}{\partial R_{kn}} \frac{\partial R_{kn}}{\partial t_{kn}} + \frac{\partial P_i}{\partial b_{kn}} \frac{\partial b_{kn}}{\partial R_{kn}} \frac{\partial R_{kn}}{\partial T_{kn}}.$$
(17)

После определения матрицы Якоби уточняются зависимые переменные уравнений
$$\begin{bmatrix} \delta^{(\nu+1)} \\ U^{(\nu+1)} \\ t_{np}^{(\nu+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(\nu)} \\ U^{(\nu)} \\ t_{np}^{(\nu)} \end{bmatrix} + J \left( \delta^{(\nu)}, U^{(\nu)}, t_{np}^{(\nu)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(\nu)} \\ \Delta Q^{(\nu)} \\ \Delta H^{(\nu)} \end{bmatrix}.$$
(18)

Уравнения узловых напряжений и теплового баланса решаются как единая система методом Ньютона – Рафсона. На рис. 1 приведена блок-схема соответствующего программного обеспечения, реализующая данный алгоритм, который состоит из модулей:

 а) уточнение сопротивлений ветвей в соответствии с уточнением температуры проводов;

b) уточнение матрицы узловых проводимостей;

с) вычисление матрицы Якоби;

d) расчет небалансов;

е) обновление зависимых переменных состояния.

Из-за различий между уравнениями теплового баланса и уравнениями узловых напряжений ухудшается сходимость вычислительного процесса.

В частично разделенном методе температурно-зависимого решения УУР уравнения вектора напряжения состояния отделены от уравнений температурного состояния:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(\nu+1)} \\ U^{(\nu+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(\nu)} \\ U^{(\nu)} \end{bmatrix} + J_{PQ} \left( \delta^{(\nu)}, U^{(\nu)}, T^{(\nu)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(\nu)} \\ \Delta Q^{(\nu)} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} t_{np}^{(\nu+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{np}^{(\nu)} \end{bmatrix} + J_{H} \left( \delta^{(\nu)}, U^{(\nu)}, t_{np}^{(\nu)} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta H^{(\nu)} \end{bmatrix}. (20)$$

Затем производится уточнение вектора состояния в соответствии с уравнениями:

$$\left[\delta^{(\nu+1)}\right] = \left[\delta^{(\nu)}\right] + J_P^{-1}\left[\Delta P^{(\nu)}\right]; \quad (21)$$

$$\left[U^{(\nu+1)}\right] = \left[U^{(\nu)}\right] + J_{Q}^{-1}\left[\Delta Q^{(\nu)}\right]; \quad (22)$$



*Рис. 1.* Алгоритм температурнозависимого расчета УУР

*Fig. 1.* Algorithm of temperaturedependent calculation of steady-state equations

$$\begin{bmatrix} t_{\rm np}^{(\nu+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{\rm np}^{(\nu)} \end{bmatrix} + J_H^{-1} \begin{bmatrix} \Delta H^{(\nu)} \end{bmatrix}.$$
(23)

Разделенные алгоритмы могут быть включены в существующие программы УУР, так как расчеты температуры можно рассматривать как отдельный модуль.

#### Алгоритмы последовательного уточнения температуры ветвей

В алгоритмах последовательного уточнения температуры сначала решают традиционные УУР на основе оценок фиксированной температуры. Далее вычисляются температуры ветвей на основе результатов РУРЭС и используются для обновления сопротивлений и  $Y_{\rm y3n}$ . Небалансы мощности и температуры затем пересчитываются по уточненным проводимостям. Процесс продолжается с традиционными УУР с использованием уточненного  $Y_{\rm y3n}$ . Основные преимущества последовательного подхода – простота, а также возможность легко использовать известные алгоритмы потока мощности. Недостатком является решение УУР при каждом изменении температуры.

Практическая реализация УУР-ТЗ требует получения значений температуры окружающей среды по всей системе по датчикам, установленным в ВЛ. Эти измерения могут быть получены из системы сбора данных (SCADA). Другим вариантом является получение данных о температуре от внешних подсистем, таких как модуль прогноза погоды в сочетании с нагрузкой.

#### Моделирование режима

Алгоритмы РУРЭС с учетом температурной зависимости активного сопротивления применялись для двух тестовых систем:

1) семиузловой эквивалентной схемы 110 кВ участка Азербайджанской энергосистемы (рис. 2);

2) модифицированной версии тестовой шестиузловой системы IEEE (рис. 3).



*Puc. 2.* Семиузловая эквивалентная схема сети 110 кВ *Fig. 2.* Seven-node equivalent 110 kV network circuit



*Puc. 3.* Шестиузловая тестовая схема IEEE *Fig. 3.* IEEE six-node test scheme

# Моделирование для семиузловой эквивалентной схемы 110 кВ участка Азербайджанской энергосистемы с 14 ветвями

В табл. 1, 2 представлена исходная информация по ветвям и узлам для схемы рис. 2.

Таблица 1

	background mormation of the steady-state calculations by branches										
N⁰	NNV	NKV	R	X	В						
1	1	2	1,716	5,72	38,61						
2	1	2	1,716	5,72	38,61						
3	1	3	1,514	10,44	70,47						
4	1	3	1,514	10,44	70,47						
5	1	6	0,268	6,88	46,44						
6	2	6	5,307	6,96	46,98						
7	2	5	2,820	4,68	31,59						
8	2	5	2,820	4,68	31,59						
9	2	4	0,195	5,00	33,75						
10	5	4	0,220	5,64	38,07						
11	5	4	1,212	4,04	27,27						
12	5	4	1,212	4,04	27,27						
13	5	7	2,892	4,80	32,40						
14	7	3	0,140	3,60	24,30						

Исходная информация РУР по ветвям ckground information of the steady-state calculations by branches

Таблица 2

#### Исходная информация РУР по узлам

### Background information of the steady-state calculations by nodes

Номер узла	Нагрузка, МВт	Нагрузка, Мвар	Генерация, МВт	Нагрузка, Мвар	
1	0	0	354,88	125,43	
2	40	20	0	0	
3	100	30	0	0	
4	80	20	0	0	
5	50	20	0	0	
6	40	10	0	0	
7	40	10	0	0	

В табл. 3 приведены результаты расчета установившегося режима для семиузловой эквивалентной схемы при:  $T_{\text{воз}} = 25 \text{ °C}, t_{\text{превыш}} = 0.$ 

Таблица 3 Результаты расчета установившегося режима для семнузловой эквивалентной схемы при T<sub>во3</sub> = 25 °C, t<sub>превыш</sub> = 0

Results of calculation of the steady-state mode for a seven-node equivalent circuit at  $T_{amb} = 25 \text{ °C}$ ,  $t_{rise} = 0$ 

i	j	<i>T</i> , °C	Sij, MB·A	Loading, %	<i>Ріј</i> , МВт	<i>Qіј</i> , Мвар	<i>Sji</i> , MB∙A	<i>Рјі</i> , МВт	<i>Qji</i> , Мвар	Δ <i>P</i> , MBt
1	2	25	88,6	85,2	84,9	25,5	86,7	-83,8	-22,2	1,0100
1	2	25	88,6	85,2	84,9	25,5	86,7	-83,8	-22,2	1,0100
1	3	25	69,9	43,7	64,4	26,9	68,0	-63,9	-23,1	0,5537
1	3	25	69,9	43,7	64,4	26,9	68,0	-63,9	-23,1	0,5537
1	6	25	59,1	64,2	55,8	19,3	58,4	-55,7	-17,5	0,0701
2	6	25	17,5	29,2	-15,6	-8,0	17,7	15,7	8,2	0,1276
2	5	25	46,1	66,8	45,9	3,3	45,5	-45,5	-2,5	0,4682
2	5	25	46,1	66,8	45,9	3,3	45,5	-45,5	-2,5	0,4682
2	4	25	58,1	63,2	51,4	27,1	57,5	-51,3	-25,8	0,0516
5	4	25	10,8	10,4	10,3	-3,1	10,8	-10,3	3,1	0,0113
5	4	25	10,8	10,4	10,3	-3,1	10,8	-10,3	3,1	0,0113
5	4	25	8,1	7,7	8,0	-0,3	8,1	-8,0	0,3	0,0011
5	7	25	14,3	20,7	12,3	-7,3	14,3	-12,2	7,3	0,0471
7	3	25	32,6	35,4	-27,8	-17	32,7	27,8	17,3	0,0119
									4,3959	

Суммарные потери активной мощности по схеме без учета температуры составили 4,3959 МВт.

В табл. 4 представлены результаты расчета установившегося режима для семиузловой эквивалентной схемы при  $T_{\text{воз}} = 25 \text{ °C}, t_{\text{превыш}} = 25.$ 

Таблица 4

Результаты расчета установившегося режима для семиузловой эквивалентной схемы при  $T_{воз} = 25$  °C,  $t_{превыш} = 25$ 

•	•	
	Results of calculation of the steady-state mode	
и о	source node equivalent singuit at $T = -25 \circ C t$	- 25

	for a seven-node equivalent circuit at $T_{amb} = 25 \text{ °C}$ , $t_{rise} = 25$											
i	j	<i>T</i> , ℃	Sij, MB·A	Loading, %	<i>Ріј</i> , МВт	<i>Qіј</i> , Мвар	Sji, MB·A	<i>Рјі</i> , МВт	<i>Qji</i> , Мвар	Δ <i>P</i> , MBt	$\Delta P_{\text{превыш}}, $	
1	2	40,9	88,5	85,1	84,9	25,1	86,6	-83,8	-21,7	1,0703	6,40	
1	2	40,9	88,5	85,1	84,9	25,1	86,6	-83,8	-21,7	1,0703	6,40	
1	3	29,0	70,0	43,8	64,5	27,2	68,1	-64,0	-23,4	0,5653	1,62	
1	3	29,0	70,0	43,8	64,5	27,2	68,1	-64,0	-23,4	0,5653	1,62	
1	6	33,9	59,2	64,4	55,9	19,7	58,6	-55,8	-17,9	0,0730	3,57	
2	6	26,9	17,7	29,6	-15,6	-8,4	17,9	15,8	8,5	0,1318	0,77	
2	5	34,9	45,9	66,6	45,8	2,9	45,4	-45,4	-2,1	0,4843	4,00	
2	5	34,9	45,9	66,6	45,8	2,9	45,4	-45,4	-2,1	0,4843	4,00	
2	4	34,0	58,4	63,5	51,5	27,5	57,7	-51,5	-26,2	0,0540	3,63	
5	4	25,2	10,8	10,3	10,3	-3,2	10,8	-10,3	3,3	0,0113	0,10	
5	4	25,2	10,8	10,3	10,3	-3,2	10,8	-10,3	3,3	0,0113	0,10	
5	4	25,1	8,0	7,7	8,0	-0,4	8,0	-8,0	0,4	0,0011	0,05	
5	7	26,0	14,4	20,9	12,2	-7,8	14,4	-12,1	7,9	0,0485	0,39	
7	3	27,9	32,9	35,8	-27,9	-17,5	33,1	27.9	17,8	0,0123	1,15	
										4,5831		

Суммарные потери активной мощности по схеме без учета температуры составили 4,5831 МВт.

В табл. 5 приведены результаты сравнительного анализа расчета установившегося режима для семиузловой эквивалентной схемы.

Таблица 5

#### Результаты сравнительного анализа расчета установившегося режима для семиузловой эквивалентной схемы

Results of comparative analysis of steady-state mode calculation for a seven node equivalent circuit

		Мощность,	Тампара	Относительное	Результаты потерь мощности РУР			
No	Bornu		тура про-	повышение	Тралицион-	С учетом	Относитель-	
JI⊻	БСТБИ	MB·A	гура про-	сопротивления,	прадицион-	темпера-	ное повы-	
			вода, С	%	HEC, WIDT	туры, МВт	шение, %	
1	1-2	86,6	40,9	6,40	1,0100	1,0703	5,97	
2	1-2	86,6	40,9	6,40	1,0100	1,0703	5,97	
3	1-3	45,4	34,9	1,62	0,5537	0,5653	2,09	
4	1–3	45,4	34,9	1,62	0,5537	0,5653	2,09	
5	1-6	58,6	33,9	3,57	0,0701	0,0730	4,14	
6	2–4	57,7	34,0	0,77	0,1276	0,1318	3,29	
7	2-5	68,1	29,0	4,00	0,4682	0,4843	3,44	
8	2-5	68,1	29,0	4,00	0,4682	0,4843	3,44	
9	2-6	33,1	27,9	3,63	0,0516	0,0540	4,65	
10	5–4	17,9	26,9	0,10	0,0113	0,0113	0	
11	5–4	14,4	26,0	0,10	0,0113	0,0113	0	
12	5–4	10,8	25,2	0,05	0,0011	0,0011	0	
13	5-7	10,8	25,2	0,39	0,0471	0,0485	2,97	
14	7–3	8,0	25,1	1,15	0,0119	0,0123	3,36	
		Суммарные	потери		4,3959	4,5831	4,26	

Учет температурной зависимости в УУР увеличивает потери в нагруженных линиях. Суммарные потери по традиционному РУРЭС составили ~4,4 МВт, а с учетом температуры 4,55 и 4,67 МВт. Относительное изменение потерь для нагруженных линий – около 8,8 %. Суммарные потери схемы изменились на 6,3 %.

Проводились расчеты также для  $T_{воз} = 40$  °C,  $t_{превыш} = 25$ . Для этого случая суммарные потери составили 4,721 МВт. Изменение потерь для нагруженных линий – около 11,2 %.

# Моделирование для тестовой шестиузловой системы IEEE с 11 ветвями (рис. 3)

Генерация и потребление в узлах шестиузловой схемы IEEE в о. е. приведены в табл. 6.

В табл. 7 представлены результаты расчета потерь мощности с учетом изменения температуры провода от потока мощности для схемы рис. 3.

Различия в расчетах потерь являются наиболее выраженными для сильно нагруженных линий. Максимальное увеличение потерь мощности для ветвей тестовой схемы IEEE составило 0,94–8,78 %. Суммарные потери увеличились на 6,5 %.

Таблица б

# Нагрузки узлов шестиузловой тестовой схемы IEEE Loads of the IEEE six-node test circuit nodes

№ узлов / мощности, о. е.           Генерация         Р <sub>ген</sub>		1	2	3	4	5	6
		1,0569	0,50	0,6000	0	0	0
	$Q_{\rm ren}$	0,1715	0,74	0,8812	0	0	0
Потребление	$P_{\rm Har}$	0	0	0	0,75	0,68	0,65
	$Q_{_{\mathrm{Har}}}$	0	0	0	0,70	0,70	0,70

Таблица 7

# Результаты расчета установившегося режима для схемы рис. 3 The results of the steady-state mode calculation for the scheme of Fig. 3

Номера	Температура	Резу.	льтаты потерь мощности	РУР
ветвей	провода, °С	Традиционные, МВт	С учетом температуры, МВт	Относительное повышение, %
1-2	37,75	0,9049	0,9773	7,99
1–4	40,10	1,0876	1,1574	6,42
1-5	44,20	1,0735	1,1678	8,78
2-3	26,01	0,0403	0,0407	1,00
2–4	47,02	1,5051	1,6289	8,23
2-5	37,82	0,4979	0,5274	5,91
2-6	27,06	0,5833	0,5888	0,94
3–5	29,33	1,0936	1,1275	3,10
3–6	43,30	1,0034	1,0806	7,69
4–5	25,57	0,0362	0,0385	6,18
5–6	25,69 0,0496		0,0528	6,49

Практическое решение уравнений установившегося режима ЭС с учетом теплового баланса можно проводить, используя значения температуры окружающей среды, полученные по датчикам, установленным и эксплуатируемым в реальных условиях, и по данным SCADA-системы. Другим вариантом является получение данных о температуре от внешних подсистем, таких как модуль прогноза погоды в сочетании с нагрузкой.

# выводы

1. В настоящее время существует необходимость в разработке специальных компьютерных программ, включающих модули потокораспределения и уравнения теплового баланса для анализа установившихся режимов, позволяющих осуществлять непосредственную оценку значений температуры элементов ЭС.

2. Исследованы алгоритмы решения уравнений электрического и теплового режимов электрической сети. Разработан и реализован алгоритм

определения и учета температуры проводов воздушных линий при расчетах потокораспределения в электрических сетях.

3. Установлено, что учет температуры повышает точность определения потоков и потерь мощности по сравнению с традиционным потокораспределением.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Поспелов, Г. Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. В. Ерешевич // Электричество. 1973. № 10. С. 81–83.
- Бургсдорф, В. В. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по току их проводов / В. В. Бургсдорф, Л. Г. Никитина // Электричество. 1989. № 11. С. 1–8.
- 3. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. WG B2.43, Tech. Rep. 601, CIGRE, 2014, 95 p.
- Фигурнов, Е. П. Уточненная методика расчета нагрева проводов воздушных линий электропередачи / Е. П. Фигурнов, Ю. И. Жарков, Т. Е. Петрова // Электрические станции. 2013. № 9. С. 54–59.
- Santos, J. R. Assessment of Conductor Thermal Models for Grid Studies / J. R. Santos, A. G. Exposito, F. P. Sanchez // IET Generation Transmission & Distribution. 2007. Vol. 1, No 1. P. 155–161.
- 6. Левченко, И. И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. 2008. № 4. С. 2–8.
- 7. IEEE 738–2006. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. IEEE, 2007. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.301349.
- 8. Frank, S. Temperature Dependent Power Flow Source Code [Electronic Resource] / S. Frank, J. Sexauer, S. Mohagheghi. 2013. Mode of Access: https://github.com/ TDPF/TDPF.
- 9. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Герасименко, И. В. Шульгин, Г. С. Тимофеев // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технология. 2008. № 6. С. 19–21.
- Баламетов, А. Б. Моделирование температуры провода для расчета потерь электроэнергии воздушных линий / А. Б. Баламетов, М. П. Байрамов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 2. С. 3–12.
- 11. Программа моделирования температуры провода и потерь мощности на основе учета режимных и атмосферных факторов / А. Б. Баламетов [и др.] // Программные продукты и системы. 2018. Т. 2, № 31. С. 396–402.
- 12. Баламетов, А. Б. Учет температурной зависимости сопротивлений воздушных линий при установившихся режимах электрической сети / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов, Т. М. Исаева // Федоровские чтения-2017: XLVII Междунар. науч-практ. конф. Москва, 15–17 нояб. 2017 г. М.: Изд. дом МЭИ, 2017. 340 с.

Поступила 25.10.2018 Подписана в печать 08.01.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

#### REFERENCES

 Pospelov G. E., Ereshevich V. V. (1973) Influence of the Temperature of Wires on the Losses of Electric Power in the Active Resistances of the Wires of Overhead Power Lines. *Elektrichestvo* [Electricity], (10), 81–83 (in Russian).

- Burgsdorf V. V., Nikitina L. G. (1989) Determination of the Permissible Current of the Load of Overhead Power Transmission Lines by the Current of their Wires. *Elektrichestvo* [Electricity], (11), 1–8 (in Russian).
- 3. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. WG B2.43. Tech. Rep. 601. CIGRE, 2014, 95.
- 4. Figurnov E. P., Zharkov Yu. I., Petrova T. E. (2013) Refined Methodology for Calculating the Heating of Wires of Overhead Transmission Lines. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (9), 54–59 (in Russian).
- Santos J. R., Exposito A. G., Sanchez F. P. (2007) Assessment of Conductor Thermal Models for Grid Studies. *IET Generation Transmission & Distribution*, 1 (1), 155–161. https://doi.org/ 10.1049/iet-gtd:20050472.
- 6. Levchenko I. I., Satsuk E. I. (2008) Load Capacity of Overhead Transmission Lines in Extreme Weather Conditions. *Elektrichestvo* [Electricity], (4), 2–8 (in Russian).
- 7. *IEEE 738–2006. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.301349.
- 8. Frank S., Sexauer J., Mohagheghi S. (2013) *Temperature Dependent Power Flow Source Code*. Available at: https://github.com/TDPF/TDPF.
- Gerasimenko A. A., Shulgin I. V., Timofeev G. S. (2008) Accounting of Circuit-Regime and Atmopheric Factors in Calculating the Technological Losses of Electric Power in Distribution Networks. *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Tekhnika i Tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, (6), 19–21 (in Russian).
- Balametov A. B., Bayramov M. P. (2013) Temperature Simulation of Wire for Calculation of Electric Power Losses of Overhead Lines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (2), 3–12 (in Russian).
- Balametov A. B., Khalilov E. D., Bayramov M. P., Agakhanova K. A. (2018) Program for Modeling the Temperature of the Wire and Power Losses Based on the Consideration of the Regime and Atmospheric Factors. *Programmnye Produkty i Sistemy = Software & Sistems*, 2 (31) (in Russian).
- 12. Balametov A. B., Khalilov E. D., Isaeva T. M. (2017) Account of the Temperature Dependence of the Resistance of Overhead Lines under Steady-State Conditions of the Electrical Network. *Fedorovskie Chteniya 2017: XLVII Mezhdunar. Nauch-Prakt. Konf. Moskva, 15–17 Noyab. 2017 g.* [Fedorov Readings 2017: XLVII International Scientific and Practical Conference, Moscow, 15–17 Nov., 2017]. Moscow, MEI Publishing House. 340 (in Russian).

Received: 25 October 2018 Accepted: 8 January 2019 Published online: 31 January 2020

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-81-88

UDC 536.24

# **Calculation of Heat Exchange on the Surface of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals**

## I. L. Iokova<sup>1)</sup>, A. S. Kalinichenko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus), <sup>2)</sup>Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Abstract. Currently, the world is characterized by quite a large number of military conflicts, manmade disasters and natural disasters. Every year, about 50 thousand people die from various natural disasters in the world. The report of the UNISDR notes that natural disasters that occurred in the world between 1998 and 2017 led to the death of 1.3 million people (more than half of them – due to earthquakes). The analysis shows that human losses could be significantly less with rapid first aid. This requires the presence of a field hospital located as close as possible to the lesion. Currently, field hospitals for various purposes are produced. The heating system of the field hospital modules plays an important role in the operation. A heating system is proposed, which includes a vortex heat generator and heating devices made of polyvinyl chloride. The system is characterized by low weight and quick access to the operating mode. However, in the literature there is no method for calculating the heat exchange coefficient in a closed space, which is formed by flexible heater surface and an enclosing wall. Based on the analysis of criterion dependences and experimental data, new criterion equations for calculating the heat exchange coefficient for an arbitrary location of heaters in space are obtained. The following dependence is built  $\lg Nu = f(\lg(Gr \cdot Pr))$ , which allows to determine value of heat exchange coefficient for given range of temperature. A method of intensification of the heat exchange process by creating an artificial roughness is proposed. Graph is done to determine growth rate of heat exchange  $C_{K}$ , which is included in criterion equation. The use of artificial roughness allowed increasing the heat transfer coefficient by 28 % and the thermal power of the heating device by about 26 %.

Keywords: field hospital, heat supply system, heat transfer coefficient, criterion equation, intensification

For citation: Iokova I. L., Kalinichenko A. S. (2020) Calculation of Heat Exchange on the Surface of a Flexible Heat Exchanger for Use in Mobile Hospitals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 81–88. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-81-88

# Расчет теплообмена на поверхности гибкого теплообменника для применения в мобильных госпиталях

# И. Л. Иокова<sup>1)</sup>, А. С. Калиниченко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь), <sup>2)</sup>Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Сегодня мир характеризуется достаточно большим количеством военных конфликтов, техногенных катастроф, стихийных бедствий. Ежегодно от разного рода природных катаклизмов на планете погибает около 50 тыс. человек. В докладе Управления ООН по уменьшению опасности стихийных бедствий (ЮНИСДР) отмечается, что стихийные бедствия,

Адрес для переписки	Address for correspondence
Иокова Ирина Леонидовна	Iokova Irina L.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-92-61	Tel.: +375 17 293-92-61
pte@bntu.by	pte@bntu.by

81

которые произошли в мире за период с 1998 по 2017 г., привели к гибели 1,3 миллиона человек (свыше половины из них - из-за землетрясений). Анализ показывает, что людские потери могли бы быть значительно меньше при быстром оказании первой медицинской помощи. Это требует наличия госпиталя, расположенного как можно ближе к очагу поражения. В настоящее время создаются полевые госпитали различного назначения. Важную роль в их функционировании играет система обогрева модулей. Предложена система отопления, которая включает в себя вихревой теплогенератор и нагревательные приборы из поливинилхлорида. Система отличается малым весом и быстрым выходом в рабочий режим. Однако в литературе отсутствует методика расчета коэффициента теплоотдачи в замкнутом пространстве, образованном поверхностью гибкого нагревателя и ограждающей стеной. На основе анализа зависимостей и экспериментальных данных получены новые критериальные уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи для произвольного расположения нагревателей в пространстве. Построена зависимость  $\lg Nu = f(\lg (Gr \cdot Pr))$ , которая позволяет определить величину коэффициента теплоотдачи для заданной области температуры. Предложен способ интенсификации процесса теплообмена за счет создания искусственной шероховатости. Построен график для определения доли роста теплоотдачи Ск, входящей в критериальное уравнение. Применение искусственной шероховатости позволило увеличить коэффициент теплоотдачи на 28 %, а тепловую мощность нагревательного прибора – примерно на 26 %.

Ключевые слова: полевой госпиталь, система теплоснабжения, коэффициент теплоотдачи, критериальное уравнение, интенсификация

Для цитирования: Иокова, И. Л. Расчет теплообмена на поверхности гибкого теплообменника для применения в мобильных госпиталях / И. Л. Иокова, А. С. Калиниченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 81–88 https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-81-88

#### Introduction

82

Currently, the world is characterized by quite a large number of military conflicts, man-made disasters, natural disasters. In the XXI century, hundreds of thousands of people died as a result of these disasters, and millions of people were affected. Every year, about 50 thousand people die from various natural disasters in the world. Billions of dollars are spent on disaster relief. In Russia, losses annually reach 60 billion rubles, so only competent actions in emergency situations can save lives and reduce losses [1].

The report of the UN Office for disaster reduction (UNISDR) notes that natural disasters that occurred in the world between 1998 and 2017, led to the death of 1.3 million people (more than half of them – because of earthquakes). According to the Office data, during the same period, the financial losses of world markets due to natural disasters increased by 251 % and amounted to more than 2.9 trillion dollars. Moreover, 77 % of financial losses are attributable to weather-related events [2]. The analysis shows that human losses could be significantly less with rapid first aid. This requires a field hospital located as close to the lesion as possible. Historically, the first field hospitals were designed to provide medical care in combat.

The technology development makes it possible today to produce such mobile hospital, which will have sufficient mobility for delivering to the victims, as well as to function in the immediate vicinity of the epicenter of a natural (man-made) disaster or a war zone [3, 4]. Such hospital, in addition to mobility and good security, should have full autonomy, that is, have an independent source of energy. The heat supply of the new type of field hospital should take into account the likelihood of working in cold conditions (at air temperatures below 15 °C), as well as the possibility of urgent medical care to non-transportable victims in the open air without the construction of temporary structures. Therefore, the creation of an efficient, reliable and simple heating system is an important task.

The heating system can be used for heating not only mobile medical field hospitals, but also for heating any mobile facility. Heat supply of existing field (mobile) hospitals is most often made by means of hot air. Water as a coolant for these purposes is rarely used [5]. Installations for air heating have a sufficiently large mass and take up a lot of space during transportation. Oil-filled radiators are often used for heating and are the most popular household heaters. All oil radiators are equipped with a thermostat that automatically maintains the set temperature. They are used for heating small rooms up to 30 m<sup>2</sup> [6]. Despite a number of advantages, oil radiators consume a lot of electricity and are very slow to enter the mode. Infrared heaters are more effective, but they are more expensive and cannot be used in high humidity [7]. For field hospitals, heating elements should be low cost, easy to transport and install. Based on these requirements, they should be light, flexible enough and provide the necessary thermal performance.

#### Main part

Currently, when we talk about flexible heating elements, we mean electric heaters [8]. Despite a number of their advantages, electric heaters are difficult and unsafe to use in field hospitals. Of interest are the proposed flexible heating elements made of polyvinyl chloride, which meet Toxicological standards and can be used in medical institutions [9]. The general view of the heating device is shown in Fig. 1a. Due to the novelty of such heating elements, it is necessary to assess the heat exchange coefficient from their surface and to study the possibilities of heat exchange intensification. The coefficient of heat exchange is the most important characteristic of the heat supply system of a mobile hospital, reflecting its efficiency, since the value of this coefficient directly affects the rate of heating of the heated room (tent or pneumatic module). If the surface is heated the air heats up and moves upwards, being replaced from below by cooler air. In the flow a boundary layer is formed near the surface, the thickness of which increases in the direction of the liquid movement. In the initial zone of motion, the boundary layer is laminar and when the thickness of the boundary layer reaches a certain value, the flow regime changes which entail a change in the value of heat exchange coefficient.

When calculating the heat exchange coefficient, it was assumed that the heating of the liquid (hot carrier) to (95-100) °C is implemented by a vortex heat generator, which has a number of advantages over other sources of hot carrier heating [10, 11].

It is known that the relative amounts of heat and motion transferred to the same element of the surface of a solid body are equal to each other. The amount of heat transferred to a unit of surface per unit of time (specific heat flux), according to Newton's law will be recorded:

$$q_k = \alpha_k \Delta t, \tag{1}$$

where  $\alpha_k$  – heat transfer coefficient by convection from liquid to surface, W/(m<sup>2</sup>·K);  $\Delta t$  – temperature difference, °C.

In turn, the resistance force referred to this surface unit, i. e. the tangential stress  $\tau$  at the wall, measures the amount of motion referred to the surface unit. Full stock of heat Q (W) and amount of motion I (kg·m/s<sup>2</sup>) [12]:

$$Q = c_p \rho w F \Delta t \tag{2}$$

and

$$I = (\rho w F) w, \tag{3}$$

where w – absolute velocity of the fluid, m/s.

One can write down the condition of equality of relative quantities of heat and motion (according to Reynolds)

$$\frac{q_k}{Q} = \frac{\tau}{I}.$$

After the transformations (they are omitted), we get the equation taking into account the laminar sublayer

$$\frac{\alpha_k}{c_p \rho w} = \frac{1}{1 + \frac{w_1}{w} (\Pr-1)} \frac{\zeta}{8},\tag{4}$$

where  $w_1$  – fluid velocity at the interface of turbulent flow and laminar sublayer.

The equation (4) we have written establishes the relationship between the intensity of convective heat transfer  $\alpha_k$  and the coefficient of hydrodynamic friction resistance  $\zeta$ .

When calculating flexible heat exchangers, it is necessary to take into account that they can be located not only horizontally or vertically, but also at an arbitrary angle  $\varphi$  between the plane of the device and the normal to the horizontal line. The proposed heating device for the heating system of a mobile hospital has two heating surfaces: outer one – facing the space of the room and inner one – facing the enclosing structures. The inner surface forms channels with the enclosing planes and the heat exchange in which is significantly different from the heat exchange on the outer surface of the device (Fig. 1b). In the first approximation, the cross section of the heat transfer features on these surfaces separately.

The study of heat transfer under the condition of natural convection in a closed space and its contribution to the total thermal performance of the device is of the greatest practical and scientific interest.

In the study of heat transfer in a horizontal gage, we take the size of the slit l as the determining size, and the temperature of the air in the slit  $t_g$  as the determining temperature (Fig. 1b). It is necessary to analyze the heat exchange in a confined space to obtain a final formula that takes into account any position of the heating device, as well as determining the most likely position of the heating device. The analysis showed that for this problem (arbitrary location of the heater surface) there are no methods for estimating heat transfer in a confined space.

To increase the heat transfer from the heating device surface and reduce costs on the energy source, it is necessary to consider the method of intensification of surface heat exchange. Taking into account that the proposed heating device for the field hospital heating system is made of polyvinyl chloride, the method of applying artificial roughness to its surface is of the greatest interest. Studies in the air flow performed in [13] show that the optimal roughness provides the increase in heat transfer up to 60-80 %, and the friction resistance increases only by 10 %.



*Fig. 1.* General view of the heating device (a) and the calculation scheme (b): l – characteristic size;  $t'_h$ ,  $\overline{t}''_h$  – the temperature of the heat-emitting and heat-receiving surfaces, respectively;  $t_f$  – temperature of the free surface;  $t_g$  – temperature in the gage

For free convection the heat exchange coefficient is determined from the criterion equation of the form  $Nu = f(Gr^n Pr^m)$ , and it is an exponential function. For convenience of processing with application of methods of mathematical statistics it is more convenient to have linear dependence like y = a + bx. To proceed to the dependence of the linear form, we take logarithm of both parts of this criterion equation. After processing the experimental data on the heat exchange, it is possible to plot the dependence  $lgNu = f(lg(Gr^n \cdot Pr^m))$ .

To determine the coefficient of heat exchange from the free surface of a horizontally located heating device under natural convection, we use the criterion equation for  $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 8 \cdot 10^6$ . Since the heated free surface of the heating device is facing up, we have

$$Nu_m = 0.195 (Gr \cdot Pr)_m^{0.33}$$

To find the lgNu function for a downwardly oriented hot surface in a cold environment we apply the formula

$$Nu = 0.24 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$$

where  $4 \cdot 10^3 \leq \text{Gr} \cdot \text{Pr} \leq 3 \cdot 10^6$ .

The results of experimental data processing are shown in Fig. 2 and establish a relationship between the similarity criteria Nu, Gr, Pr. The points resulting from the processing of the experience data are practically laid on one straight line (Fig. 2). We write a mathematical equation for the line corresponding



*Fig. 2.* Graph of dependence according to experimental data for horizontal slit

to the interval of the product  $lg(Gr \cdot Pr)$  from 5.216 to 5.516, which was observed in our experiments:

$$\lg \operatorname{Nu} = a_0 + a_1 \lg (\operatorname{Gr} \cdot \operatorname{Pr}).$$
 (5)

The coefficients for unknowns were determined by the least squares method. In the final form the calculated criterion equation will be written as

$$Nu = 0.236 (Gr \cdot Pr)^{0.251}.$$
 (6)

Expression (6) makes it possible to calculate the intensity of heat exchange coefficient under conditions of natural convection in a confined space (horizontal slit). Calculations have shown that the heat exchange coefficient of the heating device in a confined space (horizontal slit) is significantly less than the heat exchange coefficient on the free surface. However, during the deployment of the field hospital, any position of the heating device is possible, not only horizontal, since there are no locking devices. Accidental location of heating devices in the heated volume when the mobile hospital is put into operation is possible due to the lack of fixing

devices. When calculating the heat exchange coefficient from an inclined surface, we can use a formula that is valid for  $10^5 < Cr < 10^9$  and  $0 < \phi < 90^\circ$  [12]:

Nu = 
$$0.48 \left( \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right) Gr_l^{0.2}$$
. (7)

Taking into account that for Pr = 0.7 the equation  $Nu_0 = 0.68 + 0.513 \times (Ra \cdot \cos \phi)^{0.25}$  [14] is valid, we receive after transformations of the equation (7) the following formula considering different positions of the heating device:

$$Nu = 0.5 \left(\frac{1 + \cos \varphi}{2}\right) (Gr \cdot Pr)^{0.25}.$$
 (8)

The results of experimental data processing are presented in Fig. 3. Since the arbitrary position of the heating device can be estimated using the probability theory, the formula (8), taking into account the different positions of the heating device, will take the final form

$$\operatorname{Nu} = 0.5 \left( \frac{1 + p_{\Phi}(\varphi)}{2} \right) (\operatorname{Gr} \cdot \operatorname{Pr})^{0.25}, \qquad (9)$$

where  $p_{\Phi}(\phi)$  – probability density.

86



*Fig. 3.* Graph of evaluation of heat transfer intensification in the presence of artificial roughness

As noted earlier, to improve the thermal performance of the proposed heating device, it is advisable to create an artificial roughness on its surface. Experiments were carried out to determine the effect of roughness on the change in the value of the heat exchange coefficient on the outer surface. Using the results of the full-scale experiments and the data of [15] for the values of  $w_f \sim (0.1-1.0)$  m/s;  $t_f \sim (30-70)$  °C and Re<sub>f</sub> = (3000-37000), a graphical dependence of  $C_K = f(\text{Re})$  is constructed (Fig. 3).

Taking into account the coefficient  $C_K$ , the previously obtained equation (9) for the soft surface of the heating device made of polyvinyl chloride could be written in the final form:

$$\operatorname{Nu}_{f_{C_{K}}} = 0.5C_{K} \left( \frac{1 + p_{\Phi}(\varphi)}{2} \right) (\operatorname{Gr} \cdot \operatorname{Pr})^{0.25}, \tag{10}$$

where  $C_K$  – share increase of heat exchange.

The resulting final criterion equation (10) allows to make the necessary calculations to assess the heat transfer from the surface of the heating device of the heat supply system, taking into account the peculiarities of the position of this device in space. In addition, this equation takes into account the presence of measures to intensify heat transfer in the system "heating device-environment".

The formation of artificial roughness on the surface of the heating device in order to intensify heat transfer increased heat exchange coefficient by 28 %. The heat output of the heater increased to 125.7 W. Calculations have shown that 8 heating devices are enough to heat the module with a volume of 84 m<sup>3</sup> at an indoor temperature of 18 °C and an outdoor temperature equal to (-24) °C.

#### CONCLUSION

Criterion dependences allowing calculating the heat exchange coefficient from the surface of the heater made of PVC at any of its spatial position are proposed. In order to intensify the heat exchange process, it is proposed to create an artificial roughness on the surface, which allowed increasing the heat exchange coefficient by 28 %, and the power of the heating device – by 25 %. The obtained dependences are of scientific and practical interest for the calculation of heat transfer processes in a closed space.

#### REFERENCES

- 1. *Statistics of Emergencies*. Available at: https://vawilon.ru/statistika-chs/. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- Report of the United Nations International Service for Disaster Reduction. Available at: https://ria.ru/20181010/1530343685.html. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- Mobile Hospital: Complex Medical Mobile (KMP). Available at: http://npopolus.ru/kompleksmedicinskij-podvizhnoj-gospital-mobilnyj/. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- 4. *Military Field Hospitals*. Available at: https://westmedgroup.ru/voennye-polevye-gospitali. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- 5. *Field Hospitals*. Available at: http://cpstent.com/catalog/5/. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- 6. Kasharov A. P. (2011) *Modern Heaters: Types, Power Calculation, Repair.* Moscow, DMK Press Publ. 152 (in Russian).
- 7. *Infrared Heaters*. Available at: http://www.belklimat.by/catalog.php?sub0=692. (Accessed 4 November 2019) (in Russian).
- 8. *Flexible Heating Elements*. Available at: https://www.directindustry.com/industrial-manufac turer/flexible-heating-element-88697.html. (Accessed 12 September 2019).
- Kachar I. L. (2011) Research of Heat Exchange of the Heating Device of Heat Supply System of the Field Hospital Functioning in the Conditions of Emergency Situations. *Energetika*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika*. *Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 60–63 (in Russian).
- 10. Nesenchuk A. P., Ryzhova T. V., Kachar I. L., Shklovchik D. I., Prokopenko S. I., Beglyak V. V. (2012) About Expediency of Use of the Vortex Heat Generator at Realization of Heat Supply of the Objects Working in the Conditions of Emergency Situations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 45–51 (in Russian).
- Iokova I. L., Tarasevich E. N. (2018) Investigation of the Possibility of Using a Vortex Generator in Heat Supply Systems for Residential, Industrial and Public Bildings. *Energetika*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika*. *Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 159–166. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-159-166 (in Russian).
- Khroustalev B. M., Nesenchuk A. P., Timoshpolsky V. I., Akeliev V. D., Sednin V. A., Kopko V. M., Nerezko A. V. (2007) *Heat and Mass Transfer. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University, 606 (in Russian).
- Achenbach E. (1977) The Effect of Surface Roughness on the Heat Transfer from a Circular Cylinder to the Cross Flow of Air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 20 (4), 359–369. https://doi.org/10.1016/0017-9310(77)90157-0.
- 14. Abdulrahim Kalendar (2011) Numerical and Experimental Studies of Natural Convective Heat Transfer from Vertical and Inclined Narrow Flat Plates and Short Cylinders. Canada, Queen's University.
- 15. Zhukauskas A. A. (1982) *Convective Transfer in Heat Exchangers*. Moscow, Nauka Publ. 472 (in Russian).

Received: 26 June 2019 Accepted: 2 September 2019 Published online: 31 January 2020

#### 88

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98

УДК 621.039.548:620.193

# Влияние коррозии конструкционных материалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР

# В. В. Кравченко<sup>1)</sup>, С. Д. Цыганкова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020 Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. В статье рассмотрены общее понятие коррозии в соответствии с ГОСТ 5272-68 «Коррозия металлов», классификация коррозионного процесса, стадии коррозии в виде функций энергии от пути протекания коррозионного процесса, основные показатели процесса коррозии. В соответствии с прогнозами Международного валютного фонда и Focus Economics произведена оценка количества средств, которые будут затрачены на борьбу с коррозией и ее последствиями в отдельных промышленно развитых странах. Динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации за 2016-2019 гг., показана в виде диаграммы. Обосновано использование циркония в качестве конструкционного материала для оболочки твэлов. Представлены значения сечений поглощения тепловых нейтронов для различных элементов, служащих в качестве конструкционных для активной зоны ядерного реактора. Приведены факторы, влияющие на выбор легирующих элементов и их процентное содержание в различных сплавах (Zr-2, Zr-4, ZIRLOTM, M5®), которые являются специальной разработкой, способствующей снижению скорости коррозии. Рассмотрен состав и механические свойства сплавов Э110 и Э635, использованных в качестве материалов для оболочки твэлов в активной зоне реакторов ВВЭР-1200 на БелАЭС. Проанализировано поведение циркониевых сплавов Э110 и Э635 в активной зоне. Выделены основные факторы, которые существенно влияют на коррозионный процесс в реальных условиях эксплуатации циркониевых сплавов в качестве оболочек твэлов. Приведены существующие методы предварительной специальной обработки оболочек твэлов, хранящихся на воздухе в течение продолжительного промежутка времени до поступления их на сборку. Показана структура оксида на оболочках из сплавов Э110 и Э635, окисленных в автоклаве.

Ключевые слова: коррозионный процесс, оболочка твэлов, легирование циркония, коррозия циркониевых сплавов, сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия, «солнечная корона»

Для цитирования: Кравченко, В. В. Влияние коррозии конструкционных материалов твэлов на радиационную безопасность энергоблоков АЭС с ВВЭР / В. В. Кравченко, С. Д. Цыганкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 89–98. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98

Адрес для переписки	Address for correspondence
Кравченко Владимир Владимирович	Kravchenko Vladimir V.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-91-45	Tel.: +375 17 293-91-45
tes_bntu.@tut.by	tes_bntu.@tut.by

89

# Effect of Corrosion of the Fuel Rod Construction Materials on the Radiation Safety of Nuclear Power Plants with PWR

## V. V. Kravchenko<sup>1)</sup>, S. D. Tsygankova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the general concept of corrosion in accordance with GOST 5272-68 "Metal Corrosion", the classification of the corrosion process, the stages of corrosion as energy function of the flow path of the corrosion process, the main indicators of the corrosion process. According to the forecasts of the International Monetary Fund and Focus Economics, the amount of funds that will be spent on counteracting corrosion and its consequences in selected industrialized countries has been estimated. The growth of funds invested in the counteracting the effects of metal corrosion in the Russian Federation for 2016-2019 is presented in the form of a diagram. The substantiation of the use of zirconium as a structural material for the shell of fuel rods has been fulfilled. The values of the thermal neutron absorption cross sections for various elements serving as structural elements for the core of a nuclear reactor are presented. Factors influencing the choice of alloying elements and their percentage in various alloys (Zr-2, Zr-4, ZIRLO<sup>TM</sup>, M5<sup>®</sup>), which are the special development that reduce the corrosion rate, are also considered. The composition and mechanical properties of E110 and E635 alloys, which were used as materials for the fuel rods shell in the core of WWER-1200 reactors at the Belarusian NPP. are considered as well. The behavior of zirconium alloys E110 and E635 in the core is analyzed. The main factors that make a significant contribution to the corrosion process in actual operating conditions of zirconium alloys as fuel rods shell have been identified. The existing methods of preliminary special processing of fuel rods shells stored in the air for a long time before their receipt for assembly are presented. The structure of the oxide on the shells of alloys E110 and E635 oxidized in an autoclave is demonstrated.

**Keywords:** corrosion process, fuel rod shell, zirconium alloying, corrosion of zirconium alloys, penetrating corrosion, spot corrosion, pitting corrosion, fretting corrosion, "solar corona"

For citation: Kravchenko V. V., Tsygankova S. D. (2020) Effect of Corrosion of the Fuel Rod Construction Materials on the Radiation Safety of Nuclear Power Plants with PWR. *Energetika*. *Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (1), 89–98. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-89-98 (in Russian)

#### Введение

В современном мире в различных областях производства все чаще используют полимерные материалы в качестве конструкционных (пластические массы, резины и др.), но доминирующую позицию по-прежнему занимают металлы и их композиты [1].

Согласно [2], из всего многообразия металлов Периодической системы Менделеева только пять являются термодинамически устойчивыми: золото (Au), серебро (Ag), платина (Pt), иридий (Ir) и палладий (Pd). Они представлены в природе в неокисленном состоянии, а все остальные металлы и их сплавы при взаимодействиии со средой (жидкость, газ) подвергаются разрушению, которое визуально проявляется на поверхности металла в виде ржавчины и в дальнейшем приводит к преждевременному выводу оборудования из эксплуатации. Коррозия металла является одной из важнейших проблем производства, так как наносит колоссальный ущерб экономике любой промышленно развитой страны. В соответствии с последними данными Международной ассоциации инженеров-коррозионистов (NACE), средние затраты на решение проблемы коррозии ежегодно составляют 4–6 % ВВП. По прогнозным данным Международного валютного фонда и Focus Economics [3], в 2019 г. на борьбу с коррозией и ее последствиями будет затрачено: в США – примерно 860,249 млрд дол., во Франции – 117,363 млрд дол., в Японии – 209,249 млрд дол., а в Российской Федерации – 70,171 млрд дол.

На рис. 1 представлена динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации за 2016–2019 гг.



*Рис. 1.* Динамика роста средств, вложенных в борьбу с последствиями коррозии металлов в Российской Федерации *Fig. 1.* Dynamics of growth of funds invested in the counteracting the effects

of corrosion of metals in the Russian Federation

Общие потери от коррозии принято разделять на прямые и косвенные. Прямые – потери металла, связанные с его превращением в ржавчину. Косвенные связывают с отказом в работе металлического оборудования, его простоем, ремонтом и т. д. Прямые потери составляют ~1 %, косвенные – 25 % от всего объема ежегодно производимого металла [4].

Ежегодно материальный ущерб от коррозии металла оборудования возрастает. Уже сегодня многие страны столкнулись с проблемой превышения темпов роста потерь от коррозии над темпами роста металлофонда.

Проблема защиты конструкционных материалов от коррозии является актуальной и для Республики Беларусь в связи с вводом в эксплуатацию первого энергоблока Белорусской АЭС в 2020 г. [5]. Стоит отметить, что интерес к данному вопросу будет ежегодно возрастать с увеличением времени наработки и необходимостью обоснования продления ресурса работы уже действующих энергоблоков. От решения данной проблемы в значительной степени будет зависеть безопасность и надежность эксплуатации БелАЭС.

#### Основная часть

Развитие ядерной энергетики поставило задачу разработки специальных конструкционных материалов. Специфика требований, предъявляемых к ним, заключается в том, что они должны поглощать как можно меньше нейтронов. В табл. 1 представлены значения сечений поглощения тепловых нейтронов для различных элементов, служащих в качестве конструкционных для активной зоны ядерного реактора.

Таблица 1

## Сечения поглощения тепловых нейтронов для реакторных конструкционных материалов [6]

Элемент	Сечение поглощения, барн	Температура плавления, °С
Be	0,010	1280
Mg	0,063	651
Zr	0,180	1845
Al	0,230	660
Ni	1,100	2415
Fe	2,530	1539
Мо	2,500	2625
Cu	3,690	1083
Ni	4,600	1455
Tl	5,800	1725

#### для реакторных конструкционных материалов [6] Thermal neutron absorption cross sections for reactor structural materials [6]

Из табл. 1 видно, что наиболее полно этому требованию отвечают следующие элементы: бериллий, магний, алюминий и цирконий. Наиболее удачным сочетанием ядерных и физических свойств из этих четырех металлов обладает цирконий, являющийся сегодня основным конструкционным материалом для оболочки твэлов.

Стремление к повышению механических свойств циркония привело к необходимости разработки его композитов. При этом выбор легирующих элементов и их процентное содержание определяется рядом факторов таких как:

1) незаметное увеличение значения сечения поглощения тепловых нейтронов;

2) отсутствие в сплаве элементов, которые после облучения дают долгоживущие дочерние нуклиды;

 стабилизация коррозионной стойкости сплава и понижение склонности композита к поглощению водорода;

4) повышение механических свойств композита;

5) сохранение технологических свойств чистого циркония.

В качестве легирующего элемента для оболочки твэлов легководных реакторов используют ниобий. С точки зрения экономии тепловых нейтронов, ниобий является наиболее перспективным легирующим элементом, который повышает не только прочностные характеристики композитов, но и их коррозионную стойкость в теплоносителе. Установлено, что процентное содержание ниобия, которое нужно вводить в сплав для повышения коррозионной стойкости, зависит от температуры [6]. За рубежом в качестве легирующего элемента для оболочки твэлов используют олово. Сегодня эти сплавы известны как циркалои: Zr-2, Zr-4. Специальной разработкой, способствующей снижению скорости коррозии, также являются ZIRLO<sup>TM</sup> и M5<sup>®</sup>.

Для БелАЭС в качестве конструкционных материалов твэлов использованы циркониевые сплавы Э110 (отожжен при температуре 580 °С) и Э635. В табл. 2, 3 представлен состав вышеуказанных сплавов [7], а в табл. 4 – их механические свойства.

Состав сплава Э635 (% от веса) [10]

Таблица 2

The composition of the alloy E635 (% by weight) [10]										
Элемент	Nb	Sn	Fe	О	Si	Zr				
min, %	0,90	1,10	0,30	0,05	0,0050	-				
max, %	1,10	1,40	0,47	0,12	0,0200	Остальное				

Таблица 3

Состав сплава Э110 (% от веса) [10] The composition of the alloy E110 (% by weight) [10

Элемент	Nb	Zr
min, %	0,90	_
max, %	1,10	Остальное

Таблица 4

Mexанические свойства сплавов [10] Mechanical properties of alloys [10]

Сплав	$\sigma_{\scriptscriptstyle B}$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
Э110	370	340	32
Э635	650	580	21

Коррозионные процессы в активной зоне ядерного реактора неизбежны со стороны как топлива, так и теплоносителя. Ключевыми вопросами данного процесса являются скорость его протекания и глубина поражения. При повышенных температурах в условиях интенсивного внешнего облучения любой теплоноситель вне зависимости от типа ядерного реактора (вода, жидкий металл и др.) при контакте с твэлами, каналами для циркуляции теплоносителя, системами трубопроводов и корпусами реакторов является в той или иной степени агрессивным. В реальных условиях эксплуатации циркониевых сплавов в качестве оболочек твэлов появляются дополнительные факторы, которые вносят существенный вклад в коррозионный процесс. К ним относятся: специфический химический состав и агрегатное состояние теплоносителя в реакторах, тепловые нагрузки твэлов, нейтронное облучение, отложения продуктов коррозии контура на поверхности оболочки, вибрация твэлов. На коррозию циркония также влияют компоненты теплоносителя, вводимые для регулирования водно-химического режима, и химические элементы и соединения, образующиеся в теплоносителе в результате протекания химических процессов и радиолиза.

Большое влияние на коррозию циркониевых сплавов оказывает наличие урана в теплоносителе. При этом наиболее подвержены коррозионному процессу в присутствии урана травленые поверхности. Борная кислота, которая дозируется в теплоноситель реактора ВВЭР-1200, не сильно влияет на коррозию циркониевых сплавов. На скорость коррозионного процесса (в частности, на асимметричный профиль оксидной пленки) заметное влияние оказывает распределение нейтронного потока в активной зоне реактора, что сказывается уже при плотности нейтронного потока около  $10^{14}$  нейтр./(см<sup>2</sup> · с) (E > 1 МэВ). Присутствие кислорода при облучении вызывает усиление коррозии циркониевых сплавов, которое становится заметным при содержании кислорода в воде ~1 млн<sup>-1</sup> и флюенсе нейтронов 2·10<sup>22</sup> нейтр./см<sup>2</sup>. Добавление водорода к воде под давлением подавляет образование радиолитического кислорода, в результате чего скорость коррозии сплавов при облучении не увеличивается или увеличивается незначительно. Важным фактором, оказывающим большое влияние на коррозию циркониевых сплавов Э110 и Э635, является наличие фазового превращения в цирконии (при температуре 862 °C). Поэтому для этих циркониевых сплавов характерно весьма существенное влияние структурного состояния металла на коррозионные и механические свойства изделий. Стоит отметить, что на коррозионное поведение циркониевых сплавов также влияет длительное хранение на воздухе оболочек твэлов (или готовых твэлов) без предварительной специальной обработки. Поэтому оболочки перед поступлением их на сборку твэлов подвергают химическому травлению в смеси азотной и плавиковой кислот и промывке, а готовые твэлы – автоклавированию в дистиллированной воде при температуре 300 °С в течение 72 ч.

Итогом взаимодействия циркониевого сплава и теплоносителя (воды) при высоких температурах является окисление и наводороживание. Процесс окисления циркониевых сплавов в воде и паре достаточно сложен. Кинетика реакции окисления описывается наличием двух периодов. Первый характеризуется образованием плотно прилегающей защитной нестехиометрической окисной пленки двуокиси циркония, окрашенной в цвета побежалости, переходящими в черный цвет. В этом случае процесс коррозии носит электрохимический характер. С ростом толщины пленки процесс замедляется и со временем стабилизируется. Образование оксидной пленки не зависит от положения тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне, выгорания или года эксплуатации [8]. Одновременно с образованием окисной пленки происходит ее растворение и насыщение металла кислородом. Атомы кислорода размещаются в октаэдрических пустотах  $K_{\nu}r_1 = 0,66$  Å. На каждый атом циркония в гексагональной плотноупакованной кристаллической решетке приходится одна октаэдрическая пустота. Следующие порции кислорода размещаются в тетраэдрических пустотах  $r_1 = 0.36$  Å [9].

Через некоторое время наступает второй период, характеризующийся резким повышением скорости коррозии. При этом оболочка покрывается белым, светло-серым, рыхлым, легко осыпающимся окислом. На сплавах циркония образование белой осыпающейся двуокиси циркония наблюдается при достижении привеса 30–50 мг/дм<sup>2</sup> [10]. В соответствии с [11], оксидная пленка приобретает белый цвет поверхности начиная с толщины ~(7–8) мкм. Стоит отметить, что белая пленка образуется поверх черной и по причине того, что она слабо связана с подложкой, переходит в теплоноситель.

Металлографические исследования показали, что максимальная толщина образовавшегося оксида по длине твэла не изменяется, но с увеличением высотной координаты нарастает процесс расслоения оксидной пленки. При этом степень отслоения оксида с поверхности разных твэлов различна. Одной из возможных причин разного отслоения оксида может быть отличие в вибрации твэлов в потоке теплоносителя вследствие различной жесткости их закрепления в ячейках дистанционирующих решеток.

Установившийся процесс коррозии на первом и втором этапах описывается следующим уравнением [12]:

$$\Delta m = kt^n,\tag{1}$$

в логарифмических координатах [12]

$$\lg \Delta m = kn \lg t, \tag{2}$$

где  $\Delta m$  – привес за счет образования окисной пленки за время t со скоростью окисления n.

Значение коэффициента k соответствует толщине оксидной пленки. Для сплава Zr с 1 % Nb при испытании в воде температурой 350 °C коэффициент k составляет 0,2. Стоит отметить, что с повышением температуры значение k только увеличивается. После образования минимально необходимой толщины пленки процесс стабилизируется.

Для циркониевых сплавов Э110 и Э635 характерна как местная, так и общая (равномерная) коррозия, влияние которой по сравнению с локальной незначительно. Более высокий уровень равномерной коррозии характерен для оболочек из сплава Э635 по причине многокомпонентности состава.

Циркониевые оболочки твэлов подвержены следующим видам местной коррозии: сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия. Циркониевые сплавы не склонны к щелевой межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением.

Образование рыхлой окисной пленки на втором этапе окисления оболочки приводит к быстрой сквозной коррозии и, как следствие, к разрушению оболочки твэла и загрязнению теплоносителя реактора продуктами окисления с последующей их активацией.

Наряду с возникновением сквозной коррозии на оболочке твэлов возникает также коррозия пятнами, что связано с местными напряжениями

при механическом взаимодействии с топливом. Диаметр пятен 0,2–0,5 мкм, толщина 10–100 мкм и более. Коррозия пятнами приводит к нарушению целостности окисной пленки, ослаблению ее защитных свойств, различного рода технологическим дефектам, превышению допустимого теплового потока через поверхность оболочки.

96

В результате объемного увеличения оксида циркония, радиолиза теплоносителя и радиационного повреждения материала оболочки возникает питтинговая (точечная) коррозия. Центрами образования питтингов служат присутствующие в металле интерметаллиды. Точечная коррозия усиливается в местах контакта твэлов с дистанционирующими решетками.

При эксплуатации топливных сборок могут происходить некоторые деформационные процессы в местах крепления, прежде всего в дистанционирующих решетках. Под воздействием потока теплоносителя происходит вибрация твэлов, в результате чего реализуется фреттинг-коррозия. Частота колебаний должна быть такой, чтобы за период вибрации окисная пленка не могла достичь сколько-нибудь заметной толщины: разрушить адсорбционный слой или монослой окисла легче, чем фазовую окисную пленку. За такую толщину принимают  $10^{-7}$  см (толщину двух монослоев окисла). В соответствии с [12] наиболее опасными, с точки зрения коррозии, при трении являются частоты 10 Гц и более.

Опыт эксплуатации водо-водяных энергетических реакторов показал, что водород, который накапливается в циркониевых элементах конструкции при эксплуатации энергоблока, по достижении предельной (критической) концентрации является одним из основных критериев предельного состояния твэлов реактора. Опасность усугубляется и тем, что присутствие водорода может пагубно отразиться на состоянии циркониевых комплектующих ТВС при длительном хранении отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и обращении с ним.

Степень негативного влияния водорода на свойства циркониевых сплавов определяется его количеством и распределением, равномерностью и ориентацией выделившихся гидридов, состоянием оксидной пленки.

К основным деградирующим явлениям с участием водорода относятся: водородное охрупчивание (резкое уменьшение пластичности при гидрировании), образование крупных массивных гидридов (дефект типа «солнечная корона»), гидридное растрескивание (обусловлено одновременным воздействием напряжения и водорода на оболочку твэла – "Split effect").

Стоит отметить, что точный механизм водородного охрупчивания сегодня неизвестен. Одним из объяснений служит рекомбинация атомарного водорода в молекулярный на дислокациях и нанопорах с сопровождающим этот процесс резким возрастанием давления и последующим зарождением трещин в металле. Так на твэле № 79 (TBCAPLUS № ЖД02585), извлеченном из реактора ВВЭР-1000, наблюдался разрыв на участке, расположенном в пролете между ДР12 и ДР13. Оболочка на участке, прилегающем к месту разрушения, была сильно наводорожена и охрупчена.

#### выводы

1. Коррозионные процессы в активной зоне ядерного реактора неизбежны со стороны как топлива, так и теплоносителя.

2. Легирование циркония с целью повышения его механических свойств производится с учетом ряда факторов, таких как: незаметное увеличение значения сечения поглощения тепловых нейтронов; отсутствие в композите элементов, которые после облучения дают долгоживущие дочерние нуклиды; стабилизация коррозионной стойкости сплава и понижение склонности композита к поглощению водорода; повышение механических свойств сплава; сохранение технологических свойств чистого циркония.

3. С точки зрения экономии тепловых нейтронов, наиболее перспективным легирующим элементом является ниобий, который повышает не только прочностные характеристики композитов, но и их коррозионную стойкость.

4. Итогом взаимодействия циркониевого сплава и теплоносителя (вода) при высоких температурах является окисление и наводороживание.

5. Для циркониевых сплавов Э110 и Э635 характерна как местная, так и общая (равномерная) коррозия. При этом влияние последней менее значительно.

6. Более высокий уровень равномерной коррозии характерен для оболочек из сплава Э635.

7. Для циркониевых оболочек твэлов характерны следующие виды местной коррозии: сквозная коррозия, коррозия пятнами, питтинговая коррозия, фреттинг-коррозия.

8. Для обеспечения радиационной безопасности энергоблоков и снижения негативных последствий разгерметизации твэлов необходимо проводить контроль герметичности оболочек твэлов во время работы реактора.

9. На сегодняшний день разработано большое количество сплавов для оболочек твэлов: Э110, Э635, Zr-2, Zr-4, ZIRLO<sup>TM</sup>, M5®. Однако каждый из них в той или иной мере подвержен коррозии, что требует дальнейших исследований в этом направлении и разработки новых альтернативных сплавов с целью снижения скорости коррозии и, как следствие, обеспечения надежности и безопасности эксплуатации до высоких выгораний топлива, увеличения их компании в реакторе.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Новые технологии восстановления и защиты энергетического оборудования композитными материалами / А. А. Ищенко [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 159–166. https://doi.org/10. 21122/1029-7448-2017-60-2-159-166.
- 2. Чиж, В. А. Водоподготовка и водно-химические режимы электростанций / В. А. Чиж, Н. Б. Карницкий. Минск: БНТУ, 2004. 99 с.
- Рейтинг экономик мира 2019, таблица ВВП стран мира [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://basetop.ru/rejting-ekonomik-mira-2019-tablitsa-vvp-stran-mira/. Дата доступа: 21.02.2019.
- Минск подтверждает сроки ввода в эксплуатацию БелАЭС [Электронный ресурс] // Интерфакс. Режим доступа: https://www.interfax.by/news/belarus/1241924. Дата доступа: 10.03.2019.
- 5. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. 2-е изд., стер. М.: Альянс, 2006. 472 с.

- Шлугер, М. А. Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. М.: Металлургия, 1981. 216 с.
- Парфёнов, Б. Г. Коррозия циркония и его сплавов / Б. Г. Парфёнов, В. В. Герасимов, Г. И. Венедиктова. М.: Атомиздат, 1967. 257 с.
- Лустман, Б. Металлургия циркония: пер. с англ. / Б. Лустман. М.: Изд-во иностр. лит. 1959. 160 с.
- 9. Ivanov O. S. Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of the United Nations / O. S. Ivanov. 1958. Vol. 5, Geneva, (Paper No 2046).
- Чепецкий металлический завод [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.chmz. net/product/zr/slitki/. Дата доступа: 10.03.2019.
- 11. Результаты исследования структуры оксидной пленки на участках повышенного окисления оболочек твэлов ТВС-2М, отработавшей на 4-м энергоблоке Балаковской АЭС в течение одной топливной компании / И. Н. Волкова [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23–24 мая 2018 г. / АО «Концерн Росэнергоатом». М., 2018. С. 35–39.
- 12. Герасимов, В. В. Коррозия реакторных материалов / В. В. Герасимов. М.: Атомиздат, 1980. 256 с.

Поступила 17.05.2019 Подписана в печать 12.09.2019 Опубликована онлайн 31.01.2020

REFERENCES

- Ischenko A. O., Kravchenko V. M., Dashko O. V., Kakareka D. V. (2017) New Technologies for Restoration and Protection of Power Equipment with the Aid of Composite Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 159–166. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-159-166 (in Russian).
- 2. Chizh V. A., Karnitskii N. B. (2004) *Water Treatment and Water-Chemical Regimes of Power Plants.* Minsk, Belarusian National Technical University, 99 (in Russian).
- 3. Rating of World Economies in 2019, the Table of GDP of Countries of the World. Available at: https://basetop.ru/rejting-ekonomik-mira-2019-tablitsa-vvp-stran-mira/. (Accessed 21 February 2019) (in Russian).
- 4. Minsk Confirms the Commissioning Date of BelAES (2018) *Interfax*. Available at: https://www.interfax.by/news/belarus/1241924. (Accessed 3 October 2019) (in Russian).
- 5. Zhuk N. P. (2006) *The Course of the Theory of Corrosion and Protection of Metals: a Manual for Metallurgical Specialties of Universities*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Alliance Publ. 472 (in Russian).
- Shluger M. A., Azhogin F. F., Efimov E. A. (1981) Corrosion and Protection of Metals. Moscow, Metallurgiya Publ. 216 (in Russian).
- 7. Parfenov B. G., Gerasimov V. V., Venediktova G. I. (1967) *Corrosion of Zirconium and its Alloys*. Moscow, Atomizdat Publ. 257 (in Russian).
- 8. Lustman B., Kerze F. (1955) The Metallurgy of Zirconium. 4<sup>-t</sup> ed. New York, McGraw-Hill? 776.
- 9. Ivanov O. S. (1958) Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of the United Nations. 5, Geneva (Paper No 2046) (in Russian).
- Chepetsky Metal Plant. Available at: http://www.chmz.net/product/zr/slitki/. (Accessed 3 October 2019) (in Russian).
- 11. Volkova I. N., Goryachev A. V., Zvir E. A., Zhitelev V. A., Nikitin O. N., Strozhuk A. V. (2018) The Results of the Study of the Structure of the Oxide Film in the Areas of Increased Oxidation of the Fuel Cell Cladding of the TVS-2M Fuel Rods, which Was Used at the 4<sup>th</sup> Power Unit of Balakovo NPP During One Fuel Campaign. *Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoi Energetiki: Materialy 11<sup>-i</sup> Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Moskva, 23–24 Maya 2018 g.* [11 International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Atomic Energy" Plenary and Sectional Reports, Moscow, May 23–24), 35–39 (in Russian).
- 12. Gerasimov V. V. (1980) *Corrosion of Reactor Materials*. Moscow, Atomizdat Publ. 256 (in Russian).

Received: 17 May 2019 Accepted: 12 September 2019 Published online: 31 January 2020