

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 62, № 2
2019

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

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

Марончук И. И., Санникович Д. Д., Мирончук В. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития	105
Петруша Ю. С., Попкова Н. А. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь	124
Зализный Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink	135

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating (Бельский А. А., Моренов В. А., Купавых К. С., Сандыга М. С. Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки)	146
Жураховский А. В., Бахор З. М., Яцейко А. Я., Гапанович В. Г. Формирование стратегии повышения эффективности работы распределительных электрических сетей на предпроектной стадии	155
Менжинский А. Б., Малашин А. Н., Суходолов Ю. В. Экспериментальная проверка адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора с электромагнитным возбуждением	168

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Нияковский А. М., Романюк В. Н., Яцкевич Ю. В., Чичко А. Н. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов	177
Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. Compare of Transient Quality in Automatic Control Systems with Classic PID Algorithm and Optimal Regulator (Кулаков Г. Т., Артёменко К. И. Сравнение качества переходных процессов систем автоматического управления с классическим ПИД-алгоритмом и оптимальным регулятором)	192

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

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

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

Подписано к печати 29.03.2019. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,25. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2019. Заказ .

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 62, No 2
2019

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

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

GENERAL PROBLEMS of POWER ENGINEERING

Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. Solar Cells: Current State and Development Prospects	105
Petrusha U. S., Papkova N. A. The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus.	124
Zalizny D. I. Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPower-Systems Library	135

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating	146
Zhurakhivskiy A. V., Bakhor Z. M., Yatseiko A. Ya., Hapanovych V. H. Formation of a Strategy for Increasing the Efficiency of Operation of Distribution Electrical Grids at the Stage of Pre-Design Works	155
Menzhinski A. B., Malashin A. N., Suhodolov Yu. V. Experimental Verification of the Adequacy of Mathematical Model of the Reciprocating Electric Electromagnetically Excited Generator.	168

HEAT POWER ENGINEERING

Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes.	177
Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. Compare of Transient Quality in Automatic Control Systems with Classic PID Algorithm and Optimal Regulator	192

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 29.03.2019. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,25.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2019. 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, 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>

УДК 620.97

Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития

И. И. Марончук¹⁾, Д. Д. Санникович²⁾, В. И. МIRONЧУК³⁾

¹⁾ООО «Генезис-Таврида» (Севастополь, Российская Федерация),

²⁾Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация),

³⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Проанализированы основные тенденции развития мирового рынка солнечной фотоэнергетики за последние несколько лет. Показано, что она является одной из самых быстроразвивающихся среди отраслей возобновляемой энергетики и современной промышленности в целом. Очевидно, что себестоимость производимой солнечной энергии стремительно приближается к цене за электроэнергию, генерируемую традиционными методами на АЭС и ТЭС. Отмечены аспекты развития эффективности современных исследовательских солнечных элементов, изготовленных из различных материалов, использующих инновационные технологические решения на основе данных, предоставленных Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) в 2017 г. Для удобства анализа исследовательские солнечные элементы разделены на четыре технологические группы. Рассмотрены преимущества и недостатки солнечных элементов в отдельности по каждой взятой группе, включая особенности их производства и перспективы развития, оценена максимальная эффективность за 2017 г. Возможной альтернативой перспективного развития современных высокоэффективных однопереходных солнечных элементов является использование принципиально новых материалов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками. Продемонстрированы возможности поглощения (переработки) такими структурами как коротковолнового излучения, так и длинноволновой части спектра солнечного излучения с целью выработки электрической энергии при увеличении эффективности солнечных элементов на их основе. Рассмотрены оптимальные материалы для их изготовления и принципы действия на их основе высокоэффективных солнечных элементов. Обоснована перспективность изготовления наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки.

Ключевые слова: солнечная фотоэнергетика, элемент, модуль, эффективность, концентрированное излучение, технологическая группа, концентратор, структура, жидкофазная эпитаксия

Для цитирования: Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. МIRONЧУК // *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>

Адрес для переписки

МIRONЧУК Виктор Иванович
Белорусский государственный
аграрный технический университет
просп. Независимости, 99,
220023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-37-01
viktor.mhtc@gmail.com

Address for correspondence

MIRONCHUK Viktor I.
Belarusian State
Agrarian Technical University
99 Nezavisimosty Ave.,
220023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-37-01
viktor.mhtc@gmail.com

Solar Cells: Current State and Development Prospects

I. I. Maronchuk¹⁾, D. D. Sanikovich²⁾, V. I. Mironchuk³⁾

¹⁾“Genesis-Tavrida” LLC (Sevastopol, Russian Federation),

²⁾Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation),

³⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers the main trends in the development of the world market of solar photovoltaics over the past few years. It is shown that the industry is a very rapidly evolving one among the branches of renewable energy and modern industries as a whole. It is obvious that the prime cost of the of solar energy being produced is rapidly approaching the price of electricity generated by traditional methods at nuclear power plants and thermal power plants. The aspects of the development of the efficiency of modern research solar cells made of various materials using innovative technological solutions based on the data provided by the National Laboratory for Renewable Energy (NREL, USA) in 2017 are noted. For the convenience of analysis, the research solar cells are divided into four technological groups. The advantages and disadvantages of solar cells, including the specific features of their production and prospects for development are considered separately for each group; the maximum efficiency for the year 2017 is estimated. A possible alternative to the future development of modern high-performance single-transition solar cells is the use of fundamentally new materials based on nanoheteroepitaxial structures with quantum dots. The possibilities of absorption (processing) by such structures of both short-wave radiation and long-wave part of the solar radiation spectrum for the purpose of generation of electric energy by increasing the efficiency of solar cells on their basis have been demonstrated. The optimal materials for their production and the principles of action of high-performance solar cells on their basis have been considered. The prospects of manufacturing nanoheteroepitaxial structures with quantum dots by liquid-phase epitaxy with pulse cooling of the substrate have been substantiated.

Keywords: solar photovoltaics, element, module, efficiency, concentrated radiation, technological group, concentrator, structure, liquid-phase epitaxy

For citation: Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian)

Введение

Мировой рынок солнечной фотоэнергетики (ФЭ) растет с 2005 г. в среднем на 40 % в год. Это гораздо больше, чем для любой другой отрасли промышленности [1]. Ожидается, что в ближайшие 20 лет солнечная ФЭ создаст более 2 млн рабочих мест, сократит выбросы парниковых газов в атмосферу на 350 млн т CO₂, что эквивалентно остановке 140 угольных электростанций. Общая мощность солнечной ФЭ до 2030 г. превысит 650 ГВт [2, 3].

Седьмой год подряд в мировой рынок солнечной ФЭ инвестируется средств больше, чем в другие отрасли возобновляемой энергетики. В 2016 г. инвестиции составили 57 % от общего объема и равнялись 113,7 млрд дол. США. Несмотря на ежегодное снижение общих глобальных инвестиций в солнечную энергетику, например на 34 % по сравнению с 2015-м, вновь установленная мощность солнечной фотоэлектрической энергии увеличилась на 38 % и превысила в 2016 г. 80 ГВт.

Зарегистрированные данные о производстве солнечных элементов (СЭ) для солнечных станций в 2016 г. варьируются между 79 и 84 ГВт, а оценки на 2017 г. сводятся к диапазону от 90 до 95 ГВт. Значительная неопределенность в этих данных обусловлена высококонкурентной рыночной средой, а также тем фактом, что некоторые компании сообщают данные о производстве, в то время как другие – о продажах, а третьи – о перевозках. В 2018 г. мировой рыночный прогноз по производству СЭ варьируется от 58 ГВт по низкому сценарию Solar Power Europe до 106 ГВт в обзоре Глобального PV-рынка BNEF [3]. Диаграммы, описывающие мировое производство солнечных фотоэлементов в диапазоне развития с 2005 по 2017 г., представлены на рис. 1.

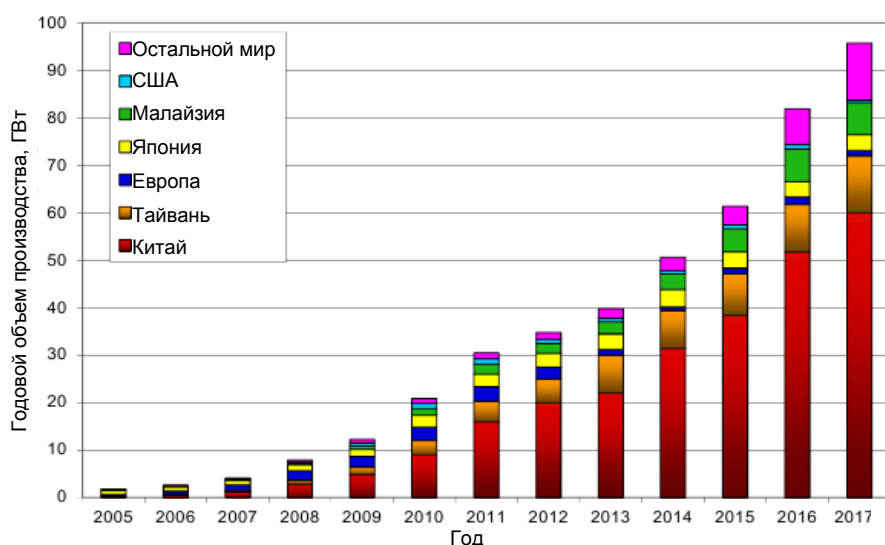


Рис. 1. Мировое производство солнечных элементов/модулей с 2005 по 2017 г. [3]

Fig. 1. World production of solar cells/modules from 2005 to 2017 [3]

Установленная мощность мировой солнечной ФЭ в 2016 г. составила 315 ГВт, и, согласно прогнозам рынка, она может удвоиться к 2019-му. В конце 2017 г. установленная мощность мировой солнечной ФЭ превысила 400 ГВт и перекрыла примерно 2 % мирового спроса на электроэнергию.

Более 90 % ныне действующих мировых производств современных солнечных фотоэлектрических панелей используют технологию кристаллического кремния на основе пластин.

Проектные мощности по производству кремния на 2017 г. варьируются от 450000 до 508000 т. Из них примерно 30000 т используется электронной промышленностью [4, 5]. В настоящий момент средние затраты такого материала, как кремний, при производстве СЭ составляют около 4,7 г/Вт [3].

Несмотря на бурное развитие солнечной ФЭ, себестоимость производства электроэнергии на солнечных электростанциях остается одной из

высоких среди альтернативных способов генерации. Однако в последние несколько лет отмечается снижение себестоимости электроэнергии, производимой солнечными фотоэлектрическими преобразователями энергии (ФЭП). Так, за 2008–2017 гг. средняя стоимость солнечной энергии снизилась с 0,210 до 0,086 дол./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$) при средней стоимости электроэнергии, получаемой ТЭС и АЭС, порядка 0,050 дол./($\text{kBt}\cdot\text{ч}$) [3]. Это на 15 % меньше по сравнению с 2016-м, причем стоимость солнечных модулей в солнечных ФЭ станциях уменьшилась по сравнению с 2016 г. на 40 %.

Тенденции к снижению стоимости солнечной энергии предвидятся и в дальнейшем. Уже в 2016 г. на мировом рынке солнечной ФЭ заключали ряд контрактов на покупку электроэнергии, цены на которую опустились ниже 30,0 дол./($\text{MBt}\cdot\text{ч}$), а самый низкий уровень закупки составил 24,2 дол./($\text{MBt}\cdot\text{ч}$) (тендер на электроэнергию для водного хозяйства Абу-Даби в сентябре 2016 г.). Такой уровень цен, особенно в Объединенных Арабских Эмиратах и Чили, возможно, обусловлен сочетанием превосходного солнечного ресурса в этих странах с высокими ставками долговых обязательств и очень низкими долговыми издержками, а также тем фактом, что некоторые тарифы индексируются под инфляцию [3].

Современные технологии производства солнечных батарей хорошо зарекомендовали себя и обеспечивают надежный продукт с гарантированным выходом энергии в течение как минимум 25–30 лет. Надежность, растущий спрос на электроэнергию в странах с развивающейся экономикой, возможность снятия нагрузки при перегрузках сети, а также рост цен на электроэнергию, генерируемую традиционными источниками энергии, добавляют привлекательность в развитие рынка солнечной ФЭ.

Проблема развития солнечной энергетики носит глобальный характер и является весьма актуальной задачей для изучения. Исходя из вышесказанного, очевидно, что любые технологические решения, способные понизить стоимость солнечной энергии, приблизив ее и сделав более дешевой, чем энергия, генерируемая классическими методами, весьма актуальны. Поэтому, на наш взгляд, крайне необходимы отслеживание и контроль за даже незначительными изменениями в области технологического прогресса на рынке солнечной электроэнергии с целью улучшения уже имеющихся характеристик солнечных элементов.

Цель исследований – краткое описание основных аспектов развития мировой солнечной фотоэнергетики; изучение солнечных элементов, относящихся к различным технологическим группам, оценка их преимуществ и недостатков, особенностей производства, перспектив развития и максимальной эффективности; рассмотрение возможной альтернативы в развитии современных высокоэффективных солнечных элементов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками, обсуждение методов их получения.

Основная часть

Данные Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 г. [6] представлены на рис. 2. Для удобства обсуждения рассмотрим четыре технологические группы, как и на рис. 2.

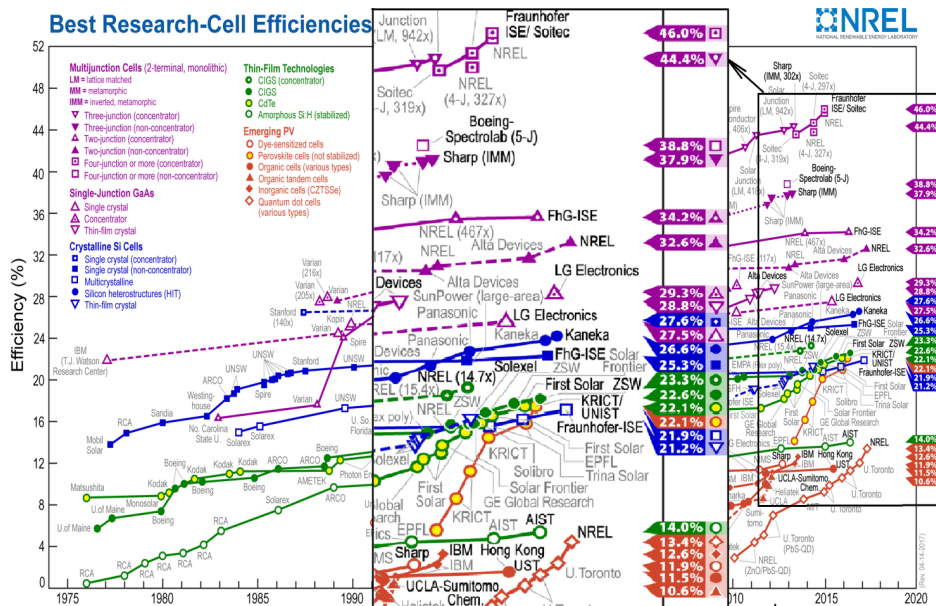


Рис. 2. Данные Национальной лаборатории по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 г.

Fig. 2. Data submitted by the National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) on the development of solar cells with maximum efficiency for 2017

К первой технологической группе можно отнести СЭ на основе соединений III и V групп периодической системы, имеющих от одного до пяти каскадов (многокаскадные СЭ), которые могут использоваться как с применением концентраторов, так и без них. Согласно рис. 2, сегодня они имеют максимальную эффективность.

Каскадные СЭ формируют путем либо выращивания монокристаллической структуры, либо механического стыкования готовых элементов.

Большинство высокоэффективных СЭ, относящихся к этой группе, изготавливают на основе многопереходных (каскадных) гетероструктур. Их получают методами молекулярно-пучковой эпитаксии (МБЕ) или эпитаксией из газовой фазы, содержащей металлоорганические соединения (MOCVD-технология). Пример структуры трехкаскадного СЭ и энергетическая схема преобразования им солнечной энергии [7] продемонстрированы на рис. 3.

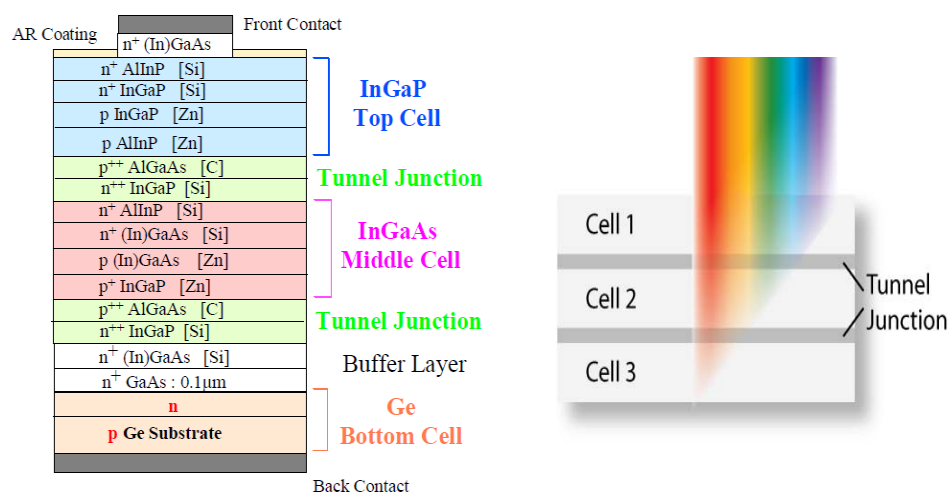


Рис. 3. Многопереходный солнечный элемент
и энергетическая схема преобразования солнечной энергии

Fig. 3. Multijunction solar cell and energy scheme for the conversion of solar energy

Изготовленные в Германии (Fraunhofer ISE/Soitec) четырехкаскадные СЭ достигли эффективности 46,0 % при использовании концентрирования солнечного излучения со степенью 500 ед. 14 января 2015 г. в GOLDEN (штат Колорадо – Министерство энергетики США, NREL) объявили о демонстрации эффективности преобразования для четырехпереходного СЭ в 45,7 % при степени концентрации 234 ед. NREL заявила, что это один из самых высоких достигнутых КПД для СЭ любых типов. При этом максимальная эффективность трехкаскадных СЭ, полученных еще в 2013 г. компанией Solar Junction со степенью концентрации 942 ед., составила 44,4 %.

Однако применение концентраторов (линз Френеля) для получения высокой эффективности приводит к большим оптическим потерям. Необходимо помнить, что исследуются лабораторные элементы при специальных условиях освещения. Сами концентраторные многокаскадные элементы при использовании в натуральных условиях требуют применения механически сложных опорных конструкций, включающих схемы слежения, имеют плохую работоспособность при освещении рассеянным светом и требуют необходимости эффективного охлаждения структуры вследствие локального нагрева.

Максимальная эффективность многокаскадных безконцентраторных СЭ, полученных компаниями Boeing-Spectrolab и Sharp, составила соответственно 38,8 % (пять каскадов) и 37,9 % (три каскада). Недостатками получения многокаскадных СЭ являются сложность технологического процесса, использование дорогостоящих оборудования, подложек монокристаллического Ge, GaAs и других основных материалов и компонентов.

Ж. И. Алферов отмечает [8], что каскадные СЭ являются наиболее сложными в структурном отношении по сравнению со всеми другими полупроводниковыми приборами.

При изготовлении двухкаскадных СЭ путем механической состыковки готовых элементов для верхнего каскада применялись материалы на основе GaAs, а для нижнего – из Ge [9]. Авторы [10] для верхнего каскада использовали СЭ из AlGaAs ($E_g \sim 1,7$ эВ), а для нижнего – из Si. Однако рекордные значения с эффективностью 37 % [11] были достигнуты на механически состыкованных СЭ, состоящих из верхнего каскада на основе GaAs и нижнего на основе GaSb, при преобразовании солнечного излучения со степенью концентрации 100 ед.

Достоинством механически состыкованных СЭ является то, что они создаются на основе хорошо разработанных однопереходных СЭ. При этом нет необходимости согласовывать электрический ток в каскадах. К недостаткам относятся достаточно сложная система коммутации каскадов, высокие оптические потери на границах каскадов, требование минимизации поглощения верхним каскадом излучения, которое будет преобразовываться в нижнем каскаде [12].

Несмотря на вышеуказанные негативные стороны, многокаскадные СЭ нашли свой рынок применения в солнечной ФЭ. Они не только эффективно используются в космосе, но и в наземной концентраторной солнечной ФЭ. Компании Boeing, Emcore, Spectrolab Inc. уже к 2008 г. имели отработанные технологии изготовления многокаскадных СЭ с производственными мощностями более 1 МВт/год каждая, налаженную систему сбыта и сформированный рынок наземной концентраторной солнечной ФЭ с эффективностью СЭ 36–39 %.

Однокаскадные элементы первой технологической группы имеют максимальную эффективность до 27,5 %, однако это незначительно выше, чем на кремнии (25,6 %), при существенно более сложном технологическом процессе и высокой цене на материалы и оборудование, повышающими цену на генерируемую электрическую энергию. Таким образом, основным недостатком этой группы является высокая стоимость.

Ко второй технологической группе относят СЭ, изготавливаемые на основе кремниевых технологий. Как мы уже говорили ранее, кремний в настоящий временной период является основным материалом солнечной ФЭ, на основе которого выполняется более 90 % СЭ. Высокие темпы развития фотоэлектрической промышленности вынуждают производителей высокочистого кремния уделять больше внимания исследованию и развитию процессов его получения. Как правило, кремний для ФЭ получают методом на основе химического осаждения паров, известного как Сименс-процесс, и по технологической схеме производства на основе реакторов кипящего слоя [13, 14]. Технологические приемы и процессы для этой группы наиболее отработаны, и мы не будем заострять на них свое внимание.

Классическая конструкция СЭ, изготавливаемая из моно- и мультикристаллического кремния [15], показана на рис. 4а. Согласно рис. 2, максимальная эффективность для СЭ из монокристаллического кремния составляет 25,3 %. При использовании 92-кратной концентрации компаний

Атомix получена максимальная эффективность 27,6 %. Применение в такой конструкции СЭ мультикристаллического кремния приводит к уменьшению эффективности до 21,9 %.

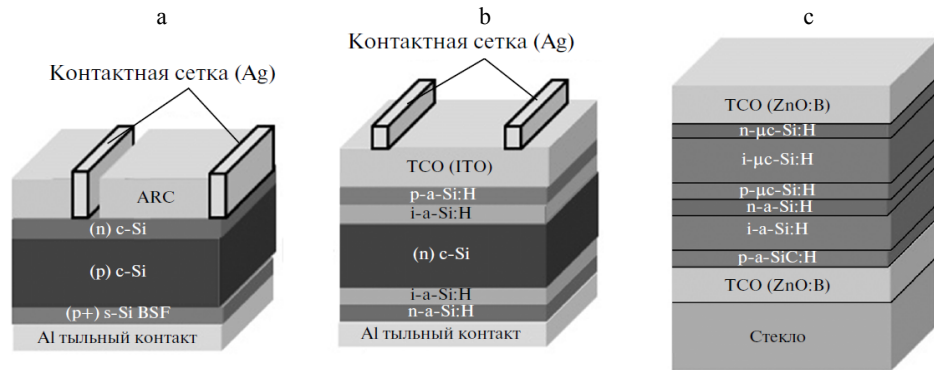


Рис. 4. Классическая конструкция солнечных элементов:
а – на основе c-Si; б – на основе гетероперехода a-Si:H/c-Si (HIT-технологии);
с – тонкопленочные на основе a-Si:H/μs-Si:H; TCO – прозрачный проводящий оксид
(обычно индий-титановый оксид (ITO)); ARC – просветляющее покрытие

Fig. 4. A classical construction of solar cells:
а – based on c-Si; б – on the basis of a heterojunction a-Si:H/c-Si (HIT-technologies);
с – thin-film solar cells based on a-Si:H/μs-Si:H; TCO – transparent conductive oxide
(usually indium titanium oxide (ITO)); ARC – antireflective coating

Без применения концентраторов максимальную эффективность в этой группе имеют кремниевые СЭ, изготавливаемые по HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer Structure) технологии (26,6 %) [16]. На рис. 4б представлена общая концепция технологии формирования гетероструктурных СЭ на основе кристаллического кремния. На структурированной и очищенной поверхности, предварительно подготовленной с помощью химической обработки подложки, методом плазмохимического осаждения формируют омический и гетероконтакт, состоящие из слоев собственного и легированного аморфного кремния. На лицевую сторону напыляют прозрачное проводящее покрытие, а методом трафаретной печати наносят серебряную контактную сетку, обеспечивающую токосъем. Тыльный контакт формируют напылением слоев индий-титанового оксида (ITO) и серебра. Технологический процесс состоит из семи операций, что значительно меньше, чем в технологии IBC (фирмы Sun Power) получения кристаллических кремниевых СЭ, имеющей 18 операций [15].

На рис. 4с показана конструкция тонкопленочного СЭ на основе a-Si:H/μs-Si:H. Как правило, технологическая цепочка получения такого прибора требует большого количества технологических шагов, а сам СЭ имеет более низкую эффективность и подвержен деградации по сравнению с HIT-технологией. Максимальная эффективность тонкопленочных СЭ, согласно рис. 2, составляет 21,2 %. Таким образом, в этой группе в развитии солнечной ФЭ наиболее перспективными являются СЭ, производимые по HIT-технологии.

Солнечные элементы, рассматриваемые в третьей технологической группе, как и элементы первой группы, можно отнести к элементам второго поколения. Для их изготовления требуется меньше полупроводниковых материалов, чем для СЭ на кристаллическом кремнии. Однако негативным фактором при производстве СЭ этой группы является то, что данные тонкопленочные технологии используют токсичные и редкие элементы с довольно высокой стоимостью. Кроме того, имеющиеся технологические проблемы с равномерностью нанесения тонких слоев приводят к сравнительно большой потере эффективности при переходе от элементов к модулям.

Максимальной эффективностью в этой группе обладают тонкопленочные СЭ второго поколения на основе халькопиритов $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{Se, S})_2$, называемые CIGS. Они относительно легко синтезируются в лабораторных условиях, и технологические особенности их получения можно подразделить на методы с и без использования вакуума. Вакуумный вариант сказывается на стоимости СЭ, но при нем получена наибольшая эффективность в 22,6 % (согласно рис. 2), безвакуумный вариант не позволяет получать солнечные элементы с эффективностью более 17,0 % [17].

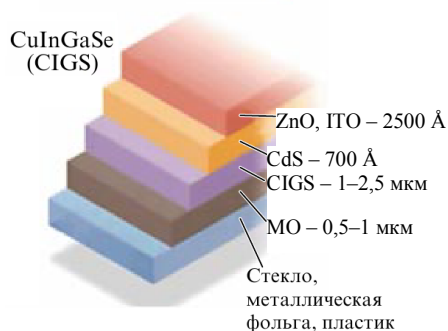


Рис. 5. Типичная структура солнечных элементов на основе CIGS

Fig. 5. A typical structure of solar cells based on CIGS

Структура типичных СЭ на основе CIGS [18] представлена на рис. 5. Здесь CIGS выступает в качестве полупроводника *p*-типа, осажденного на стеклянную подложку с тонким слоем молибдена, выполняющего функцию нижнего контакта. Нанесением слоя широкозонного полупроводника CdS, легированного под *n*-тип, создается *p-n*-структура, которая закрывается тонким слоем прозрачного оксида цинка и прозрачным проводящим индий-титановым оксидом (либо сетчатым контактом).

При использовании концентрированного солнечного излучения со степенью 14,7 ед. удалось поднять эффективность СЭ на основе CIGS до 23,3 % (рис. 2).

Следующим по результативности в этой группе выступают СЭ на основе CdTe с максимально достигнутой эффективностью 22,1 %. Типичная структура СЭ на основе CdTe представлена на рис. 6 [19]. Основными технологиями получения таких СЭ являются процессы сублимации, химического напыления, химического осаждения из газовой фазы, эпитаксия, трафаретная печать.

Ведущий мировой производитель подобных СЭ – компания First Solar, которой принадлежит рекордный показатель в 21,5 % (2016 г.). Задачей компании, по словам ее директора, является «подтверждение постоянного

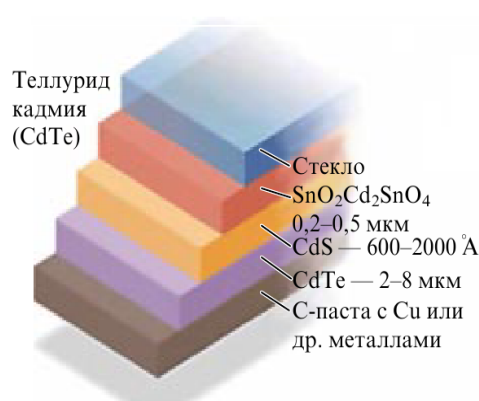


Рис. 6. Типичная структура солнечных элементов на основе CdTe

Fig. 6. A typical structure of solar cells based on CdTe

конкурентного преимущества CdTe по сравнению с традиционной технологией кристаллического кремния».

В 2014 г. Bloomberg опубликовал майские цены на наиболее используемые в Катаре СЭ с текущими ценами модулей, маржи и ценами продаж [20]. Эти данные расширены, чтобы можно было показать развитие уровня затрат на электроэнергию, получаемую по солнечной фотоэлектрической технологии в сочетании с новыми данными о солнечной эффективности. Эти данные

позволяют определить дорожную карту развития уровня затрат на электроэнергию для солнечной ФЭ Катара в будущем.

Развитие эффективности для исследовательских СЭ на основе тонких пленок CdTe движется ускоренными темпами, что может сократить уровень затрат на получаемую этими СЭ энергию до 60 %. Если переход от исследовательских СЭ к коммерческому рынку будет реализован так, как планируется, то эффективность тонкопленочных СЭ скоро может превзойти кристаллические кремниевые модули, что также приведет к уменьшению уровня затрат на электроэнергию ниже, чем для энергии, получаемой традиционными методами на АЭС и ТЭЦ на большинстве энергетических рынков. Подтверждение этих выводов можно найти в [20]. Перспективность развития тонкопленочных СЭ бросается в глаза, поскольку уровень затрат на электроэнергию, как известно, включает в себя все капитальные затраты и эксплуатационные расходы (исключая субсидии, долговое финансирование и налоговые последствия).

Наименьшей эффективностью (14,0 %) в этой группе обладают тонкопленочные СЭ на основе аморфного кремния. Главной проблемой таких модулей является деградация аморфного элемента. Рассмотренные СЭ, входящие в третью технологическую группу, применяются в основном в элементах конструкций зданий и ограждений.

К четвертой технологической группе можно отнести СЭ на материалах и технологиях, открытых достаточно недавно (в сравнении с предыдущими технологическими группами), в последние годы они получили наибольшие тенденции к развитию. К ним можно отнести технологии пленок на основе сенсibilизированных красителей, перовскитов, органические и tandemные органические пленки, а также квантовые точки, полученные по коллоидным технологиям.

Наиболее перспективными в этой группе считаются СЭ на основе перовскитов [21, 22]. Исследовательская группа во главе с научным сотруд-

ником Seo Jang-won Корейского научно-исследовательского института химической технологии зафиксировала наибольшую эффективность для перовскитового СЭ – 22,7 % (2017 г.).

Такие СЭ относятся к третьему поколению, они гибкие и легкие, их изготовление требует применения относительно простых и дешевых методов. Однако необходимо отметить, что на данный момент они подвержены временной деградации. К СЭ следует применять повышенные требования к герметизации. Сегодня производство СЭ данной технологической группы в промышленных масштабах отсутствует. Это потенциально наиболее дешевая технологическая группа изготовления СЭ, находящаяся на стадии лабораторных исследований.

Альтернативой созданию СЭ по перечисленным выше технологиям является изготовление однопереходных элементов на основе многослойных наногетероэпитаксиальных структур (НГЭС) с квантовыми точками (КТ). В этом случае дизайн элемента существенно упрощается, поскольку такой солнечный элемент однокаскадный [23]. Для его изготовления используются два полупроводниковых материала: один – широкозонный (матричный), другой – узкозонный (для изготовления КТ). Пример структуры такого солнечного элемента и его энергетическая схема показаны на рис. 7.

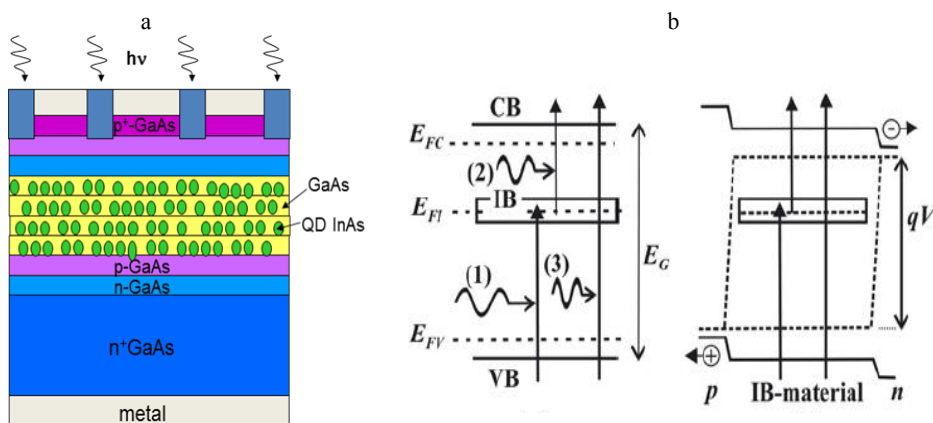


Рис. 7. Однопереходный солнечный элемент с квантовыми точками (a) и его энергетическая диаграмма (b)

Fig. 7. A unijunction solar cell with quantum dots (a) and its energy diagram (b)

Теоретически доказано [24], что введение КТ узкозонного полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны E_{g1} в СЭ, изготовленный из широкозонного полупроводникового материала с шириной запрещенной зоны $E_{g2} > E_{g1}$, позволяет утилизировать как коротковолновое излучение с энергией $h\nu > E_{g2}$, так и излучение с энергией $h\nu < E_{g2}$, которое не поглощается в материале широкозонного полупроводника. При этом, как показано на энергетической диаграмме однопереходного солнечного элемента с КТ (рис. 7b), осуществляется утилизация длинно-

волновой части спектра солнечного излучения за счет суммирования энергии двух длинноволновых квантов света [25].

Сотрудник NREL Артур Нозик в 1990-е гг. постулировал возможность получения нескольких электронно-дырочных пар с КТ узкозонных полупроводников, облученных квантами коротковолнового спектра солнечного излучения [26]. В 2006 г. экспериментально установлено, что при облучении ультрафиолетовым излучением КТ PbSe один фотон порождает семь электронов, а в 2007-м получено, что один фотон излучения с длиной волны $\lambda = 0,48$ мкм порождает два электрона с КТ кремния. Теоретический анализ показывает, что утилизация длинно- и коротковолновой части спектра солнечного излучения с помощью КТ позволяет достичь эффективности солнечного элемента, близкой к термодинамическому пределу (более 84 %) [27]. Теоретические оценки предсказывают эффективность в 53 % для солнечных элементов с квантовыми точками Ge в Si. Повышение эффективности устройств на основе наногетероструктур Ge/Si становится возможным также благодаря эффектам пространственного квантования [28–30].

В солнечных элементах необходимы массивы квантовых точек с большей плотностью N (для увеличения коэффициента поглощения) и, по возможности, с широким распределением КТ по размерам δL , так как это обеспечит более полное использование солнечного спектра [30].

Применение широкозонных полупроводников в качестве матричного материала НГЭС с КТ позволяет изготавливать СЭ с улучшенными технико-экономическими характеристиками в связи с тем, что [31]:

1) большие значения ширины запрещенной зоны E_g определяют высокую температурную стабильность и высокий температурный рабочий предел создаваемого солнечного элемента;

2) наличие у прямозонных полупроводников групп III–V резкого края основной полосы поглощения, определяемой прямыми оптическими переходами, приводит к возможности получения высокой эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочными СЭ;

3) есть возможность достижения большой радиационной стойкости, так как под действием радиационного излучения в этих материалах не происходит существенного уменьшения низкого значения диффузионной длины неосновных носителей заряда, характерных для данных материалов;

4) большой потенциальный барьер в p – n -переходах на широкозонных материалах групп III–V обуславливает низкие значения токов, что, с одной стороны, обеспечивает большую область линейной зависимости выходной мощности СЭ от светового потока (в области больших световых потоков), а с другой – позволяет получать высокую эффективность при работе в диапазоне низких световых потоков и температур;

5) кроме GaAs, для получения однопереходных СЭ в качестве широкозонного полупроводника перспективно использовать GaP, а в качестве узкозонного для изготовления КТ – Ge, InAs, GaSb, а также твердые растворы на их основе ($GexSi_{1-x}$, $InAsP$, $GaInSb$).

Попытки создания методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений (МОСVD) высокоэффективных СЭ на основе НГЭС с КТ, где в качестве матричного материала используется GaAs, а материала для квантовых точек – InAs, не увенчались успехом, так как введение КТ не увеличивало, а уменьшало квантовую эффективность СЭ, причем с повышением количества массивов КТ эффективность СЭ уменьшалась [32]. Авторы связывают это с наличием в гетероструктурах деформированных напряженных «смачивающих» слоев узкозонных полупроводников, образующихся между КТ, в которых создаются генерационно-рекомбинационные центры, ответственные за безизлучательные каналы рекомбинации.

Рассмотрим методы, позволяющие получать НГЭС с массивами КТ, не содержащие «смачивающих» слоев в промежутках между КТ.

Метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) с импульсным охлаждением подложки (ИОП) основан на процессах кристаллизации и растворения твердого тела в жидкой и газовой фазах [33, 34] и может использоваться для получения различных полупроводниковых НГЭС с КТ.

Сущность данного метода получения эпитаксиальных структур из жидкой фазы заключается: в нагреве раствора-расплава до температуры насыщения; приведении его в контакт с рабочей поверхностью подложки, нагретой до такой же температуры; приведении поверхности подложки, противоположной рабочей, в контакт с теплопоглотителем; проведении кристаллизации многослойных эпитаксиальных структур при использовании растворов-расплавов различного состава путем многократного создания на рабочей стороне подложки импульсов охлаждения величиной, длительностью и скоростью нарастания переднего фронта в интервалах $(0,5-15,0)^\circ\text{C}$, $(5 \cdot 10^{-2} \div 5) \text{ с}$, $(5 \div 0,5) \cdot 10^3 \text{ град./с}$ соответственно; кристаллизации массивов КТ из растворенных материалов с постоянными решеток, отличающимися более чем на 0,6 % от постоянных решеток монокристаллических материалов, на которых они наращиваются.

Метод ЖФЭ с ИОП заключается в том, что тыльная сторона подложки при фиксированной температуре T соприкасается с теплопоглотителем с температурой T_p , меньшей, чем температура подложки на величину $\Delta T = T - T_p$, при этом рабочая поверхность подложки находится в контакте с раствором-расплавом, имеющим насыщение согласно данной фиксированной температуре. Спустя незначительный отрезок времени ($\tau \approx 10^{-3} \div 10^{-1} \text{ с}$), который определяет время импульса охлаждения подложки, теплопоглотитель нагревается до температуры подложки. За время τ на рабочей поверхности подложки происходит кристаллизация нанослоя или массива КТ [35, 36].

Так как постоянные решеток материалов КТ и подложки различны, выращивание КТ осуществляется по механизму Странского – Крастанова, согласно которому в начальный момент роста на подложке формируется

сплошной «смачивающий» слой, у которого с ростом толщины местами возникают механические напряжения с максимумами в середине периода нониуса совершенного строения на гетерогранице. Отсюда плотность КТ лимитируется в основном периодом нониуса совершенного строения. Поскольку кристаллизация осуществляется из жидкой фазы, наличие раствора-расплава, являющегося растворителем в процессе релаксации импульса охлаждения, приводит к формированию структурно совершенных КТ, так как в процессе низкого пересыщения происходит «залечивание» структурных дефектов в растущих КТ в связи с тем, что процесс их формирования осуществляется в условиях, близких к динамическому равновесию. При дальнейшей релаксации импульса охлаждения «смачивающий» слой в промежутке между КТ растворяется [33].

Следующий этап процесса – заращивание массива КТ наноразмерным слоем матричного материала, называемого спейсерным слоем, выращивая его такой толщиной, которая могла бы обеспечить туннельный переход носителей заряда от одного массива КТ к другому, т. е. по вертикально связанным КТ. Размещение многослойных структур с вертикально связанными КТ в области p – n -перехода приводит к разделению электростатическим полем p – n -перехода носителей заряда, генерируемых этими КТ.

Осуществляется выращивание многослойной p – n -структуры с КТ в одном технологическом процессе, содержащей наноразмерные слои и массивы КТ различной толщины, что достигается путем использования теплопоглотителя, растворов-расплавов разного состава и различных импульсов охлаждения на рабочей поверхности подложки.

Имеется метод на основе ЖФЭ, сущность которого заключается в том, что рост НГЭС с КТ осуществлялся в графитовой кассете «пенального» типа в горизонтальном реакторе в процессе протаскивания подложки под раствором-расплавом при достижении заданной температуры. Эксперименты по эпитаксиальному выращиванию проводились в температурном диапазоне (420–445) °С при скорости охлаждения системы 0,3 град./мин [37].

На наш взгляд, недостатком метода является то, что в условиях проведения процессов, описанных авторами, невозможно получать качественные структуры с воспроизводимыми свойствами.

Один из перспективных методов формирования НГЭС – капельный. Сущность его состоит в том, что на первой стадии процесса на поверхности подложки образуются наноразмерные капли элемента III группы (например, In), а на второй стадии происходит растворение в этих каплях элемента V группы (например, As), в результате чего на подложке образуются наноразмерные кристаллы групп III–V.

Капельный метод, в отличие от традиционной эпитаксии по механизму Странского – Крастанова [38], дает возможность получения изолированных квантовых точек независимо от степени рассогласования периодов решеток и является одним из вариантов кристаллизации по механизму «пар – жидкость – твердое тело», напоминающему изотермическую ло-

кальную жидкофазную эпитаксию с подпиткой из газовой фазы. На качество выращиваемых НГЭС с КТ данным методом не влияет значение рас- согласования периодов кристаллической решетки подложки и осаждаемого вещества, что позволяет формировать КТ в изопериодных системах и без «смачивающего» слоя.

В последние годы процесс «капельной» эпитаксии активно развивался в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии. Однако такие ограничения этого метода, как довольно низкая производительность, сложность и высокая стоимость оборудования, делают привлекательным развитие метода в условиях МОС-гидридной эпитаксии [39]. Одним из достоинств данного метода является то, что при высоком качестве полученных структур их стоимость гораздо ниже, чем в структурах, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии [40].

Несмотря на явные преимущества, основные недостатки метода – сложность технологического процесса и дороговизна оборудования, комплектующих и материалов по сравнению с методом ЖФЭ с ИОП.

Метод выращивания НГЭС в процессе ЖФЭ с ИОП имеет недорогое оформление и обладает технологической простотой [41], при этом позволяет получать массивы квантовых точек, не содержащих упруго-напряженных «смачивающих» слоев в промежутках между КТ, что дает возможность осуществлять процесс формирования КТ в условиях, близких к равновесию, и тем самым выращивать структуры с минимальными генерационно-рекомбинационными токами, а это способствует получению высокоэффективных СЭ с эффективностью более 30 %.

ВЫВОДЫ

1. Приведенный обзор продемонстрировал, что в современном мире одна из самых быстроразвивающихся отраслей промышленности – фотоэнергетика, которая является не только перспективным направлением возобновляемой энергетики, но и энергетической отрасли в целом. Причем себестоимость производимой солнечной энергии стремительно приближается к цене за электроэнергию, генерируемую традиционными методами. Продемонстрирована ситуация, связанная с тенденциями мирового развития отрасли за последние несколько лет.

2. Рассмотрены аспекты развития эффективности современных исследовательских солнечных элементов, изготовленных из различных материалов, использующие инновационные технологические решения на основе данных, предоставленных Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) в 2017 г. Для удобства исследовательские солнечные элементы разделяли на четыре технологические группы. Обсуждены преимущества и недостатки исследовательских солнечных элементов каждой группы, включая особенности их производства и перспективы развития, оценена их максимальная эффективность за 2017 г.

3. Показана возможная альтернатива развитию современных высокоэффективных солнечных элементов на основе наногетероэпитаксиальных структур с квантовыми точками, обсуждены преимущества и недостатки методов их получения, в том числе методом жидкофазной эпитаксии с импульсным охлаждением подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2012 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2012. 45 p.
2. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2014 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2014. 50 p.
3. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2017 / A. Jeger-Waldau // Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2017. 90 p.
4. Purification of Metallurgical Silicon up to "Solar" Mark Silicon / I. I. Maronchuk [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research. 2016. Vol. 6, No 4. P. 1227–1231.
5. The Development of a Purification Technique of Metallurgical Silicon to Silicon of the Solar Brand / I. I. Maronchuk [et al.] // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45, No 8–9. P. 570–575.
6. Данные, представленные Национальной лабораторией по возобновляемой энергетике (NREL, США) о разработках солнечных элементов с максимальной эффективностью за 2017 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Дата доступа: 20.02.2018.
7. III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics / H. Cotal [et al.] // Energy Environ. Sci. 2009. Vol. 2, No 2. P. 174–192.
8. Алферов, Ж. И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж. И. Алферов, В. М. Андреев, В. Д. Румянцев // ФТП. 2004. Т. 38, вып. 8. С. 937–948.
9. Fraas, L. M. Solar Cells and their Applications / L. M. Fraas, L. D. Partain. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2010. 648 p. <https://doi.org/10.1002/9780470636886>.
10. High Efficiency III–V Solar Cells / K. W. J. Barnham [et al.] // Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 143.
11. Solar Cell for NASA Rainbow Concentrator / M. A. Smith [et al.] // Proc. 28th PVSC, Anchorage, Alaska, 2000. P. 1139.
12. Fan, J. C. C. Thin-Film GaAs Solar Cells / J. C. C. Fan, C. O. Bozler, R. W. McClelland // 15th IEEE Photovoltaic Spec. Conference (Kissimmee, Fla, 1981): Conf. Rec. New York. 1981. P. 375–377.
13. Грибов, Б. Г. Новые технологии получения поликристаллического кремния для солнечной энергетики / Б. Г. Грибов, К. В. Зиновьев // Известия вузов. Электроника. 2008. № 3. С. 10–17.
14. Разработка методики очистки металлургического кремния до кремния марки «солнечный» / И. И. Марончук [и др.] // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 189–194.
15. Теруков, Е. И. Перспективы солнечной энергетики в России / Е. И. Теруков, О. И. Шуткин // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86, № 3. С. 195–202.
16. Sark, W. Van. Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells / W. Van Sark, L. Korte, F. Roca. Berlin: Springer, 2012. 574 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22275-7>.
17. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития / В. А. Меличко [и др.] // Успехи физических наук. 2016. Т. 186, № 8. С. 801–852.
18. Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In, Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells / P. Reinhard [et al.] // Chem. of Mater. 2015. Vol. 27, No 16. P. 5755–5764.
19. Bonnet, D. Cadmium Telluride – Material for Thin Film Solar Cells / D. Bonnet, P. Meyers // J. Mater. Res. 1998. Vol. 13, No 10. P. 2740–2753.

20. Новая солнечная технология – дорожная карта LCOE Катар [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://bxhorn.com/2014/lcoe/>. Дата доступа: 20.02.2018.
21. Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells / Y. Liu [et al.] // *Nano Lett.* 2015. Vol. 15, No 1. P. 662–668.
22. Snaith, H. J. Perovskites: the Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells / H. J. Snaith // *J. Phys. Chem. Lett.* 2013. Vol. 4, No 21. P. 3623–3630.
23. Marti, A. Quantum Dot Super Solar Cell / A. Marti, L. Cuadra, A. Luque // *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No 00CH37036). 363 p. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916039>.
24. Intermediate Band Photovoltaics Overview / L. Cuadra [et al.] // *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, May 11–18, 2003. PCD IPL-B2-01.
25. Жидкофазная эпитаксия и свойства наногетероструктур на основе соединений III–V / И. Е. Марончук [и др.] // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии: сб. наук. пр.* 2012. Т. 10, № 1. С. 77–88.
26. Nozik, A. J. Quantum Dot Super Solar Cells / A. J. Nozik // *Physica E.* 2002. Vol. 14, No 1–2. P. 115–120.
27. Nozik, A. Believes Quantum-Dot Solar Power Could Boost Output in Cheap Photovoltaics / A. Nozik. NY: *Technology Review*, 2007. 49 p.
28. Luque, A. Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels / A. Luque, A. Marti // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78, No 26. P. 5014–5017.
29. Enhanced Quantum Efficiency of Solar Cells with Self-Assembled Ge Dots Stacked in Multi-layer Structure / A. Alguno [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, No 6. P. 1258–1260.
30. Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge / А. В. Войцеховский [и др.] // *Прикладная физика.* 2010. Т. 6, № 2. С. 96–102.
31. Сверхвысокоэффективные солнечные элементы / Т. Ф. Кулюткина [и др.] // *Нові технології.* 2011. Т. 3, № 33. С. 9–16.
32. Алферов, Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // *ФТП.* 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
33. Способ выращивания эпитаксиальных наногетероструктур с массивами квантовых точек: пат. № 94699 Украины: Кл. С 30В 19/00, С 30В 29/00, Н 01L 21/20 / И. Е. Марончук, Т. Ф. Кулюткина, И. И. Марончук. Дата публ. 10.06.2011.
34. Deposition by Liquid Epitaxy and Study of the Properties of Nano-Heteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Efficient Solar Cells / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2014. Vol. 558. P. 012049.
35. Study of the Morphology of Ge Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2016. Vol. 700. P. 012043.
36. Improvement of Growing of Ge QDs by the Method of Liquid Phase Epitaxy / D. Dimova-Malinovska [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2017. Vol. 794. P. 012012.
37. Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии / К. Д. Моисеев [и др.] // *Письма в ЖТФ.* 2007. Т. 33, № 7. С. 50–57.
38. In(Ga)As/GaAs Quantum Dots for Optoelectronic Devices / K. Sears [et al.] // *Proc. SPIE 6415, Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems III.* Adelaide, Australia, 2006. Vol. 641506. <https://doi.org/10.1117/12.706526>.
39. Разработка основ капельного метода формирования массивов квантовых точек в системе InAs/GaAs применительно к условиям МОС-гидридной эпитаксии / Р. Х. Акчурин [и др.] // *Материалы электронной техники.* 2011. № 3. С. 21–26.
40. Влияние температуры осаждения индия на морфологию наноразмерных гетероструктур InAs/GaAs, полученных капельным методом в условиях МОС-гидридной эпитаксии / М. А. Сурнина [и др.] // *Прикладная физика.* 2015. № 2. С. 97–101.
41. An Obtaining of Nanoheteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Effective Photovoltaic Devices, Investigation of their Properties / S. Y. Bykovsky [et al.] // *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture.* Polish Academy of Sciences. 2014. Vol. 14, No 1. P. 154–163.

REFERENCES

1. Jeger-Waldau A. (2012) *PV Status Report 2012*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 45.
2. Jeger-Waldau A. (2014) *PV Status Report 2014*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 50.
3. Jeger-Waldau A. (2017) *PV Status Report 2017*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 90.
4. Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Gochua K. V. (2016) Purification of Metallurgical Silicon up to "Solar" Mark Silicon. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6 (4), 1227–1231.
5. Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Shirokov I. B. (2016) The Development of a Purification Technique of Metallurgical Silicon to Silicon of the Solar Brand. *Russian Microelectronics*, 45 (8–9), 570–575. <https://doi.org/10.1134/s1063739716080102>.
6. Data Presented by the National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) on the Development of Solar Cells of Maximum Efficiency for 2017. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. (Accessed 20 February 2018) (in Russian).
7. Cotal H., Fetzer C., Boisvert J., Kinsey G., King R., Hebert P., Yoon H., Karam N. (2009) III–V Multijunction Solar Cells for Concentrating Photovoltaics. *Energy Environ. Sci.*, 2 (2), 174–192. <https://doi.org/10.1039/b809257e>.
8. Alferov Zh. I., Andreev V. M., Rumyantsev V. D. (2004) Trends and Prospects for the Development of Solar Photovoltaics. *Semiconductors*, 38 (8), 899–908. <https://doi.org/10.1134/1.1787110>.
9. Fraas L. M., Partain L. D. (2010) *Solar Cells and their Applications*. 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., Publication. 648. <https://doi.org/10.1002/9780470636886>.
10. Barnham K. W. J., Bushnell D. B., Connolly J. P., Ekins-Daukes N., Klufinger B. G., Mazzer M., Nelson J. (2000) High Efficiency III–V Solar Cells. *Phys. Lett.*, (76), 143.
11. Smith M. A., Sinharoy S., Weizer V. G., Khan O., Pal A., Clark E. B., Wilt D. M., Scheiman D. A., Mardesich N. (2000) Solar Cell for NASA Rainbow Concentrator. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No 00CH37036), 1139. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916088>.
12. Fan J. C. C., Bozler C. O., McClelland R. W. (1981) Thin-Film GaAs Solar Cells. *15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Kissimmee, Fla, 1981)*. Rec. New York, 375–377.
13. Gribov B. G., Zinov'ev K. V. (2008) New Technologies for Production of Polycrystalline Silicon for Solar Power Engineering. *Semiconductors*, 42 (3), 1475–1479. <https://doi.org/10.1134/s1063782608130046>.
14. Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D., Shirokov I. B. (2015) Development of Clearing Technique of Metallurgical Silicon to Solar Grade Silicon. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics*, 18 (3), 189–194 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-3-189-194>.
15. Terukov E. I., Shutkin O. I. (2016) Perspectives of Solar Energy in Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 86 (2), 57–63. <https://doi.org/10.1134/s1019331616020052>.
16. Sark W. Van, Korte L., Roca F. (2012) *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*. Berlin, Springer. 574. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22275-7>.
17. Melichko V. A., Shalin A. S., Mukhin I. S., Kovrov A. E., Krasilin A. A., Vinogradov A. V., Belov P. A., Simovskii C. R. (2016) Solar Photovoltaics: the Current State and Development Trends. *Physics-Uspekhi*, 59 (8), 727–772. <https://doi.org/10.3367/ufne.2016.02.037703>.
18. Reinhard P., Bissig B., Pianezzi F., Avancini E., Hagendorfer H., Keller D., Fuchs P., Döbeli M., Vigo C., Crivelli P., Nishiwaki S., Buecheler S., Tiwari A. N. (2015) Features of KF and NaF Postdeposition Treatments of Cu(In, Ga)Se₂ Absorbers for High Efficiency Thin Film Solar Cells. *Chemistry of Materials*, 27 (16), 5755–5764. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b02335>.
19. Bonnet D., Meyers P. (1998) Cadmium Telluride – Material for Thin Film Solar Cells. *Journal of Materials Research*, 13 (10), 2740–2753. <https://doi.org/10.1557/jmr.1998.0376>.
20. *New Solar Technology – Roadmap LCOE Qatar*. Available at: <http://bxhorn.com/2014/lcoe/> (Accessed 20 February 2018) (in Russian).
21. Liu Y., Hong Z., Chen Q., Chang W., Zhou H., Song T. B., Young E., Yang Y. M., You J., Li G., Yang Y. (2015) Integrated Perovskite/Bulk-Heterojunction Toward Efficient Solar Cells. *Nano Letters*, 15 (1), 662–668. <https://doi.org/10.1021/nl504168q>.
22. Snaith H. J. (2013) Perovskites: the Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4 (21), 3623–3630. <https://doi.org/10.1021/jz4020162>.

23. Marti A., Cuadra L., Luque A. (2000) Quantum Dot Super Solar Cell. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000 (Cat. No 00CH37036)*. 363. <https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.916039>.
24. Cuadra L., Marti A., Lopez N., Luque A. (2003) Intermediate Band Photovoltaics Overview. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11–18, 2003*, PCD IPL-B2-01.
25. Maronchuk I. E., Maronchuk I. I., Kulyutkina T. F., Bykovsky S. Yu. (2012) Liquid-Phase Epitaxy and Properties of Nanoheterostructures Based on III–V Compounds. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies: Collected Scientific Works], 10 (1), 77–88 (in Ukrainian).
26. Nozik A. J. (2002) Quantum Dot Super Solar Cells. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 14 (1–2), 115–120. [https://doi.org/10.1016/s1386-9477\(02\)00374-0](https://doi.org/10.1016/s1386-9477(02)00374-0).
27. Nozik A. (2007) Believes Quantum-Dot Solar Power Could Boost Output in Cheap Photovoltaics. NY, Technology Review. 49.
28. Luque A., Marti A. (1997) Increasing the Efficiency of Ideal Solar Cells by Photon Induced Transitions at Intermediate Levels. *Physical Review Letters*, 78 (26), 5014–5017. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.78.5014>.
29. Algono A., Usami N., Ujihara T., Fujiwara K., Sasaki G., Nakajima K., Shiraki Y. (2003) Enhanced Quantum Efficiency of Solar Cells with Self-Assembled Ge Dots Stacked in Multilayer Structure. *Applied Physics Letters*, 83 (6), 1258–1260. <https://doi.org/10.1063/1.1600838>.
30. Voitsekhovskii A. V., Grigoriev D. V., Pchelyakov O. P., Nikiforov A. I. (2010) Efficiency of Conversion of Solar Energy by a Solar Cell Based on Si with Ge Quantum Dots. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, 6 (2), 96–102 (in Russian).
31. Kulyutkina T. F., Maronchuk I. I., Velichko O. V. [et al.] (2011) Ultra-High-Efficiency Solar Cells. *Novi Tekhnologii = New Technologies*, 3 (33), 9–16 (in Russian).
32. Alferov Zh. I. (1998) The History and Future of Semiconductor Heterostructures. *Semiconductors*, 32 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1134/1.1187350>.
33. Maronchuk I. E., Kulyutkina T. F., Maronchuk I. I. *Method for Growing Epitaxial NanoHeterostructures with Arrays of Quantum Dots*. Patent of Ukraine No 94699 (in Russian).
34. Dimova-Malinovska D., Lovchinov K., Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D. (2014) Deposition by Liquid Epitaxy and Study of the Properties of Nano-Heteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Efficient Solar Cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 558, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/558/1/012049>.
35. Dimova-Malinovska D., Nichev H., Maronchuk I. I., Maronchuk I. E., Sanikovich D. D. (2016) Study of the Morphology of Ge Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*, 700, 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/700/1/012043>.
36. Dimova-Malinovska D., Nichev H., Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Cherkashin A. S. (2017) Improvement of Growing of Ge QDs by the Method of Liquid Phase Epitaxy. *Journal of Physics: Conference Series*, 794, 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012012>.
37. Moiseev K. D., Parkhomenko Ya. A., Ankudinov A. V., Gushchina E. V., Mikhailova M. P., Titkov A. N., Yakovlev Yu. P. (2007) InSb/InAs Quantum Dots Grown by Liquid Phase Epitaxy. *Technical Physics Letters*, 33 (7), 295–298. <https://doi.org/10.1134/s1063785007040074>.
38. Sears K., Mokkapat S., Buda M., Tan H. H., Jagadish C. (2006) In(Ga)As/GaAs Quantum Dots for Optoelectronic Devices. *Proc. SPIE 6415, Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems III*, 641506. <https://doi.org/10.1117/12.706526>.
39. Akchurin R. Kh., Boginskaya I. A., Marmalyuk A. A., Ladugin M. A., Surnina M. A. (2011) Development of Fundamentals of Droplet Epitaxy for the Formation of Quantum Dot Arrays in the InAs/GaAs System under MOVPE Conditions. *Russian Microelectronics*, 41 (8), 453–458. <https://doi.org/10.1134/s1063739712080021>.
40. Surnina M. A., Sizov A. L., Akchurin R. Kh., Bagayev T. A. (2015) Influence of the Indium Deposition Temperature on the Morphology of Nano-Sized InAs/GaAs Heterostructures Obtained by the Drip Method under the Conditions of MOS Hydride Epitaxy. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, (2), 97–101 (in Russian).
41. Bykovsky S. Y., Bondarec S. V., Maronchuk I. I., Velchenko A. A. (2014) An Obtaining of Nanoheteroepitaxial Structures with Quantum Dots for High Effective Photovoltaic Devices, Investigation of their Properties. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Polish Academy of Sciences*, 14 (1), 154–163.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>

УДК 621.311

Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь

Ю. С. Петруша¹⁾, Н. А. Попкова¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Использование ветрогенераторов – одна из главных альтернатив традиционным технологиям производства электроэнергии. Исключение выбросов продуктов горения на ТЭС, работающих на углеводородном топливе, а также топливной составляющей себестоимости выработки электроэнергии делает технологию весьма привлекательной. Однако жесткость требований функционирования в составе электроэнергетических систем, низкая плотность потока первичного энергоресурса и его неуправляемость, низкий коэффициент использования установленной мощности, ограниченный срок службы, останов при шквалистых порывах ветра и гололедообразовании, большие площади отчуждаемых земель, шумовое воздействие и инфразвуковые вибрации, проблемы утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов требуют всестороннего анализа условий их применения. Анализ природно-климатических условий Беларуси, несмотря на отсутствие пустынных мест и ограничения на строительство сверхвысоких сооружений, свидетельствует о том, что они благоприятные для развития ветроэнергетики. Принципиальной задачей является выбор площадки размещения ветроэнергетических установок с учетом требований охраны окружающей среды, температурно-влажностного атмосферного режима, рельефа местности и геологических особенностей места расположения. Результаты расчетов параметров ветрового потока показали предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэлея, дающих достоверную область аппроксимации функции скорости ветра, а особенности рельефа позволяют рассчитывать на получение более высоких значений коэффициента использования установленной мощности. Очевидной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid, что позволит предоставить новые возможности потребителям и уйти от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

Ключевые слова: ветроэнергетика, надежность, экологичность, выбор площадок размещения, распределение Вейбулла и Рэлея, коэффициент использования установленной мощности

Для цитирования: Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus

U. S. Petrusha¹⁾, N. A. Papkova¹⁾

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

Abstract. The use of wind turbines to create wind energy is one of the main alternatives to the traditional technologies of power generation. The exclusion of combustion products emissions at thermal power plants that operate on hydrocarbon fuel, as well as the exclusion of the fuel component of the cost of electricity generation makes the wind power technology very attractive. However, the rigor of the operation requirements of wind turbines as part of power systems, low density of the flow of primary energy source and the lack of control of it, low utilization of installed capacity, limited operating life, shutdowns in the conditions of squally gusts of wind and ice formation, large areas of alienated land, the impact of noise and infrasonic vibrations and the problems of utilization of large-size structural elements and foundations require a comprehensive analysis of conditions of wind turbines application. Despite the absence of desert areas and of restrictions on the construction of ultra-high structures the analysis of natural and climatic conditions of Belarus demonstrates favorable natural and landscape conditions for the development of wind power generation. The principal task is to choose the location of wind power plants with due regard to environmental requirements, temperature and humidity conditions, terrain and geological features of the location. The results of calculations of the wind flow conditions showed the preference for the joint application of the Weibull and Rayleigh functions that provide the confidence interval of the approximation of the wind speed function, while the terrain specific features make it possible to expect to obtain higher values of the established capacity utilization factor. The development of a distributed energy generation accompanied by Smart Grid technology wide use over electric networks (which would provide new opportunities for consumers and make it possible to eliminate the monopoly of powerful power plants and to reduce burden of basic costs of big power production) ought to be considered as obvious prospect of wind power plants application.

Keywords: wind power production, reliability, environmental compatibility, site selection, Weibull and Rayleigh distribution, established capacity utilization factor

For citation: Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian)

Введение

Использование ветрогенераторов – одна из главных альтернатив традиционным технологиям производства электроэнергии. Кажущаяся простота и доступность природного энергоресурса ограничиваются жесткостью требований функционирования в составе электроэнергетических систем. Фундаментальными недостатками использования энергии ветра являются низкая плотность потока первичного энергоресурса и его неуправляемость. Экологическими особенностями следует считать существенно большие площади отчуждаемых земель, шумовое воздействие, инфразвуковые вибрации, а также проблему утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов.

Безусловное преимущество ветряных электростанций (ВЭС) по сравнению с традиционными – исключение выбросов продуктов горения на ТЭС,

работающих на углеводородном топливе, а также исключение топливной составляющей себестоимости выработки электроэнергии. По сравнению с АЭС ветроэнергетика не демонстрирует явных преимуществ.

В Республике Беларусь развитие технологий выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников определяется стратегией развития национальной энергетики [1]. Ввод и использование альтернативных генерирующих источников регламентируется законом [2]. Целесообразность применения ветрогенераторов является предметом исследований и дискуссий.

Широкое распространение ВЭС требует анализа приемлемости географических и климатических условий, выбора наиболее целесообразных технических решений и параметров отдельных ВЭС и ветропарков в целом, учета условий и результатов эксплуатации введенных ВЭС и проверки методик расчета конструктивных и режимных параметров.

Применение ветроэнергетики в мировой энергетике и развитие технологий производства и эксплуатации пока не дали ответов на ряд фундаментальных и технологических ограничений в использовании ветряных электростанций. Упомянем некоторые из них:

- вынужденность места расположения;
- ограниченный срок службы (20–25 лет);
- низкий коэффициент использования установленной мощности (0,25–0,30);
- недостаточная надежность покрытия графика нагрузки (наиболее опасными являются порывы ветра, провоцирующие останов всего ветропарка), приводящая к нестабильности работы энергосистемы;
- необходимость дополнительной электрической сети по сбору электроэнергии;
- гололедообразование как наиболее неблагоприятное явление в климатических условиях Беларуси.

Было бы ошибкой считать работу ВЭС экологически безупречной:

- площадь ветропарка более чем в 100 раз превышает площадь отчуждения для традиционных ТЭС на единицу установленной мощности, а с учетом различия коэффициента использования установленной мощности цифра увеличивается еще в разы;
- шум лопастей распространяется существенно дальше (до 2 км) принятых норм удаления ВЭС от мест проживания (300–500 м), вызывая тем самым перманентный стресс [3] и вероятность ухудшения здоровья людей;
- мало изучена проблема генерации, распространения и влияния инфранизких вибраций и визуального воздействия на психику движущихся элементов исполинских объектов;
- не решены вопросы эффективной утилизации оборудования (лопасти, мачта) и демонтажа фундаментов (тысячи тонн высокопрочного армированного бетона каждый).

Практика применения показывает:

- габариты и максимальные единичные мощности ВЭС подбираются к своим пределам (150–180 м, 10–12 МВт) из-за ограничений монтажа, прочности материалов и экономической целесообразности;
- наилучшая производительность получается при расположении в прибрежном мелководье, но требует вдвое больших капитальных вложений;
- уменьшение централизованного субсидирования в странах Европы снижает темпы роста мощностей ВЭС и ужесточает требования конкурентоспособности;
- оплата повышающего тарифа на покупку коммерческой ветровой электроэнергии в 2–3 раза превышает себестоимость ее получения на ВЭС Белэнерго.

Очевидной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid как направления предоставления новых возможностей потребителям и уход от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

Постановка задачи

Наиболее привлекательным в использовании ветрогенерации является отсутствие топливной составляющей в себестоимости производства электроэнергии. И значимость этого фактора будет возрастать. Целесообразность и масштабы использования ВЭС в Беларуси следует соотносить с такими показателями, как:

- приемлемость географических и климатических условий;
- анализ условий и результатов эксплуатации введенных ВЭС;
- экономические оценки;
- выбор наиболее целесообразных технических решений и параметров отдельных ВЭС и ветропарков в целом;
- проверка методик расчета конструктивных и режимных параметров.

Главная задача – освоение технологий организационного и технического характера для готовности широкомасштабного использования при возникновении благоприятных условий, учитывая природно-климатический потенциал страны.

По данным Государственного кадастра возобновляемых источников энергии [4], в Беларуси на конец 2017 г. работали 47 ветроэнергетических установок (ВЭУ) общей мощностью 84 МВт. Среднегодовая скорость ветра на территории страны не превышает 4,4 м/с, однако в отдельных районах, расположенных на холмах Минской, Оршанской и Городокской возвышенностей, наблюдается скорость ветра от 5,2 до 5,7 м/с на высоте 80–100 м [5], что является оптимальным для ВЭУ большой мощности.

Следует отметить, что, несмотря на обширность географического пространства, в Беларуси нет пустынных территорий, а строительство сверхвысоких объектов имеет ограничение по использованию воздушного пространства.

Успешное преобразование кинетической энергии ветрового потока в электрическую, кроме наличия подходящего ветрового потока, требует тщательного выбора площадки для строительства с учетом требований охраны окружающей среды, температурно-влажностного атмосферного режима, рельефа местности и геологических особенностей места расположения [5–7]. Выбор площадки для строительства будущего объекта – один из важнейших этапов исследовательских работ. Место установки ВЭС должно отвечать требованиям в области охраны окружающей среды с учетом ближайших и отдаленных экологических, экономических, социальных и иных последствий эксплуатации ВЭУ, с соблюдением приоритета сохранения благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия, рационального использования и воспроизводства природных ресурсов [8].

Первоочередными факторами при выборе площадки являются параметры ветрового потока. Для определения мест наиболее рационального размещения ВЭУ организуются измерения параметров ветра – средней максимальной скорости, направления ветра, повторяемости направления ветров (розы ветров). По результатам полученных параметров ветра или расчетным климатическим данным о них определяется ветроэнергетический потенциал (ВЭП) предполагаемой площадки размещения ВЭУ, оценивается ожидаемый выход электрической энергии, даются рекомендации по выбору ВЭУ [9]. На практике для определения ВЭП используют данные с опорных метеостанций, располагающихся на расстоянии до 40 км от площадки. Затем осуществляется пересчет для выбранной площадки с учетом высоты над уровнем моря и открытости местности.

Необходимо учитывать влияние рельефа местности на энергетические характеристики будущей ВЭУ. Характер поверхности размещения ВЭУ определяет возможное падение скорости ветрового потока, проходящего над поверхностью земли, а также изменение направления потока и возникновение касательных напряжений. При рассмотрении конкретной предполагаемой площадки размещения объекта ветроэнергетики нужно учитывать эффект влияния на поток изменений высоты рельефа вокруг площадки, например 5%-е увеличение высоты в ландшафте может иметь 5%-е воздействие на среднюю скорость ветра на уровне оси ветрогенератора, что приведет к 15%-му увеличению доступной мощности [10]. С учетом вышесказанного предпочтительным местом для размещения ВЭУ являются плоские вершины, а также местность, в ближайшем окружении которой отсутствуют высокие препятствия.

Характер грунта предполагаемой площадки влияет на фундамент будущей установки. От прочностных характеристик грунта зависят размер фундамента и глубина его заложения. Минимальная удаленность от жилых построек выбирается с учетом предельной величины допустимой акустической нагрузки от ветроагрегатов, которая не должна превышать для жилых районов 50 дБ днем и 35 дБ ночью [11].

Для оценки ветрового режима при отсутствии метеорологических станций в непосредственной близости от места предполагаемой установки ВЭУ прибегают к построению аналитической (теоретической) кривой повторяемости скорости ветра. Самыми распространенными для аппроксимации функции скорости ветра $f(v)$ в настоящее время являются функции Вейбулла и Рэлея. При этом из простых аналитических распределений скоростей ветра наиболее точные результаты в диапазоне скоростей 4–20 м/с получаются при использовании двухпараметрического распределения Вейбулла [11]

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{A} \right)^k \right], \quad (1)$$

где k – параметр формы в распределении Вейбулла, характеризует крутизну распределения, индекс; A – масштабный параметр в распределении Вейбулла, имеющий размерность скорости, характеризует масштаб изменения функции по оси скоростей [7]; $\exp(x)$ – экспоненциальная функция.

При этом полученные результаты имеют тенденцию к занижению по сравнению с экспериментальными данными.

Функция Рэлея имеет более сложный характер, требует дополнительных исходных данных и менее распространена. Рэлеевская плотность распределения вероятностей записывается в следующем виде:

$$f(v) = \frac{k}{\sigma^2} \exp \left[- \frac{v^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

где σ – параметр масштаба,

$$\sigma = \frac{v_{\text{ср}}}{\left(\frac{\pi}{2} \right)^{1/2}}, \quad (3)$$

$v_{\text{ср}}$ – среднегодовая скорость ветра, м/с.

Исходными данными для каждой площадки являются значения коэффициентов A , k и $v_{\text{ср}}$, полученные с использованием базы данных и программного обеспечения WindPro. Для их пересчета с учетом высоты применяется специальный коэффициент пропорциональности

$$K = \frac{\text{Ln} \left(\frac{h_{\text{мачты}}}{z_0} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{h_{\text{изм}}}{z_0} \right)}, \quad (4)$$

где $h_{\text{мачты}}$ – высота мачты ВЭУ, м; $h_{\text{изм}}$ – то же измерений, $h_{\text{изм}} = 80$ м; z_0 – размер шероховатости, м.

Территорию Республики Беларусь по особенностям рельефа можно отнести к четырем классам, каждый из которых характеризуется своими элементами шероховатости [5, с. 10]. Краткая характеристика каждого класса приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика классов шероховатости территорий Республики Беларусь
Surface roughness classes characteristic of the territory of the Republic of Belarus

Класс шероховатости	Характерная особенность	z_0 , м
0	Поверхность водохранилищ и озер	0,0002
1	Открытые области с небольшими лесозащитными полосами. Могут быть фермерские постройки, отдельно растущие деревья или кустарники	0,0300
2	Территория характеризуется большими открытыми областями между лесозащитными полосами, придающими ландшафту открытый внешний вид. Территория может быть ровной или слегка холмистой, на ней может быть множество деревьев и зданий	0,1000
3	Территории с городскими застройками, лесом или сельскохозяйственные земли с многочисленными лесозащитными полосами	0,4000

Для условий площадки в районе д. Яновичи (Новогрудский район) значения параметров следующие: $A = 7,28$ м/с; $k = 2,41$; $v_{cp} = 6,37$ м/с; высота 80 и 67 м. Результаты расчета распределения скорости ветра приведены на рис. 1 и в табл. 2.

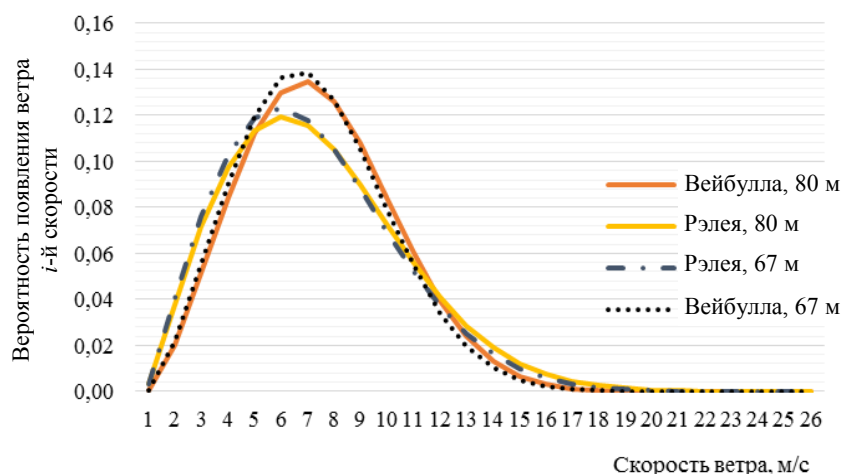


Рис. 1. Распределение скорости ветра на площадке

Fig. 1. The wind velocity distribution for the site

Как видно из табл. 2, ветрогенератор будет работать преимущественно в интервале скоростей ветра от 4 до 9 м/с. Наибольшая вероятность появления ветра со скоростью 6 м/с на высоте 67 м и 8 м/с на высоте 80 м. Данные показатели превосходят средние значения для стран с развитой ветроэнергетикой, таких как Германия и Нидерланды [12].

Таблица 2

**Результаты расчета распределения скорости ветра
для площадки в районе д. Яновичи (Новогрудский район)**

**The results of the calculations of wind velocity distribution
for the site near Yanovichy village (Novohrudok region)**

Скорость ветра, м/с	Дифференциальная повторяемость <i>i</i> -й скорости ветра (80 м)		Дифференциальная повторяемость <i>i</i> -й скорости ветра (67 м)	
	Вейбулла	Рэля	Вейбулла	Рэля
0	0,00066272074	0,0032355278	0,00071940773	0,00346179532
1	0,01998247320	0,0379695020	0,02167552680	0,04058932600
2	0,05121933398	0,0716550080	0,05538787799	0,07628632300
3	0,08428414523	0,0975679620	0,09057171515	0,10316823900
4	0,11236134176	0,1136064960	0,11953028869	0,11898605500
5	0,13008031866	0,1193048620	0,13640390598	0,12342996900
6	0,13457288382	0,1157103270	0,13844829115	0,11792873400
7	0,12610843929	0,1049637690	0,12664581610	0,10509630100
8	0,10777405859	0,0897304070	0,10508377263	0,08802450900
9	0,08427648099	0,0726420690	0,07932837712	0,06962794900
10	0,06038424453	0,0558765410	0,05454438309	0,05218813700
11	0,03965304210	0,0409349040	0,03415826781	0,03715338600
12	0,02385463371	0,0286115700	0,01946998318	0,02516657600
13	0,01313494815	0,0191051710	0,01008957265	0,01624151800
14	0,00661204280	0,0122003000	0,00474692309	0,00999666000
15	0,00303883051	0,0074568670	0,00202442873	0,00587306800
16	0,00127321127	0,0043651140	0,00078129304	0,00329567100
17	0,00048556124	0,0024486270	0,00027238743	0,00176736400
18	0,00016828411	0,0013168380	0,00008563377	0,00090616300
19	0,00005291665	0,0006791830	0,00002423274	0,00044437200
20	0,00001507235	0,0003360660	0,00000616129	0,00020849100
21	0,00000388238	0,0001595750	0,00000140497	9,36143E-05
22	0,00000090289	7,27284E-05	0,00000028682	4,0236E-05
23	0,00000018927	3,18225E-05	0,00000005232	1,65574E-05
24	0,00000003571	1,337E-05	0,00000000852	6,52457E-06
25	0,00000000605	5,3946E-06	0,00000000123	2,46241E-06
Проверка	1	1	1	1

Годовая выработка электроэнергии

$$\mathcal{E}_{\text{выр.год}} = \sum_{i=0}^{25} (p(v_i) P_{\text{ВЭУ}}(v_i)) \cdot 8760, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{выр.год}}$ – предполагаемая вырабатываемая турбиной за год мощность, кВт·ч; v_i – скорость ветра, м/с; $p(v_i)$ – дифференциальная повторяемость i -й скорости ветра; $P_{\text{ВЭУ}}(v_i)$ – мощность, вырабатываемая турбиной при данной скорости ветра.

Для характеристики технико-экономического совершенства ВЭУ воспользуемся коэффициентом использования установленной мощности ветроустановки $K_{\text{уст}}$. Данный параметр представляет собой отношение действительной выработки электроэнергии за какой-либо период времени (в статье рассмотрен год (8760 ч)) к максимально возможной выработке энергии [9]. Под максимально возможной выработкой электроэнергии принимается работа ВЭУ за рассматриваемый период с номинальной мощностью.

Результаты расчета выработки электрической энергии ветровыми турбинами различных конструкций мощностью 2 МВт приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Предполагаемая выработка электроэнергии
ветроэнергетической установкой мощностью 2 МВт**
The estimated power generation by the wind turbines with a capacity of 2 MW

Производитель	Высота, м	Диаметр ветроколеса, м	Выработка электрической энергии, кВт·ч		Коэффициент использования установленной мощности $K_{\text{уст}}$
			по Вейбуллу	по Рэлею	
Bonus	70	76	3833283,337	3533142,518	0,22735
Acciona	70	77	37572995,050	2877426,738	0,24687
Acciona	90	82	4959827,930	3943533,870	0,33831
Ecotecnia	90	80	4475920,040	3723931,032	0,28104
Fuhrlander	100	80	4872948,883	346885,077	0,23963
Gamesa	100	97	5689022,650	5463797,540	0,35159
Gamesa	120	114	7357492,340	6887328,497	0,44319
Vestas	120	104	6579307,943	60302260,019	0,38907

Таким образом, анализ результатов расчетов подтвердил предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэлея, а особенности ландшафта позволяют получить более высокие значения коэффициента использования установленной мощности по сравнению со среднестатистическими.

ВЫВОДЫ

1. Развитие ветроэнергетики следует соотносить с анализом уровня надежности работы ветряных электростанций – неуправляемостью потока

первичного энергоресурса, низким коэффициентом использования установленной мощности, остановом генератора при шквалистом ветре и обледенении лопастей.

2. Необходимость строительства электрической сети по сбору генерации и срок службы в пределах 25 лет требуют комплексного подхода при проведении технико-экономического обоснования, а географическая удаленность установок – дополнительных издержек на обслуживание и ремонт.

3. Экологическими особенностями следует считать неконтролируемое шумовое воздействие и инфразвуковые вибрации, а также проблему утилизации крупногабаритных элементов конструкции и фундаментов.

4. Природно-климатические условия Беларуси позволяют получить достаточные ветровые потоки на площадках с учетом ограничений на строительство сверхвысоких объектов.

5. Анализ результатов расчета параметров ветрового потока показал безусловную предпочтительность совместного применения функций Вейбулла и Рэля, дающих доверительную область аппроксимации функции скорости ветра.

6. Ландшафтные характеристики поверхности и отсутствие преград естественного и искусственного происхождения позволяют получить значения коэффициента использования установленной мощности ветряных электростанций от 35 до 44 %.

7. Наиболее вероятной перспективой ветровых станций следует считать развитие распределенной генерации при насыщении электрических сетей технологиями Smart Grid и уходе от монополии мощных электростанций и груза базовых издержек большой энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Республики Беларусь, 9 августа 2010 г., № 1180 // Электроэнергетический Совет Содружества Независимых Государств. Режим доступа: <https://bit.ly/2srBTyM>. Дата доступа: 12.04.2018.
2. О возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс]: Закон Республики Беларусь от 27.12.2010 № 204-3 // Законодательство Республики Беларусь. Режим доступа: <http://pravo.newsby.org/belarus/zakon0/z312.htm>. Дата доступа: 12.04.2018.
3. Pierpont, N. Wind Turbine Syndrome: a Report on a Natural Experiment / N. Pierpont. Santa Fe: K-Selected Books, 2009. 295 p.
4. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии Республики Беларусь [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Режим доступа: http://minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. Дата доступа: 12.04.2018.
5. Справочник по климату Беларуси / Государственный комитет по гидрометеорологии Республики Беларусь, Республиканский гидрометеоцентр. Минск: БелНИЦ «Экология», 2003. Ч. 4: Ветер. Атмосферное давление. 124 с.
6. Wind Energy Council. Global Wind Figures [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gwec.net>. Дата доступа: 25.11.2017.
7. Дебиев, М. В. Системная классификация факторов, определяющих выбор вариантов размещения объектов ветроэнергетики / М. В. Дебиев, Г. А. Попов // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 15–22.

8. Охрана окружающей среды и природопользование. Правила размещения и проектирования ветроэнергетических установок: ТКП 17.02-02–2010. Введ. 01.07.2010. Минск: Минприроды, 2010. 20 с.
9. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорологическая деятельность. Порядок проведения измерений параметров ветра и использования полученных данных при планировании размещения ветроэнергетических установок: ТКП 17.10-33–2011. Введ. 30.06.2011. Минск: Минприроды, 2010. 20 с.
10. Кодекс Республики Беларусь о Земле, 23 июля 2008 г., с изм. и доп. // Эталон-Беларусь [Электронный ресурс] / Нац. центр правовой информ. Республики Беларусь. Минск, 2014. Режим доступа: http://kodeksy-by.com/kodeks_rb_o_zemle.htm. Дата доступа: 12.04.2018.
11. Квитко, А. В. Характеристики ветра, особенности расчета ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 97. С. 359–374.
12. Key World Energy Statistics 2016 [Electronic Resource] / International Energy Agency. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/331140984/Energy-Statistics-2016>. Дата доступа: 12.10.2017.

Поступила 04.07.2018 Подписана в печать 11.09.2018 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. *Strategy of Development of Energy Potential of the Republic of Belarus: Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus*, 9 August 2010, No 1180. Available at: <https://bit.ly/2srBTyM>. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
2. *Renewable Energy Sources: Law of the Republic of Belarus*, 27 December 2010, No 204. Available at: <http://pravo.newsby.org/belarus/zakon0/z312.htm>. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
3. Pierpont N. (2009) *Wind Turbine Syndrome: a Report on a Natural Experiment*. Santa Fe, K-Selected Books. 295.
4. *State Cadastre of Renewable Energy Sources of the Republic of Belarus*. Available at: http://minpriroda.gov.by/ru/new_url_19948904-ru/. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
5. Gol'berg M. A. (ed.) (2003) *Reference Book on the Climate of Belarus. Part 4. Wind. Atmosphere Pressure*. Minsk, BelNIC "Ecology". 124 (in Russian).
6. *Wind Energy Council. Global Wind Figures*. Available at: <http://www.gwec.net>. (Accessed 25 November 2017.)
7. Debiev M. V., Popov G. A. (2011) System Classification of Factors Determining the Choice of Options for Placing of Wind Power Facilities. *Vestnik Astrakhanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser.: Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, (2), 15–22 (in Russian).
8. ТКП 17.02-02–2010. *Environmental Protection and Nature Management. Rules of Placement and Design of Wind Power Plants*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2010. 20 (in Russian).
9. ТКП 17.10-33–2011. *Environmental Protection and Nature Management. Hydrometeorological Activity. The Procedure for the Measurement of Wind Parameters and the Use of the Data Obtained when Planning the Placement of Wind Power Plants*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2010. 20 (in Russian).
10. *Land Code of the Republic of Belarus*, 23 July 2008. Available at: http://kodeksy-by.com/kodeks_rb_o_zemle.htm. (Accessed 12 April 2018) (in Russian).
11. Kvitko A. V., Khitskova A. O. (2014) Characteristics of Wind, Specific Features of Calculation of Resource and Economic Efficiency of Wind Energy. *Nauchnyi Zhurnal KubGAU = Scientific Journal of KubSAU*, (97), 359–374 (in Russian).
12. International Energy Agency (2016) *Key World Energy Statistics 2016*. Available at: <http://www.iea.org>. (Accessed 12 October 2017).

Received: 4 July 2018

Accepted: 11 September 2018

Published online: 29 March 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>

УДК 621.311.001.57

Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink

Д. И. Зализный¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Предложена новая Simulink-модель фотоэлемента, ориентированная на использование стандартной библиотеки элементов систем электроснабжения SimPowerSystems из программного пакета MatLab/Simulink. Модель позволяет изменять значения солнечного излучения, температуры фотоэлемента и сопротивления нагрузки. Результатами работы модели являются расчетные значения напряжений и токов на выходе фотоэлемента. Разработанная Simulink-модель реализует известную зависимость вольт-амперной характеристики фотоэлемента путем использования как стандартных блоков MatLab/Simulink, так и специальных электротехнических блоков библиотеки SimPowerSystems. Модель отличается тем, что последовательное и параллельное сопротивления фотоэлемента в ней выполнены в виде резисторов из библиотеки SimPowerSystems. Основной алгоритм расчета реализован программным путем с использованием языка программирования «С». Для повышения устойчивости алгоритма к алгебраическим циклам введены параметры ограничений. Предложена новая методика расчета параметров модели фотоэлемента на основе экспериментальных данных. Методика предполагает составление системы уравнений с экспериментальными значениями напряжений и токов фотоэлемента. Для фотоэлектрического модуля OSP XTP 250 выполнены экспериментальные исследования в условиях различных значений солнечного излучения, показавшие, что относительная погрешность разработанной Simulink-модели не превышает 12 %. Simulink-модель позволяет формировать фотоэлектрические модули и затем схемы фотоэлектростанций в составе систем электроснабжения. Благодаря этому можно имитировать работу потребителей электроэнергии, погодные условия, наличие теней или загрязнения на поверхности фотоэлектрических модулей, выполнять имитацию развивающихся неисправностей в фотоэлектрических модулях электростанции (например, имитацию снижения КПД модулей из-за их деградации или увеличение их последовательного сопротивления из-за ухудшения внутренних контактов). Разработанная Simulink-модель может быть использована на этапе как проектирования, так и эксплуатации фотоэлектростанций.

Ключевые слова: Simulink, модель фотоэлемента, вольт-амперная характеристика, SimPowerSystems, последовательное сопротивление, алгебраический цикл, ограничения

Для цитирования: Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>

Адрес для переписки

Зализный Дмитрий Иванович
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48а, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

Address for correspondence

Zalizny Dmitry I.
Sukhoi State Technical University
of Gomel
48a, housing 2 October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by

Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library

D. I. Zalizny¹⁾

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

Abstract. A new Simulink model of a photovoltaic cell has been proposed. The model is focused on the use of a standard SimPowerSystems library with power engineering elements from the MatLab/Simulink software package. The model allows altering the values of solar irradiance, photovoltaic cell temperature and load resistance. The results of the model application are the calculated values of voltages and currents at the photovoltaic cell output. The Simulink model that has been developed implements the known dependence of the photovoltaic cell volt-ampere characteristic by using both standard MatLab/Simulink blocks and special electric SimPowerSystems library blocks. The model is characterized by the fact that the series and parallel resistance of the photovoltaic cell are made in the form of resistors from the SimPowerSystems library. The main calculation algorithm is implemented programmatically by using the “C” programming language. To increase the algorithm stability to algebraic cycles the restrictions parameters are introduced. A new technique of calculating the photovoltaic cell model parameters based on experimental data has been proposed. The technique includes the preparation of a system of equations with experimental values of the photovoltaic cell voltages and currents. Experimental tests have been carried out for the photovoltaic module OSP XTP 250 under different solar irradiance values. The tests showed that the relative error of the Simulink model that has been developed does not exceed 12 %. The Simulink model makes it possible to build photovoltaic modules and then to build schemes of photovoltaic power plants as a part of power supply systems. Due to the latter it is possible to simulate the electricity consumers’ work, weather conditions, and the presence of shadows or pollution on the surface of photovoltaic modules. Also, one can carry out a simulation of increasing failures in power plant photovoltaic modules, e.g. simulating of modules efficiency reducing because of their degradation, or simulating of modules series resistance increasing because of the photovoltaic cell internal contacts deterioration. The Simulink model that has been developed can be used both at the design stage and at the stage of photoelectric power plants operation.

Keywords: Simulink, photovoltaic cell model, volt-ampere characteristic, SimPowerSystems, series resistance, algebraic cycle, restrictions

For citation: Zalizny D. I. (2019) Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145> (in Russian)

Введение

Программный пакет MatLab/Simulink широко используется в технике для математического моделирования процессов и проведения вычислительных экспериментов. Он содержит как базовые элементы моделирования, так и множество дополнительных библиотек. Для задач энергетики наиболее актуальной является библиотека SimPowerSystems, имеющая электротехнические элементы и позволяющая формировать схемы систем электроснабжения с целью анализа их работы. К сожалению, стандартная модель фотоэлемента, содержащаяся в этой библиотеке, ограничена в выполнении всех необходимых настроек.

В литературе присутствует ряд разработок моделей фотоэлектрических модулей и фотоэлементов для MatLab/Simulink. Так, в [1–11] предложены модели, реализуемые на основе базовых блоков Simulink, что серьезно затрудняет их использование в библиотеке SimPowerSystems и последующее

моделирование элементов фотоэлектростанции, поскольку блоки библиотеки SimPowerSystems нельзя рассматривать как чисто математические. Эти блоки выполняют расчеты напряжений и токов и не совместимы напрямую с базовыми блоками Simulink. Чтобы выполнить такое совмещение, требуются специальные методики, не описываемые в [1–11].

В [12, 13] рассматриваются модели, использующие, помимо стандартных блоков Simulink, непосредственно блоки библиотеки SimPowerSystems по известной методике с применением управляемого источника тока. Однако в [12, 13] нет четких рекомендаций по определению неизвестных параметров моделей для фотоэлектрических модулей различных марок. Кроме того, авторами не раскрывается проблема ограничений расчетов из-за наличия экспоненциальных функций с большими показателями степени, а также проблема алгебраических циклов, обусловленных обратными связями в структуре модели, из-за чего на некоторых диапазонах изменения входных величин алгоритмы теряют устойчивость.

Цель представленных исследований – создать удобную модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems, позволяющую формировать схемы фотоэлектростанций в составе систем электроснабжения.

Теоретическая вольт-амперная характеристика фотоэлемента

Во всех рассмотренных публикациях [1–13] и в учебнике [14] приводится схема замещения фотоэлемента (одной ячейки фотоэлектрического модуля), показанная на рис. 1.

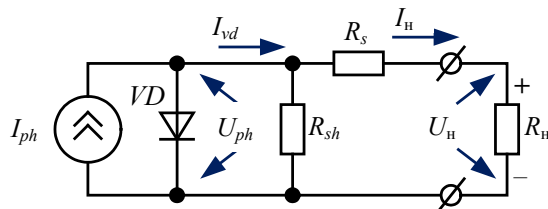


Рис. 1. Схема замещения фотоэлемента

Fig. 1. Equivalent scheme of a photovoltaic cell

Необходимо отметить, что в зарубежных публикациях в схемах замещения источники тока обозначают так, как в отечественных схемах замещения принято изображать источники ЭДС.

В схеме на рис. 1 источник тока I_{ph} и диод (p – n -переход) VD реализуют основную часть вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлемента $I_{vd}(U_{ph})$ в соответствии с формулой [14, с. 125]

$$I_{vd} = I_0 \left(e^{\frac{qU_{ph}}{K_B\theta}} - 1 \right) - I_{ph} \approx I_0 \left(e^{\frac{11594,2U_{ph}}{\theta}} - 1 \right) - I_{ph}, \quad (1)$$

где I_{vd} – суммарный ток через p – n -переход фотоэлемента, А; I_0 – обратный ток p – n -перехода при отсутствии солнечного излучения, А; q – заряд элект-

рона, Кл; K_B – постоянная Больцмана, Кл·В/К; U_{ph} – напряжение, генерируемое фотоэлементом, В; θ – температура p – n -перехода, К; I_{ph} – дополнительный ток через p – n -переход, обусловленный солнечным излучением (фототок), А.

Для фототока I_{ph} будем рассматривать упрощенную зависимость от солнечного излучения

$$I_{ph} = K_{ph} S, \quad (2)$$

где K_{ph} – коэффициент пропорциональности, А·м²/Вт; S – солнечное излучение, Вт/м².

Параллельное сопротивление R_{sh} характеризует токи утечки изоляции фотоэлемента, а последовательное сопротивление R_s – качество его контактов. Таким образом, ток нагрузки I_n учитывает как значение тока I_{vd} , так и влияние дополнительных сопротивлений R_{sh} и R_s .

Очевидно, что общая ВАХ фотоэлемента $U_n(I_n)$ представляет собой сумму ВАХ всех элементов на схеме замещения рис. 1. Однако поскольку линейное сопротивление R_{sh} подключено параллельно нелинейному элементу VD и значение этого сопротивления имеет порядок мегаом, его влиянием на напряжение нагрузки U_n можно пренебречь.

Отдельные составляющие и суммарная ВАХ фотоэлемента изображены на рис. 2. При этом на рис. 2а общая ВАХ $U_n(I_n)$ построена как сумма ВАХ $I_{vd}(U_{ph})$ и ВАХ сопротивления R_s по отношению к оси тока.

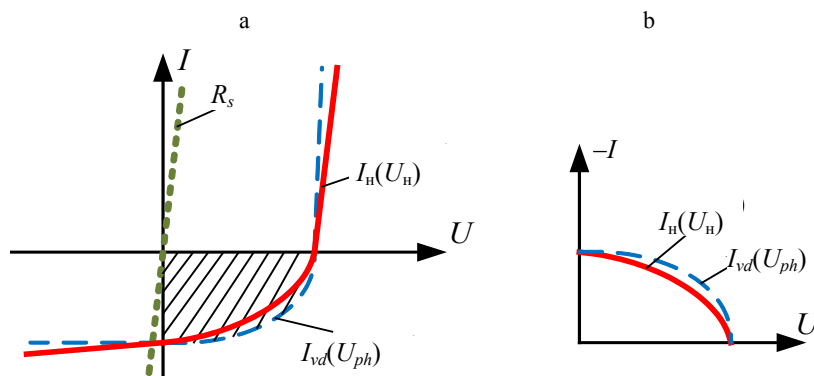


Рис. 2. Теоретические вольт-амперные характеристики фотоэлемента:
а – исходные; б – инверсные

Fig. 2. Theoretical volt-ampere characteristics of a photovoltaic cell:
a – base; b – inverted

Область генерации, заштрихованная на рис. 2а, является рабочей областью фотоэлемента. Ее принято изображать отдельно на инверсной шкале тока (рис. 2б). Далее будем использовать только эту инверсную шкалу.

Расчет параметров модели по экспериментальным данным

Для разрабатываемой Simulink-модели солнечное излучение S и температура фотоэлемента θ являются входными величинами. Их необходимо

изменять в процессе имитации требуемых условий. Результатами работы модели должны быть значения напряжения U_n и тока I_n .

Таким образом, в соответствии с (1) и (2) априори неизвестными параметрами модели являются величины I_0 , I_{ph} и K_{ph} . Разработаем методику их расчета на основе результатов экспериментальных исследований.

Предположим, что имеется экспериментальная ВАХ $I(U)$ некоторого фотоэлектрического модуля, содержащего n фотоэлементов. Рассмотрим две крайние точки на этой ВАХ: одну, близкую к режиму короткого замыкания со значениями I_1 и U_1 , а другую, близкую к режиму холостого хода со значениями I_2 и U_2 . Приняв допущение, что все фотоэлементы модуля идентичны по параметрам, в соответствии с (1) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - 1 \right) - I_{ph}; \\ I_2 = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_2}{\theta n}} - 1 \right) - I_{ph}, \end{cases} \quad (3)$$

где θ – температура модуля во время проведения эксперимента, К; n – количество фотоэлементов в модуле.

Выразив из (3) неизвестные, с учетом (2) запишем необходимые расчетные соотношения:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_1 - I_2}{e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - e^{\frac{11594,2 U_2}{\theta n}}}; \\ I_{ph} = I_0 \left(e^{\frac{11594,2 U_1}{\theta n}} - 1 \right) - I_1; \\ K_{ph} = \frac{I_{ph}}{S}, \end{cases} \quad (4)$$

где S – значение солнечного излучения во время эксперимента, Вт/м².

Отметим, что если выражения (4) использовать для всего модуля ($n = 1$), то значения экспонент превысят e^{1000} , что сопряжено с трудностями применения в сложных алгоритмах. В научной литературе [1–13] эта проблема почему-то не раскрыта.

На кафедре «Электроснабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого были выполнены измерения ВАХ фотоэлектрического модуля Orange Solar OSP XTP 250, содержащего 60 последовательно соединенных фотоэлементов ($n = 60$), с помощью специального прибора SOLAR I-Vw фирмы HT-ITALIA.

Результаты измерений: $S = 1018,2 \text{ Вт/м}^2$; $\theta = 48,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_1 = 8,372 \text{ А}$; $U_1 = 6,5 \text{ В}$; $I_2 = 0,065 \text{ А}$; $U_2 = 33,49 \text{ В}$.

Результаты расчетов по (4): $I_0 = -1,514 \cdot 10^{-8} \text{ А}$; $I_{ph} = -8,372 \text{ А}$; $K_{ph} = 8,222 \cdot 10^{-3} \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$.

В соответствии со схемой замещения на рис. 1 неизвестными параметрами модели также являются значения сопротивлений R_{sh} и R_s . Как уже было сказано, значение R_{sh} не оказывает существенного влияния на работу модели, поэтому его можно принять порядка 100 МОм для одного фотоэлемента.

Значение последовательного сопротивления R_s , наоборот, существенно влияет на результаты, особенно при высоких токах нагрузки. Определять это сопротивление будем графически по ВАХ в соответствии с рис. 2. Для этого необходимо построить разность по отношению к оси тока между экспериментальной ВАХ и теоретической ВАХ, рассчитанной по формуле (1). Результаты показаны на рис. 3.

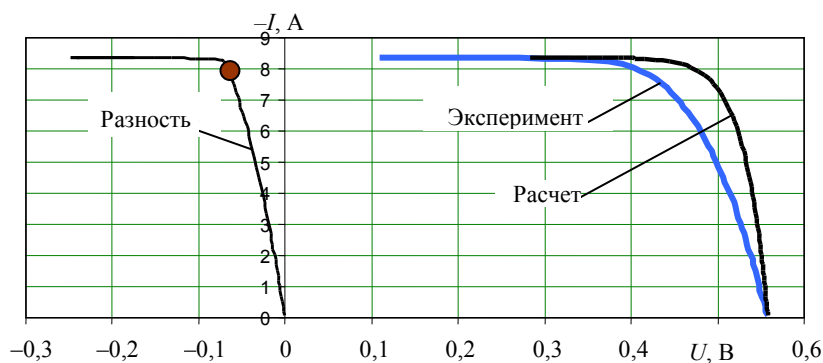


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для одного фотоэлемента модуля OSP XTP 250

Fig. 3. Volt-ampere characteristics for a photovoltaic cell of the OSP XTP 250 module

Из рис. 3 видно, что в той области, где расчетные значения отличаются от экспериментальных, кривая разности близка к прямой. Это согласуется с рис. 2а.

Расчет значения последовательного сопротивления R_s будем выполнять по крайней точке прямой ВАХ (жирная точка на рис. 3). В результате получим

$$R_s \approx \frac{-0,067}{-8,04} \approx 0,008 \text{ Ом.}$$

Предлагаемая модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems

Внешняя схема предлагаемой Simulink-модели фотоэлемента показана на рис. 4, а внутренняя – на рис. 5.

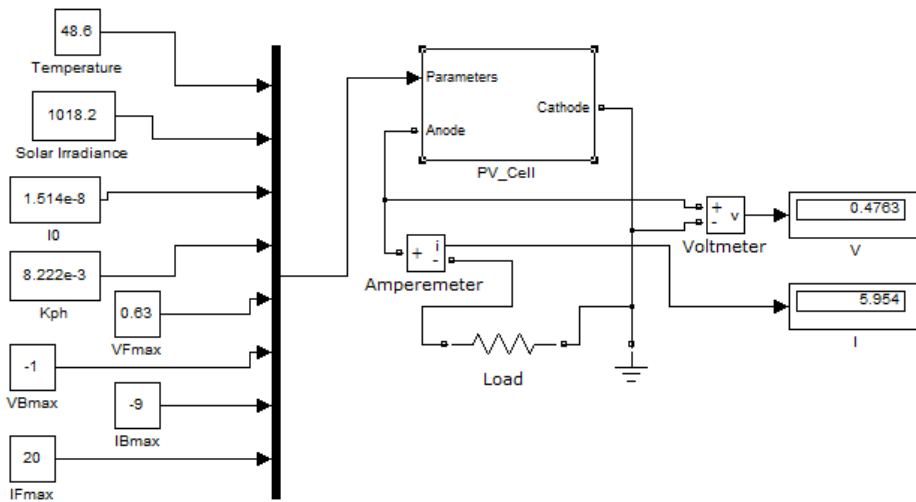


Рис. 4. Внешняя схема разработанной Simulink-модели фотоэлемента

Fig. 4. Outside scheme of the developed Simulink-model of a photovoltaic cell

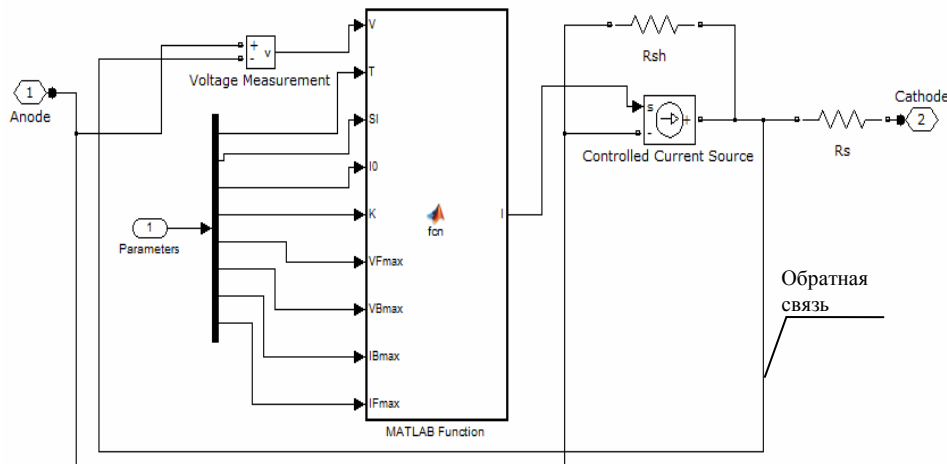


Рис. 5. Внутренняя схема разработанной Simulink-модели фотоэлемента

Fig. 5. Inside scheme of the Simulink-model of a photovoltaic cell that has been developed

Модель работает следующим образом. Для пользователя предложены восемь входных параметров: температура фотоэлемента ($^{\circ}\text{C}$); солнечное излучение ($\text{Вт}/\text{м}^2$); параметры модели I_0 и K_{ph} , расчет которых описан выше; параметры ограничений расчета $VF_{\max}$, $VB_{\max}$, $IB_{\max}$, $IF_{\max}$.

Параметры ограничений необходимы для предотвращения потери устойчивости алгоритма из-за наличия алгебраического цикла, обусловленного обратной связью (рис. 5). Эти параметры имеют следующий смысл: $VF_{\max}$ – максимальное прямое напряжение фотоэлемента; $VB_{\max}$ – максимальное обратное напряжение фотоэлемента; $IF_{\max}$ – максимальный прямой ток фотоэлемента; $IB_{\max}$ – максимальный обратный ток фото-

элемента. Значения этих параметров можно принять в соответствии с паспортными характеристиками фотоэлектрического модуля, учитывая, что значения напряжений нужно делить на количество фотоэлементов n в модуле.

Нагрузку фотоэлемента в предлагаемой модели можно изменять с помощью сопротивления Load, контролируя значения напряжения и тока. Связь между математической и электрической частями схемы модели осуществляется по известной методике для библиотеки SimPowerSystems с использованием управляемого источника тока Controlled Current Source.

Сопротивления схемы замещения фотоэлемента (рис. 1) R_{sh} и R_s представлены как электрические элементы библиотеки SimPowerSystems, что принципиально отличает предлагаемую модель от моделей [12, 13]. Для рассматриваемого модуля приняты следующие значения этих параметров: $R_{sh} = 100$ МОм; $R_s = 0,008$ Ом (расчет приведен выше).

Алгоритм расчета вольт-амперной характеристики в соответствии с (1), (2) и с учетом ограничений реализован в блоке MatLab Function на языке программирования «С». Фрагмент листинга программы показан на рис. 6.

```
qb=11594.2; % Заряд электрона, деленный на постоянную Больцмана
% Условия ограничений по напряжению
if (V>VFmax)
V=VFmax;
end
if (V<VBmax)
V=VBmax;
end
% Расчет вольт-амперной характеристики
i=I0*(exp(qb*V/(T+273))-1)-K*SI;
% Условия ограничений по току
if (i<IBmax)
I=IBmax;
else (i>IFmax)
I=IFmax;
end
```

Рис. 6. Фрагмент листинга программы расчета вольт-амперной характеристики

Fig. 6. Part of a program routine for volt-ampere characteristic calculating

Экспериментальная проверка точности разработанной Simulink-модели

Для проверки адекватности предлагаемой модели на кафедре «Электро-снабжение» ГГТУ имени П. О. Сухого выполнены экспериментальные исследования с использованием описанного выше оборудования, которые проводились в яркий солнечный день. Для получения разных значений солнечного излучения осуществлялись изменение и измерение угла поворота фотоэлектрического модуля относительно земли. Измеренные параметры для различных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условия проведения экспериментов

Experimental tests conditions

№ эксперимента	1	2	3	4
Угол, град	90°	60°	45°	20°
S , Вт/м ²	683,9	1018,2	1022,7	970,2
θ , °C	47,7	48,6	48,8	47,7

Экспериментальные и полученные по Simulink-модели ВАХ в соответствии с условиями экспериментов в табл. 1 показаны на рис. 7.

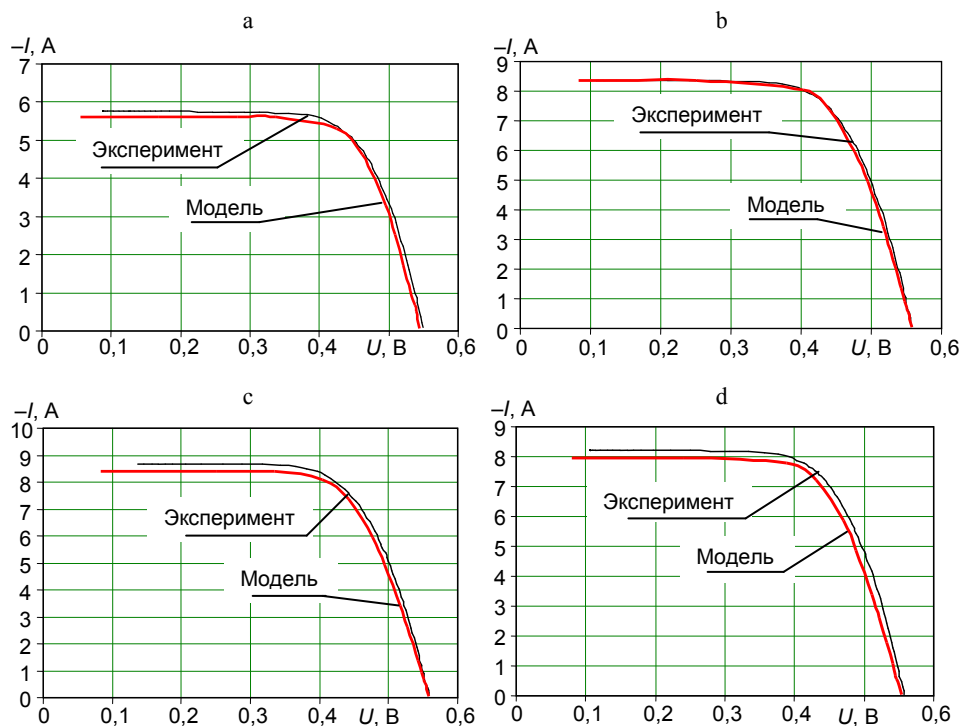


Рис. 7. Экспериментальные и смоделированные вольт-амперные характеристики:

a – эксперимент № 1; b – № 2; c – № 3; d – № 4

Fig. 7. Experimental and simulated volt-ampere characteristics:

a – test No 1; b – No 2; c – No 3; d – No 4

Максимальная абсолютная погрешность расчета тока по предлагаемой Simulink-модели не превысила 0,5 А, т. е. максимальная относительная погрешность по току составила около 12 %. Это можно считать приемлемым результатом для практических целей, однако вместе с тем очевидно, что разработанная модель нуждается в дальнейших усовершенствованиях.

Области применения разработанной Simulink-модели

На основе предложенной модели фотоэлемента можно реализовать модель фотоэлектрического модуля, соединив необходимое количество фотоэлементов последовательно. Затем, соединяя модели модулей параллельно

или последовательно, можно получить имитационную модель генерирующей части фотоэлектростанции.

Изменение сопротивления нагрузки в схеме Simulink-модели позволяет имитировать работу потребителей электроэнергии, а изменение значений солнечного излучения – погодные условия, наличие теней на поверхности модулей или же их загрязнение. Если изменять параметры самой модели, такие как R_s , K_{ph} или I_0 , то можно выполнить имитацию развивающихся неисправностей в модулях электростанции. Например, имитацию снижения КПД модулей из-за их деградации или увеличение последовательного сопротивления из-за ухудшения внутренних контактов.

К сожалению, предложенная Simulink-модель не позволяет рассчитывать текущую температуру фотоэлементов, однако данная тематика – предмет дальнейших разработок автора.

ВЫВОДЫ

1. Существующие Simulink-модели фотоэлементов проблематично использовать в библиотеке SimPowerSystems, предназначенной для создания имитационных моделей систем электроснабжения.
2. В существующих Simulink-моделях фотоэлементов нет однозначной методики расчета всех неизвестных параметров модели фотоэлемента.
3. Разработана новая Simulink-модель фотоэлемента, удобная для использования в библиотеке SimPowerSystems.
4. Предложена новая методика расчета параметров модели фотоэлемента на основе экспериментальных данных.
5. Выполнены экспериментальные исследования, показавшие, что относительная погрешность разработанной Simulink-модели не превышает 12 %.
6. Разработанная Simulink-модель фотоэлемента может быть использована для имитации как нормальных, так и аномальных режимов работы фотоэлектростанций, а также на этапах проектирования и эксплуатации фотоэлектростанций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pandiarajan, N. Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink / N. Pandiarajan, R. Muthu // ICEES. 2011. P. 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Tsai, H-L. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MatLab/Simulink / H-L Tsai, C-S Tu, Su Y-J // WCECS. San-Francisco, 2008. P. 978–984.
3. MatLab/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell / T. Salmi [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research. 2012. Vol. 2, No 2. P. 213–218.
4. Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab / Krismadinata [et al.] // Procedia Environmental Sciences. 2013. No 17. P. 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.
5. Sheik, S. M. Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / S. M. Sheik // International Journal of Chemical and Environmental Engineering. 2011. Vol. 2, No 5. P. 350–355.
6. Nema, S. MatLab/Simulink Based Study of Photovoltaic Cells / Modules / Array and their Experimental Verification / S. Nema, R. K. Nema, A. Gayatri // International Journal of Energy and Environment. 2010. Vol. 1, No 3. P. 487–500.
7. Patel, J. Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink / J. Patel, S. Gaurag // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. 2013. Vol. 2, No 3. P. 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.
8. Habbati, B. A Detailed Modeling of Photovoltaic Module Using MatLab / B. Habbati, Y. Ramdani, F. Moulay // NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. 2014. No 3. P. 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>.

9. Abdulkadir, M. Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model / M. Abdulkadir, A. S. Samosir, A. H. M. Yatim // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012. Vol. 7, No 5. P. 616–623. <https://doi.org/10.1109/pecon.2012.6450231>.
10. Козюков, Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в MatLab/Simulink / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. Т. 8, № 112. С. 1577–1593.
11. Левшов, А. В. О математическом моделировании фотоэлектрических модулей / А. В. Левшов, А. Ю. Федоров // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика*. 2013. Т. 14, № 1. С. 153–158.
12. A MatLab-Simulink-Based PV Module Model and its Application under Conditions of Nonuniform Irradiance / Kun Ding [et al.] // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2012. Vol. 27, No 4. P. 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
13. A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox / S. Said [et al.] // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2012. Vol. 6. P. 1965–1975.
14. Foster, R. *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment* / R. Foster, M. Ghassemi, A. Cota // CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, 2010. 382 p. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.

Поступила 14.09.2018 Подписана в печать 20.11.2018 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. Pandiarajan N., Muthu R. (2011) Mathematical Modeling of Photovoltaic Module with Simulink. *1st International Conference on Electrical Energy Systems*, 314–319. <https://doi.org/10.1109/icees.2011.5725339>.
2. Tsai H-L., Tu C-S, Su Y-J. (2008) Development of Generalized Photovoltaic Model Using MatLab/Simulink. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008WCECS 2008*. San-Francisco, 978–984.
3. Salmi T., Bouzguenda M., Gastli A., Masmoudi A. (2012) MatLab/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2 (2), 213–218.
4. Krismadinata, Nasrudin Abd. Rahim, Hew Wooi Ping, Jeyraj Selvaraj (2013) Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/MatLab. *Procedia Environmental Sciences*, (17), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.
5. Sheik S. Mohammed (2011) Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2 (5), 350–355.
6. Nema S., Nema R. K., Gayatri Agnihotri. (2010) MatLab/Simulink Based Study of Photovoltaic Cells / Modules / Array and their Experimental Verification. *International Journal of Energy and Environment*, 1 (3), 487–500.
7. Patel J., Gaurag Sharma (2013) Modeling and Simulation of Solar Photovoltaic Module Using MatLab/Simulink. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (3), 225–228. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0203003>.
8. Habbati B., Ramdani Y., Moulay F. (2014) A Detailed Modeling of Photovoltaic Module Using MatLab. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, (3), 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2014.04.001>.
9. Abdulkadir M., Samosir A. S., Yatim A. H. M. (2012) Modeling and Simulation Based Approach of Photovoltaic System in Simulink Model. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (5), 616–623. <https://doi.org/10.1109/pecon.2012.6450231>.
10. Kozuykov D. A., Tsygankov B. K. (2015) Modeling of Photovoltaic Modules Characteristics by Using MatLab/Simulink. *Nauchnyi Zhurnal Kubanskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Scientific Journal of KubSAU*, 8 (112), 1577–1593 (in Russian).
11. Levshov A.V., Fedorov A. Yu. (2013) Mathematical Modeling of Photovoltaic Modules. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Elektrotekhnika i Energetika Research* [Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical Engineering and Power Engineering"], 14 (1), 153–158 (in Russian).
12. Kun Ding, XinGao Bian, HaiHao Liu, Tao Peng (2012) MatLab-Simulink-Based PV Module Model and Its Application under Conditions of Nonuniform Irradiance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27 (4), 864–872. <https://doi.org/10.1109/tec.2012.2216529>.
13. Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. (2012) A MatLab/Simulink-Based Photovoltaic Array Model Employing SimPowerSystems Toolbox. *Journal of Energy and Power Engineering*, 6, 1965–1975.
14. Foster R., Ghassemi M., Cota A. (2010) *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press Taylor & Francis Group. 382. <https://doi.org/10.1201/9781420075670>.

Received: 14 September 2018 Accepted: 20 November 2018 Published online: 29 March 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>

UDC 622.279:658.58

Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating

A. A. Belsky¹⁾, V. A. Morenov¹⁾, K. S. Kupavykh¹⁾, M. S. Sandyga¹⁾

¹⁾Saint-Petersburg Mining University (Saint-Petersburg, Russian Federation)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. In this article, the authors reviewed a new technology to prevent the formation of asphalt-resin-paraffin deposits by the thermal method of electrothermal impact on the oil wellbore shaft using a wind-electric installation as an autonomous power source. The advantage of this thermal stimulation technique lies in its continuous nature, which will allow keeping the clear opening of the tubing constant. The scheme of the autonomous system for down-hole electric heating of oil is presented. A tubular or induction heater can serve as an electric heating element placed in the well. The heating element of the system can be used in the wells exploited by free-flow, gas lift and mechanized methods, while its installation does not require an overhaul. The paraffin oil saturation temperature and temperature distribution over the depth of the well were defined. The amount of heat, which must be transferred to the oil mixture in the tubing in order to ensure effective operation of the well, taking into account the dynamic state of the system, is calculated. The optimal depth of the heating element's location in the well and its power was determined. The calculation of the required power for wind-electric installation to maintain the set temperature in the wellbore was performed. Having conducted the studies, it was revealed that in order to prevent the asphalt-resin-paraffin deposits formation on the tubing walls of oil wells, it is expedient to use the in-line heater, which maintains the average steady-state temperature along the wellbore and at the wellhead above the initial crystallization point of the asphalt-resin-paraffin deposits. The application of the developed electrothermal system is relevant in the conditions of formation of asphalt-resin-paraffin deposits in the wellbore shaft at the fields, which do not have a connection to the centralized power grid.

Keywords: asphalt-resin-paraffin deposits, oil well, wind-electric installation, tubing, electrothermal impact, thermal method

For citation: Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. (2019) Wind Turbine Electrical Energy Supply System for Oil Well Heating. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 146–154. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>

Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки

A. A. Бельский¹⁾, В. А. Моренов¹⁾, К. С. Купавых¹⁾, М. С. Сандыга¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский горный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Реферат. Рассмотрена новая технология предупреждения образования асфальтосмолопарафиновых отложений тепловым методом электротермического воздействия на ствол нефтя-

Адрес для переписки

Моренов Валентин Анатольевич
Санкт-Петербургский горный университет
Васильевский остров 21 линия, д. 2,
199106, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация
Тел.: +7 812 328-82-20
morenov@spmi.ru

Address for correspondence

Morenov Valentin A.
Saint-Petersburg Mining University
2 Vasilevsky island 21st Line
199106, Saint-Petersburg,
Russian Federation
Tel.: +7 812 328-82-20
morenov@spmi.ru

ной скважины с применением ветроэлектрической установки в качестве автономного источника питания. Достоинством данного теплового способа воздействия является его непрерывный характер, что позволяет сохранять пропускное сечение насосно-компрессорных труб постоянным. Представлена схема автономного комплекса для внутрискважинного электропрогрева нефти. В качестве электронагревательного элемента, размещаемого в скважине, может выступать трубчатый или индукционный нагреватель. Нагревательный элемент комплекса может применяться в скважинах, эксплуатируемых фонтанным, газлифтным и механизированным способами, при этом для его установки не требуется проведения капитального ремонта. Определены температура насыщения нефти парафином и ее распределение по глубине скважины. Рассчитано количество теплоты, которое необходимо сообщить скважинной продукции в насосно-компрессорных трубах для обеспечения эффективного режима эксплуатации скважины с учетом динамического состояния системы. Установлены оптимальная глубина расположения нагревательного элемента в скважине и его мощность. Выполнен расчет необходимой мощности ветроэлектрической установки для поддержания заданной температуры в стволе скважины. Проведенные исследования показали, что для предотвращения образования асфальтосмолопарафиновых отложений на стенках насосно-компрессорных труб нефтяных скважин целесообразно использовать проточный электронагреватель, который обеспечивает поддержание средней установившейся температуры по стволу и на устье скважины выше точки начальной кристаллизации асфальтосмолопарафиновых отложений. Применение разработанного электротермического комплекса является актуальным в условиях образования асфальтосмолопарафиновых отложений в стволе скважины на месторождениях, не имеющих подключения к централизованной энергосистеме установки для поддержания заданной температуры в стволе скважины.

Ключевые слова: асфальтосмолопарафиновые отложения, нефтяная скважина, ветроэлектрическая установка, насосно-компрессорная труба, электротермическое воздействие, тепловой метод

Для цитирования: Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки / А. А. Бельский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 146–154. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154>

Introduction

Intra-field communications represent a single hydrodynamic network, which operation complexity is associated with constant thermobaric variations and phase conversions. One of the key problems of oil production is the formation of organic deposits on any of the technological levels of this system [1, 2]. The choice of methods to influence wells, their bottom-hole zone and the entire formation, optimization of the existing and developing new approaches to control deposits are the tasks of urgency, the solution of which will improve the technological efficiency and economic stability of oil production enterprises and the industry as a whole.

Paraffin deposits in wells and in the bottom-hole formation zone are the subject of a primary consideration in oil production industry.

The asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD), accumulating on the surfaces of the tubing, as well as in the pumping equipment and in the bottom-hole formation zone, result in a reduction in the overhaul period and in a decrease in the well performance efficiency [3, 4].

Currently, all methods of controlling deposits are divided into two main groups: methods of removing already formed deposits and methods of preven-

ting their formation. Due to a great variety of conditions for the development of oil fields, various technological parameters and geological and physical conditions, as well as fluid properties, it is expedient to use an individual comprehensive approach to the selection of technologies.

Fig. 1 presents classification according to which the following techniques of controlling the asphalt-resin-paraffin deposits are specified: chemical, physical, thermal, mechanical, smooth pipe coatings and integral action (applying several methods) [1, 5, 6].

The most efficient methods of controlling paraffin deposits are thermal methods of affecting the wellbore, based on the ability of the ARPD not to form a solid phase or melt at temperatures higher than the crystallization temperature of 35–50 °C [4, 6–9].

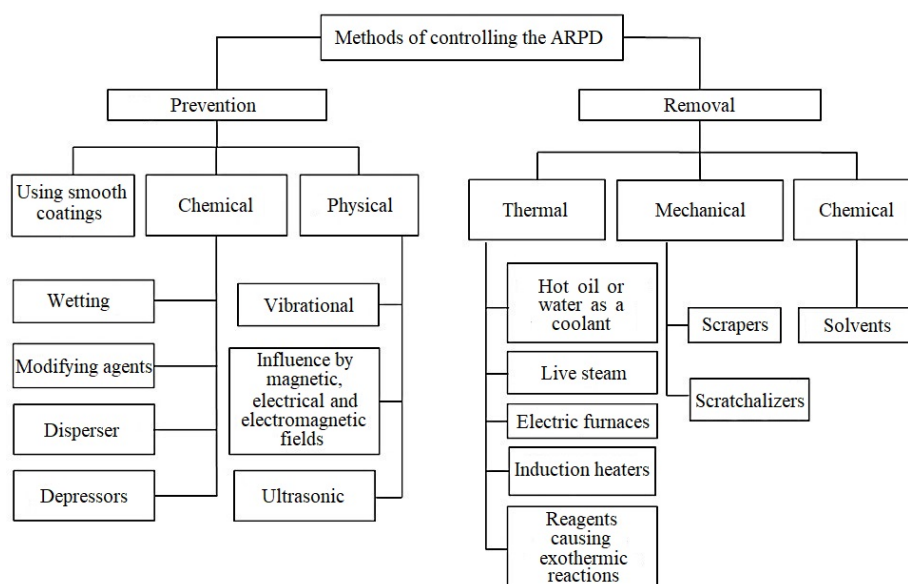


Fig. 1. Classification of methods of controlling the ARPD [5]

The article deals with the electro-thermal impact on the ARPD on the tubing walls in the well. The advantage of this thermal stimulation technique lies in its continuous nature, which will allow keeping the clear opening of the tubing constant. A tubular or induction heater can serve as an electric heating element placed in the well [10, 11]. The disadvantage of electric heating lies in its dependence on the presence and reliability of an external power supply system. Most present-day oil fields in Russia are located within remote areas, far from the centralized power supply system. The use of autonomous power supply systems on the basis of wind-driven power plants may be considered as an alternative to the reconstruction of old or construction of new electrical networks [12–14].

The aim of this work is to determine the required power of the wind-driven power plant to ensure the efficiency of the down-hole heating element operation to prevent the ARPD formation.

Scheme of the system

Electric heating is carried out using a heating element, placed directly in the inner space of the tubing in the well, which allows heating any types of wells when implementing free-flow, gas-lift and electromechanical methods of oil production [15]. Such a scheme for implementation of electric heating does not require underground work, and in some cases it does not need well shut-down [16]. The process of lowering the heating element is carried out using a load-carrying cable and complies with standard work with geophysical instruments. The tubular or induction electric heating element is in contact with down-hole fluid, so the heat transfer goes directly into the fluid [17].

The structure of the autonomous system for down-hole electric heating of oil comprises (fig. 2): 1 – wind-driven power plant; 2 – feeding cable; 3 – oil heating unit control station; 4 – power cable; 5 – temperature sensor cable; 6 – terminal cabinet; 7 – safety lock; 8 – load-carrying cable; 9 – thermowell temperature sensor cable; 10 – lubricating device; 11 – tmain lock; 12 – wellhead equipment; 13 – thermowell with temperature sensor; 14 – receiving pipeline; 15 – tubing; 16 – casing string; 17 – electric heater.

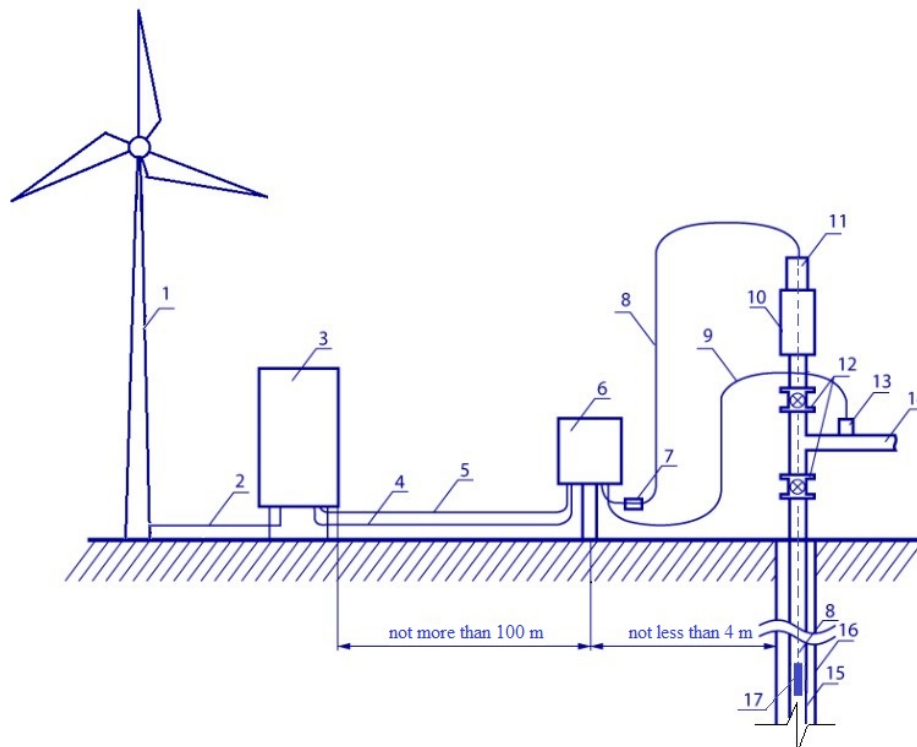


Fig. 2. Schematic view of an autonomous system for down-hole electric heating of oil

Calculating the depth of lowering the heating element

As a source data for lowering the heating cable, the well of one of the fields in Western Siberia was selected. The selected well parameters are presented in tab. 1.

Table 1

Parameters of the well

Well production rate for liquid under standard conditions (m ³ /day)	Q_V	35
Well depth (m)	L	2900
Gas to oil ratio (m ³ /m ³)	G	29.2
Average value of the well angle of slope (deg.)	α	9
Formation pressure (MPa)	P	27
Production string inner diameter (m)	D	0.15
Formation oil density(kg/m ³)	ρ_{oil}	748.3
Oil specific heat (J/(kg·K))	c_{oil}	880
Coefficient of water cut	b	0.75
Formation water density (kg/m ³)	ρ_w	1050
Formation water specific heat (J/(kg·K))	c_w	4100
Formation temperature (K)	T_l	364
Inner diameter of the tubing (m)	d	0.0503

The composition of the ARPD selected from the wellhead (selection date: December 10th, 2005) is as follows: asphaltenes – 2.45 %, resins – 12.5 %, paraffins – 4.4 %. The melting temperature of paraffin, extracted from degassed oil under laboratory conditions, is 62–70 °C.

Determining the paraffin saturation point for oil

When determining the paraffin saturation point for oil, the formula, recommended by All-Russia Institute for Oil and Gas Research (“VNIIneft”), is used [3]:

$$t = t_0 + 0.2P - 0.1G = 33.33 + 0.2 \cdot 27 - 0.1 \cdot 29.2 = 35.81 \text{ } ^\circ\text{C} = 308.81 \text{ K};$$

$$t_0 = 11.398 + 34.084 \lg C_p = 11.398 + 34.084 \lg 4.4 = 33.33 \text{ } ^\circ\text{C},$$

where t – paraffin saturation point under the formation conditions, K; t_0 – paraffin saturation point under the surface conditions, °C; P – formation pressure, MPa; G – gas to oil ratio, m³/m³; C_p – paraffin concentration in oil, %.

Mass paraffin precipitation begins in the well at a depth corresponding to the temperature of paraffins crystallization initial point. Within the subsequent interval, massive formation of paraffins takes place, and closer to the wellhead and in the onshore pipelines, deposits in the form of resins occur [18, 19].

Temperature distribution over the well depth

The temperature distribution along the depth of the well can be presented by the formula [3]

$$T(H) = T_l - (L - H) \cdot \frac{0.0034 + 0.79\omega \cos \alpha}{10^{Q_V / (86400 \cdot 20 d^{2.67})}},$$

where T_l – formation temperature, K; L – well depth, m; H – current depth, measured from the wellhead, m; α – well angle of inclination from the vertical, deg.; Q_V – well production rate for liquid under standard conditions, m³/day; d – inner diameter of the tubing, m; ω – geothermal gradient, deg./m, calculated using the formula

$$\omega = \frac{T_l - T_n}{(L - H_n) \cos \alpha} = \frac{364 - 278}{(2900 - 20) \cos 9^\circ} = 0.03023,$$

where T_n – neutral layer temperature, K; H_n – neutral layer depth, m.

The temperature of the neutral layer for the oil area of Western Siberia is set as $T_n = 278$ K. The depth of the neutral layer below the earth's surface varies from 20 to 40 m, in this paper let us set it as $H_n = 20$ m.

Example of calculating the down-hole temperature at a depth of 100 m

$$T(H) = 364 - (2900 - 100) \cdot \frac{0.0034 + 0.79 \cdot 0.03023 \cdot \cos 9^\circ}{10^{\frac{35}{(86400 \cdot 20 - 0.0503^{2.67})}}} = 298.1 \text{ K.}$$

The results of calculating the temperature distribution over the well depth from 0 to 1500 m are presented in fig. 3. Thus, it may be concluded that the heating element must be lowered to a depth of 600 m.

Depth, m	Temperature, K	
0	295.7	
100	298.1	
200	300.4	
300	302.8	
400	305.1	
500	307.5	
600	309.9	The paraffin saturation point for oil
700	312.2	The depth of lowering the heating element
800	314.6	
900	316.9	
1000	319.3	
1100	321.6	
1200	324.0	
1300	326.3	
1400	328.7	
1500	331.0	

Fig. 3. Temperature distribution along the depth of the well

Heat calculation

Let us determine the amount of heat, required for in-line heating of the water-oil mixture in a well with a specified production rate using the formula

$$Q = c_{mix} m \Delta T,$$

where Q – amount of heat, received by the substance during heating, J; c_{mix} – specific heat of the water-oil mixture, J/(kg · K); m – mass of the heated water-oil mixture, kg; ΔT – difference between the final and initial temperatures of the substance, K.

The specific heat of the water-oil mixture is determined by

$$c_{mix} = c_{oil}(1 - b) + c_w b = 880 \cdot (1 - 0.75) + 4100 \cdot 0.75 = 3295 \text{ J/(kg · K)},$$

where c_{oil} – specific heat of oil, J/(kg·K); c_w – specific heat of formation water, J/(kg·K); b – coefficient of water cut.

The mass of the heated water-oil mixture in the tubing is determined by

$$m = V \rho_{mix},$$

where $V = Q_V / 24$ – volume of the water-oil mixture, passing through the heating element per 1 hour, m^3 ; ρ_{mix} – density of the water-oil mixture, kg/m^3 .

The density of the water-oil mixture in the tubing is determined by

$$\rho_{mix} = \rho_{oil}(1 - b) + \rho_w b = 748.3 \cdot (1 - 0.75) + 1060 \cdot 0.75 = 982.1 \text{ kg/m}^3,$$

where ρ_{oil} – density of formation oil, kg/m^3 ; ρ_w – density of formation water, kg/m^3 .

Using the in-line electric heating element, it is necessary to heat the water-oil mixture at a depth of 600 m in such a manner that the introduced amount of heat is sufficient to compensate for the temperature drop below the paraffin saturation point further along the wellbore towards the wellhead.

As a result of previous calculations, it was found that the initial temperature of paraffins crystallization is 308.8 K, and the temperature at the wellhead is 295.7 K. Thus, it is necessary to calculate the amount of heat required for heating the water-oil mixture by 13.1 K within an hour using the down-hole in-line heater.

While calculating, it was assumed that the well production rate is constant and does not change upwards due to a decrease in the viscosity of oil during heating or downwards resulting from a decrease in the clear opening of the tubing, as well as thermal losses

The heated volume of the water-oil mixture in the tubing is equal to

$$V = \frac{Q_V}{24} = \frac{35}{24} = 1.4583 \text{ m}^3.$$

The heated mass of the water-oil mixture in the tubing is equal to

$$m = V \rho_{mix} = 1.4583 \cdot 982.1 = 1432.20 \text{ kg}.$$

The amount of heat required for heating the water-oil mixture in the tubing is equal to

$$Q = c_{mix} m \Delta T = 3295 \cdot 1432.20 \cdot 13.1 = 61820196.9 \text{ J} = 17.17 \text{ kW} \cdot \text{h}.$$

The inner diameter of the production string is 0.15 m, and the outer diameter of the tubing string is 0.0603 m. Thus, the casing annulus of the well is represented by 0.0449 m thick water-oil mixture ring. The ratio between the outer diameter of the tubing string and the inner diameter of the casing string is 2/5. Regarding this, we take the energy losses during heating the liquid column equal to 40 % of the previously calculated amount of heat, in this case equal to $Q_{loss} = 6.87 \text{ kW} \cdot \text{h}$.

Thus, to prevent the ARPD formation on the tubing walls in the oil wellbore under specified conditions, it is necessary to use the in-line electric heater with a power of $P = 24.04 \text{ kW}$.

Selecting a wind-driven power plant

According to the study, presented in [20], the installed capacity utilization factor (ICUF) of a wind-driven power plant as part of an electro-thermal system depends on the average annual wind speed; variations in ranking of wind distribution, the heating cable resistance and the method of controlling. Minimum values of the ICUF of a wind-driven power plant as a part of the system, depending on the average annual wind speeds, are presented in tab. 2.

Table 2

ICUF of the wind-driven power plant as a part of an electro-thermal complex

Average annual wind speed, m/s	4	5	6	7
Minimum ICUF, %	10	16.3	22.8	27.1

Let us determine the power of the wind-driven power plant as a part of an electro-thermal system with the in-line electric heater to remove and prevent the ARPD formation on the tubing walls in the oil wellbore based upon minimum ICUF (tab. 2) and the time to reach the set temperature at the well-head ($T = 308.8$ K) within an hour using the formula

$$P_{WG} = \frac{P}{k} \cdot 100,$$

where P_{WG} – power of the wind-driven power plant, kW; P – power of the in-line electric heater, kW; k – minimum ICUF of the wind-driven power plant, %.

Fig. 4 shows the influence of selecting a nominal capacity of the wind-driven power plant on the steady-state temperature at the wellhead, with variations in the average annual wind speed accounted for.

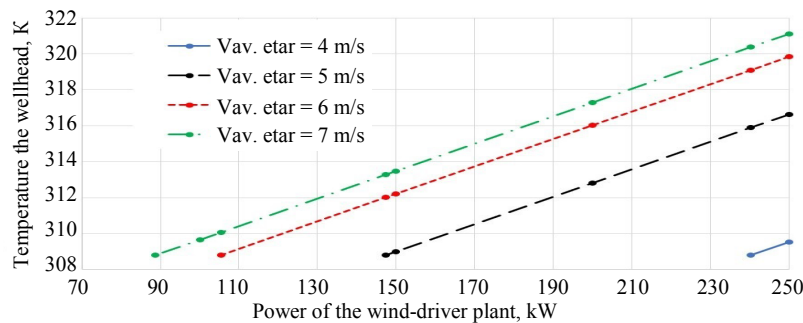


Fig. 4. Selecting a nominal capacity of the wind-driven power plant

CONCLUSION

Having conducted the studies, it was revealed that in order to prevent the ARPD formation on the tubing walls of oil wells, it is expedient to use the in-line heater, which maintains the average steady-state temperature along the wellbore and at the wellhead above the initial crystallization point of the ARPD. It is possible to use an autonomous wind-driven power plant with a nominal capacity of 90 to 250 kW, depending on the average annual wind speed within the well pad area, as a power source for the electric heater.

The reported study was funded by RFBR according to the research project No 18-38-00530.

REFERENCES

1. Ibragimov N. G., Tronov V. P., Guskova I. A. (2010) *Theory and Practice of Methods for Controlling Organic Deposits at a Late Stage of the Development of Oil Deposits*. Moscow. Neftyanoe Khozyaistvo Publ. 240 (in Russian).
2. Korobov G. Y., Mordvinov V. A. (2017) Study of Adsorption and Desorption of Asphaltene Sediments Inhibitor in the Bottomhole Formation Zone. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (2), 267–272.
3. Korobov G. Y., Mordvinov V. A. (2013) Temperature Distribution Along Well Bore. *Neftyanoe Khozyaistvo = Oil Industry*, (4), 57–59 (in Russian).
4. Moronov V., Leusheva E. (2016) Energy Delivery at Oil and Gas Wells Construction in Regions with Harsh Climate. *International Journal of Engineering*, 29 (2), 274–279. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.17>.
5. Ivanova L. V., Koshelev V. N., Burov E. A. Asphaltene-Resin-Paraffin Deposits During Production, Transportation and Storage. *Neftegazovoe Delo = Oil and Gas Business*, 2011, (1), 274–276 (in Russian).
6. Glushchenko V. N., Silin M. A., Gerin Yu. G. (2009) *Oil-Field Chemistry. Vol. 5. Prevention and Elimination of Asphaltene-Resin-Paraffin Deposits*. Moscow, Interkontakt Nauka Publ. 475 (in Russian).
7. Ragulin V. V., Ganiev I. M., Voloshin A. I., Latypov O. A. (2003) Development of the Technology of Asphaltene-Resins-Paraffin Sediments Removal from Oil Field Equipment Surface. *Neftyanoe Khozyaistvo = Oil Industry* (11), 89–91 (in Russian).
8. Struchkov I. A., Rogachev M. K. (2017) Wax Precipitation in Multicomponent Hydrocarbon System. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, (7), 543–553. <https://doi.org/10.1007/s13202-016-0276-0>.
9. Struchkov I. A., Roschin P. V. (2016) Effect of Light Hydrocarbons on Wax Precipitation. *International Journal of Applied Engineering Research*, (11), 9058–9062.
10. Kopteva A. V., Malarev V. I. (2018) Studying Thermal Dynamic Processes in an Isolated Type Borehole Electrode Heater for High-Viscosity Oil Extraction. *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 678–681. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2018.8317185>.
11. Kopteva A. V., Malarev V. I. (2017) Borehole Electric Steam Generator Electro-Thermal Calculation for High-Viscosity Oil Productive Layers Development. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076341>.
12. Abramovich B. N., Sychev Yu. A. (2016) Problems of Ensuring Energy Security for Enterprises from Mineral Resources Sector. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 217, 132–139 (in Russian).
13. Gukovskiy Y. L., Sychev Y. A., Pelenev D. N. (2017) The Automatic Correction of Selective Action of Relay Protection System against Single Phase Earth Faults in Electrical Networks of Mining Enterprises. *International Journal of Applied Engineering Research*, 5 (12), 833–838.
14. Belsky A. A., Korolyov I. A. (2018) Thermal Oil Recovery Method Using Self-Contained Windelectric Sets. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015, 052001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/5/052001>.
15. Belsky A. A., Dobush V. S. (2017) Autonomous Electrothermal Facility for Oil Recovery Intensification Fed by Wind Driven Power Unit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 87, 032006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032006>.
16. Zyrin V. (2018) Electrothermal Complex for Heavy Oil Recovery: Analysis of Operating Parameters. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9 (11), 1952–1961.
17. Alvarado V., Manrique E. (2010) Enhanced Oil Recovery: an Update Review. *Energies*, 3 (9), 1529–1575. <https://doi.org/10.3390/en3091529>.
18. Aleksandrov A. N., Rogachev M. K. (2017) Determination of Temperature of Model Oil Solutions Saturation with Paraffin. *Mezhdunarodnyi Nauchno-Issledovatel'skii Zhurnal = International Research Journal*, (6), 103–108 (in Russian).
19. Struchkov I. A., Rogachev M. K. (2017) Risk of Wax Precipitation in Oil Well. *Natural Resources Research*, 26 (1), 67–73. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9302-7>.
20. Belsky A. A., Dobush V. S. (2017) Autonomous Electrical Heating Facility Supplied by Wind Turbine for Elimination of Oil Wellbore Paraffin Deposits. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076256>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-155-167>

УДК 621.316

Формирование стратегии повышения эффективности работы распределительных электрических сетей на предпроектной стадии

А. В. Жураховский¹⁾, З. М. Бахор¹⁾, А. Я. Яцейко¹⁾, В. Г. Гапанович¹⁾

¹⁾Национальный университет «Львовская политехника» (Львов, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассмотрены основные критерии оценки качества функционирования распределительных электрических сетей и показано, что в электроснабжающих компаниях уже на предпроектном формировании стратегии модернизации и реконструкции электросетей необходимо выбирать оптимальные мероприятия по каждой магистрали с четкой последовательностью реализации в сети выбранных мер с учетом ее перспективного развития. Разработана математическая модель классификации магистралей распределительных электрических сетей по состоянию их функционирования: нормальное, тяжелое и недопустимое. На основе этой модели сформирован алгоритм выбора оптимальных технических мероприятий для реконструкции магистралей в зависимости от их состояния: для магистралей в тяжелом состоянии возможными являются замена провода участка или установление батареи статистических конденсаторов на удаленных трансформаторных подстанциях; для магистралей в недопустимом состоянии по результатам экспертной оценки возможных мер с учетом развития сети, перспективного роста нагрузки, строительства разгрузочных пунктов, присоединения к сети источников распределенной генерации принимается решение о замене сечения провода, переводе части или всей сети на более высокий уровень напряжения. Это позволяет уже на этапе предпроектного формирования стратегии модернизации и реконструкции формализовать процедуру выбора и реализации этих мероприятий, обеспечивая эффективное использование средств на реконструкцию и техническое переоснащение распределительных сетей с целью повышения качества их функционирования. Разработанные математическая модель и алгоритм выбора оптимального технического мероприятия для реконструкции магистрали с учетом перспектив развития апробированы при формировании оптимальной стратегии развития распределительных электрических сетей 6–10 кВ Западного региона Украины.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, магистраль, установившийся режим, математическая модель, алгоритм, критерии функционирования, техническое мероприятие, экономическая эффективность, стратегия развития

Для цитирования: Формирование стратегии повышения эффективности работы распределительных электрических сетей на предпроектной стадии / А. В. Жураховский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 155–167. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-155-167>

Адрес для переписки

Жураховский Анатолий Валентинович
Национальный университет «Львовская политехника»
ул. Ст. Бандеры, 12,
79013, г. Львов, Украина
Тел.: +38 032 258-25-00
yats80@ukr.net

Address for correspondence

Zhurakhivskyi Anatoliy V.
Lviv Polytechnic National University
12 Bandera str.,
79013, Lviv, Ukraine
Tel.: +38 032 258-25-00
yats80@ukr.net

Formation of a Strategy for Increasing the Efficiency of Operation of Distribution Electrical Grids at the Stage of Pre-Design Works

A. V. Zhurakhivskiy¹⁾, Z. M. Bakhor¹⁾, A. Ya. Yatseiko¹⁾, V. H. Hapanovych¹⁾

¹⁾Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

Abstract. The main criterions to assess the quality of operation of distribution electrical grids are considered. It is shown that in power supply companies as early as at the pre-design formation of the strategy of modernization and reconstruction of electrical grids, it is necessary to choose the optimal measures for each mainline with a clear sequence of implementation of the selected measures in the electrical grid taking into account prospects of its development. A mathematical model of the classification of mainlines of distribution electrical grids has been developed according to the state of their operation, viz. successful operation, strenuous operation and unacceptable operation. On the basis of this model an algorithm for a choice of the optimal technical measures for the reconstruction of mainlines has been formed depending on their state: for mainlines in the strenuous state it is possible to replace the wire of the section or an installation of a battery of statistical capacitors at the remote transformer substations; for mainlines in the unacceptable state, in accordance with the results of an expert assessment of possible measures taking into account the electrical grid development, the prospects of increase of the load, the construction of unloading points, the connection to the distributed generation electrical grid, a decision is being made to replace the wire section, to transform a part or the whole electrical grid to higher voltage level. This allows formalizing the procedure for the choice and implementation the outlined measures as early as at the stage of pre-design formation of the modernization and reconstruction strategy so to provide an efficient use of funds for the reconstruction and technical retooling of distribution electrical grids in order to improve the quality of their operation. The mathematical model and the algorithm for the choice of the optimal technical measure for the reconstruction of the mainline taking into account the prospects for development that had been developed was tested during the development of the optimal strategy for the development of 6–10 kV distribution electrical grids in the Western region of Ukraine.

Keywords: distribution electrical grid, a mainline, steady-state mode, mathematical model, an algorithm, criterions of operation, technical measure, economic efficiency, development strategy

For citation: Zhurakhivskiy A. V., Bakhor Z. M., Yatseiko A. Ya., Hapanovych V. H. (2019) Formation of a Strategy for Increasing the Efficiency of Operation of Distribution Electrical Grids at the Stage of Pre-Design Works. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 155–167. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-155-167> (in Russian)

Введение

Распределительные электрические сети (РЭС) 6–10 кВ энергоснабжающих компаний (ЭК) Украины являются наиболее разветвленными и малонадежными. Их работа характеризуется значительными технологическими потерями электроэнергии (ТПЭ), которые в разы превышают уровень в европейских сетях. Сегодня некоторые РЭС 6–10 кВ практически исчерпали свой резерв по пропускной способности; 11,5 % линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 0,4–10 кВ находятся в технически неработоспособном состоянии; 14,9 % трансформаторных подстанций (ТП) 6–10 кВ подлежат реконструкции и замене [1, 2].

Развитие РЭС 6–10 кВ (рост нагрузки, изменение схемы сети, присоединение источников распределенной генерации (DG)) привело к тому, что

в большинстве случаев ЛЭП не справляются с возложенными на них функциями – надежного обеспечения потребителей качественной электроэнергией при оптимальных ТПЭ в сети. Основные причины этого – изношенность оборудования сетей, недостаточная пропускная способность магистралей, работа магистралей с перегрузкой отдельных участков, что приводит к снижению уровня напряжения менее нормированных значений на шинах отдаленных ТП и повышению ТПЭ в сети. Кроме того, большие длины магистралей, в некоторых случаях превышающие 40 км, также приводят к снижению уровня напряжения менее нормированной величины на отдаленных ТП при значительной загрузке ЛЭП.

Качество функционирования РЭС, которое оценивается пропускной способностью линий и трансформаторов сети; уровнем напряжения на шинах ТП; ТПЭ в сети; интегральными показателями надежности сети SAIDI и SAIFI, обеспечивается проведением соответствующих технических мероприятий. Для повышения пропускной способности линии выполняют замену ее провода на провод большего сечения или переводят линию на более высокий класс напряжения, а для обеспечения желаемых уровней напряжений на шинах ТП оптимизируют перетоки реактивной мощности в сети за счет установки компенсирующих устройств (КУ) или оптимизации рабочего напряжения в центре питания [3–13]. Каждому из приведенных технических мероприятий присущи стоимость их реализации и оптимальные ТПЭ в сети при условии надежного обеспечения качественной электроэнергией потребителей.

Выбор технических мероприятий с целью повышения эффективности функционирования РЭС и последовательность их реализации не всегда дают ожидаемые положительные результаты для ЭК, так как не учитывается оптимальная структура сети при перспективном росте потребления электроэнергии и развитии сети, присоединении к сети источников распределенной генерации, не рассматриваются сценарии развития и повышения качества функционирования РЭС на длительную перспективу с учетом поэтапной реализации принятых технических решений. В ЭК уже на предпроектном формировании стратегии модернизации и реконструкции РЭС, исходя из большого объема и значительной стоимости работ, необходимо выбирать оптимальные мероприятия по каждой ЛЭП и последовательность реализации в сети выбранных мер с учетом ее перспективного развития. Разработка алгоритма для решения такой задачи с учетом технических особенностей функционирования РЭС и плана их развития [1] целесообразна и актуальна.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблема эффективности функционирования РЭС в настоящее время хорошо изучена относительно технических мер, применяемых в сетях, и продолжает развиваться в направлении разработки методов и алгоритмов для оптимального использования этих мер с целью минимизации ТПЭ,

обеспечения необходимого уровня напряжения в сети и высоких показателей надежности электроснабжения [3–13].

На стадии проектирования эффективность функционирования РЭС обеспечивается правильным выбором напряжения, сечения проводов и кабелей ЛЭП, типа и мощности трансформаторов ТП, схемы сети, мест секционирования. Для формирования оптимальной схемы сети могут использоваться: существующие методы предпроектной оценки параметров электрических сетей на основе раздельного учета фактора надежности сетей 0,38 кВ и 6–10 кВ [3]; алгоритм выбора оптимального расположения главных распределительных подстанций и распределительных пунктов с учетом линий внешнего питания по критерию дисконтированной чистой прибыли от транспортировки и реализации электроэнергии потребителям [4]; метод оптимального секционирования РЭС с целью повышения надежности электроснабжения на базе теории нечетких множеств [5].

Во время эксплуатации эффективность функционирования РЭС обеспечивают за счет: увеличения сечения проводов и кабелей ЛЭП [6]; перевода сети на более высокий уровень напряжения [6]; установления компенсирующих устройств и выбора их оптимальной мощности [7–9]; секционирования и реконфигурации сети [10–12]; выбора места установки в сети DG и выбора их мощности [12, 13]. Реализация каждого из этих мероприятий в сети – это многокритериальная оптимизационная задача со сложной нелинейной функцией оптимальности. Такие задачи решают с помощью эвристических алгоритмов. Генетический алгоритм применяют для определения оптимальных мест установки КУ в сети [8]. Для реконфигурации РЭС с DG используют эвристический алгоритм с multi-fuzzy эвристикой для определения оптимальных мест установки DG по уровню напряжения и уменьшению потерь мощности в сети, а для определения оптимальной мощности DG – генетический алгоритм [12]. Оптимизация ТПЭ за счет выбора места установки DG и выбора их мощности выполняется с использованием гибридного алгоритма WIPSO-GSA, который соединил метод роя частиц (WIPSO) и алгоритм гравитационного поиска (GSA) [13]. Приведенные в [7–13] алгоритмы предназначены только для оптимального решения задач реализации технических мероприятий в сетях для улучшения критериев эффективности их функционирования. В [6] предложена методология оценки целесообразности реализации технических мероприятий в РЭС: перевод напряжения на более высокий уровень и замена сечения проводов на большее.

Следует отметить, что несмотря на теоретическую и практическую значимость результатов разработки и применения методов, моделей, алгоритмов к решению оптимизационных задач повышения эффективности функционирования РЭС за счет реализации известных технических мероприятий, они не дают ответа на вопрос: при каких условиях на этапе выполнения предпроектных работ по модернизации и реконструкции РЭС целесообразно применение того или иного технического мероприятия

в сети с учетом перспектив ее развития и объема выполнения работ по модернизации и реконструкции? Есть основания считать, что вопрос дистрибуции технических мероприятий в РЭС особенно остро характерен для сетей Украины, что связано с особенностями их функционирования и развития, критическим техническим состоянием, исторически сложившейся структурой сетей, задачами, которые определены в плане развития электрических сетей [1], и со значительным объемом работ по модернизации и реконструкции РЭС. Поэтому необходимо совершенствование методологии исследования электрических сетей, которая на этапе предпроектного формирования стратегии по модернизации и реконструкции РЭС позволит ЭК принимать оптимальные решения по ее реализации.

Цель и задачи

Цель исследований – разработка математической модели классификаций магистралей РЭС по состоянию их функционирования и алгоритма выбора оптимальных технических мероприятий для реконструкции магистралей, что позволит ЭК на этапе предпроектного формирования стратегии модернизации и реконструкции РЭС формализовать процедуру выбора и реализации этих мероприятий, обеспечивая эффективное использование средств на реконструкцию и техническое переоснащение распределительных сетей с целью повышения качества их функционирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач: разработка математической модели, программная реализация которой по критериям качества функционирования сети, полученным по результатам анализа установившихся режимов РЭС, обеспечивает автоматическое формирование списка магистралей сети, для которых необходима реконструкция; разработка алгоритма выбора оптимального технического мероприятия для реконструкции магистрали с учетом развития РЭС по показателям экономической эффективности от реализации мероприятия.

Разработка математической модели

Распределительные электрические сети 6–10 кВ работают по радиальным схемам. В разветвленных сетях, которые из условия надежности питаются от двух центров питания, предусмотрены пункты размыкания. В основу формирования таких сетей положен магистральный принцип, поэтому РЭС 6–10 кВ электроснабжающие компании рассматривают как конечное множество магистралей МГ, каждая из которых состоит из линии магистрали – совокупности участков (отрезков линии от одного ответвления ко второму), из линий ответвлений и ТП. Оценивая эти элементы (находясь они в нормальном или плохом состоянии) по пропускной способности участков и по напряжениям на шинах ТП, определяем качество функционирования магистрали (ее состояние) и необходимость применения соответствующих технических мероприятий для ее улучшения.

Так, k -ю магистраль электрической сети $МГ_k$ ($МГ_k \in МГ$) рассматриваем, как совокупность подмножеств участков линий и ТП $МГ_k = \{Л_k \cup ТП_k\}$, где $Л_k = \{Л_{k1}, Л_{k2}, \dots, Л_{km}\}$ – подмножество участков k -й магистрали, состоящей из m участков; $ТП_k = \{ТП_{k1}, ТП_{k2}, \dots, ТП_{kn}\}$ – подмножество ТП k -й магистрали, состоящей из n ТП. Участки линий k -й магистрали описываются токами режима $\{I_{pk1}, I_{pk2}, \dots, I_{pkm}\}$, а ТП – напряжениями режима $\{U_{pk1}, U_{pk2}, \dots, U_{pkn}\}$. Таким образом, любая магистраль электрической сети определена на множествах параметров режима токов I_p и напряжений U_p , полученных по результатам исследования установившихся режимов РЭС.

Реализация признаков состояния магистрали (значения токов и напряжений, полученные по результатам расчета режима РЭС) определяет ее состояние: нормальное, тяжелое и недопустимое. Нормальное состояние магистрали характеризуется параметрами режима, которые не выходят за допустимые пределы, а ТПЭ магистрали оптимальны; тяжелое состояние магистрали, если в результате увеличения ее нагрузки один из параметров режима выходит за допустимые пределы. При этом ТПЭ в большинстве случаев не соответствуют оптимальным, например: пропускная способность головного участка магистрали или линии ответвления недостаточная; на шинах удаленного ТП уровень напряжения не соответствует допустимому; наблюдается повышенное потребление реактивной мощности. Для перевода таких магистралей в нормальное состояние: заменить провод проблемного участка на провод большего сечения или установить на шинах удаленного ТП батарею статических конденсаторов (БСК), если уровень напряжения не соответствует допустимому. Выбор того или иного мероприятия является безальтернативным. Недопустимое состояние магистрали – это состояние, когда пропускная способность ее линии недостаточна и уровни напряжений на шинах ТП не соответствуют допустимым. На таких магистралях для перевода их в нормальное состояние рассматриваем мероприятие – замену провода на провод большего сечения или перевод магистрали на более высокий уровень напряжения.

Итак, множество состояний магистралей РЭС $МГ$ рассматриваем как совокупность подмножеств состояний – нормальных $МГ_{\text{норм}}$, тяжелых $МГ_{\text{тяж}}$ и недопустимых $МГ_{\text{недоп}}$

$$МГ = \{МГ_{\text{норм}} \cup МГ_{\text{тяж}} \cup МГ_{\text{недоп}}\}.$$

Любая k -я магистраль РЭС в зависимости от ее реализации (I_{pk} ($I_{pk} \in I_p$)) и U_{pk} ($U_{pk} \in U_p$)) будет относиться:
– к классу нормальных состояний

$$МГ_k \in МГ_{\text{норм}} \Leftrightarrow I_{pk} \in I_{\text{доп}k} \wedge U_{pk} \in U_{\text{доп}k};$$

– к классу тяжелых состояний

$$MГ_k \in MГ_{тяж} \Leftrightarrow (\exists I_{pki} \notin I_{допк} \wedge U_{pk} \in U_{допк}) \vee (I_{pk} \in I_{допк} \wedge \exists U_{pkj} \notin U_{допк});$$

– к классу недопустимых состояний

$$MГ_k \in MГ_{недоп} \Leftrightarrow I_{pk} \notin I_{допк} \wedge U_{pk} \notin U_{допк}.$$

Множество значений допустимых длительных токов $I_{доп}$ марок проводов участков линий магистрали и множество значений напряжений $U_{доп}$, которые целесообразно поддерживать на шинах НН ТП из условия обеспечения нормируемых напряжений на шинах электроприемников сети 380 В с учетом установленных на трансформаторах ТП устройств регулирования напряжения, образуют разделительную функцию, получаемую при формировании схемы электрической сети для исследования установившихся режимов.

Множества магистралей $MГ_{тяж}$ и $MГ_{недоп}$ РЭС (рис. 1) получаем по результатам исследования установившихся режимов существующей схемы сети.

С магистралей множества $MГ_{тяж}$ формируем два подмножества, которые требуют реализации различных технических мероприятий: магистрали подмножества $MГ(I)_{тяж}$ – замены провода участка; магистрали подмножества $MГ(U)_{тяж}$ – установления БСК на удаленном ТП. Поскольку реализация мер по магистрали в обоих случаях не требует значительных затрат средств и времени (реализуется до года), по каждому мероприятию определяются показатели экономической эффективности: чистый дисконтированный доход, индекс доходности дисконтированных затрат и срок окупаемости [14]. По значениям показателей экономической эффективности мероприятий выполняем их ранжирование для первого и второго подмножеств. Таким образом формируется оптимальная реализация мер по магистралям множества $MГ_{тяж}$ с учетом инвестиционных средств.

Для каждой магистрали множества $MГ_{недоп}$ рассматриваем два мероприятия: замену провода линии на провод большего сечения и перевод магистрали на более высокий уровень напряжения. По каждому мероприятию рассчитываем суммарные дисконтированные затраты и период возврата капитала [14, 15] и по результатам технико-экономического сравнения выбираем оптимальное мероприятие для данной магистрали сети. Такие исследования выполняем по каждой магистрали множества $MГ_{недоп}$. По результатам экспертной оценки полученных мероприятий магистралей множества $MГ_{недоп}$ с учетом развития сети, перспективного роста нагрузки, строительства разгрузочных пунктов, присоединения к сети DG принимается решение о переводе части сети (магистрали питаются от одного источника) или всей сети РЭС на более высокий уровень напряжения. При этом множество магистралей $MГ_{тяж}$ может уменьшаться за счет тех, которые будут переводиться на более высокий уровень напряжения по результатам экспертной оценки (рис. 1).



Рис. 1. Схема алгоритма выбора оптимальной стратегии

Fig. 1. The scheme of the algorithm for the choice of the optimal strategy

Практическое применение

Разработанная математическая модель и алгоритм ее реализации были использованы при формировании оптимальной стратегии развития РЭС 6–10 кВ одного из районов Западного региона Украины [16]. Структура электрической сети района, которая сформирована в процессе ее развития с напряжениями 6 и 10 кВ, в настоящее время состоит из 13 магистралей 6 кВ и 20 магистралей 10 кВ, 448 ТП 6/0,4 и 10/0,4 кВ с суммарной установленной мощностью трансформаторов более 90 МВ·А. Сеть характеризуется большой протяженностью линий электропередачи, суммарная длина которых составляет 510 км, а длины 12 магистралей лежат в пределах от 20,0 до 47,9 км. Техническое состояние электрической сети и динамичный рост нагрузки в регионе требуют проведения мероприятий с целью повышения эффективности эксплуатации сети.

Исследование режимов электрической сети и их оптимизация выполнялись с помощью программного комплекса АРЕМ [17], в котором реализован метод баланса мощности:

$$f(X, Y) = \left\| \frac{\Delta P(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)}{\Delta Q(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)} \right\| = \left\| \frac{P_{\rightarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha) \vee P_{\leftarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha) + P_{\uparrow}(\tilde{U})}{Q_{\rightarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha) \vee Q_{\leftarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha) + Q_{\uparrow}(\tilde{U})} \right\| = \left\| \frac{0}{0} \right\|,$$

где $\Delta P(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$, $\Delta Q(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$ – вектор баланса активной и реактивной мощностей в узлах схемы замещения электрической сети; $P_{\rightarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$, $P_{\leftarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$, $Q_{\rightarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$, $Q_{\leftarrow}(\theta, \tilde{U}, V, k, \alpha)$ – вектор актив-

ных и реактивных мощностей по концам веток схем замещения элементов электрической сети; $P_{\downarrow}(\tilde{U})$, $Q_{\downarrow}(\tilde{U})$ – вектор активной и реактивной мощностей нагрузок в узлах схемы электрической сети; θ – угол векторов напряжений; $\tilde{U}$ – модуль напряжений; V – независимый модуль напряжений; k , α – модуль и угол коэффициентов трансформации.

При моделировании режимов сети накладывались функциональные ограничения на значения модулей напряжений в узлах электрической сети (шины ТП) и на токи в ветвях схемы сети (на участках линий магистралей и в трансформаторах)

$$U_{\text{доп, min}} \leq U_p \leq U_{\text{доп, max}}; I_p \leq I_{\text{допх}}.$$

Так была получена разделительная функция по каждой магистрали РЭС в виде множества значений допустимых длительных токов $I_{\text{доп}}$ марок проводов участков линий магистрали и значений напряжений $U_{\text{доп}}$ на шинах ТП магистрали, используя которую и полученные расчетные значения I_p и U_p магистралей, автоматически формировались множества $\text{МГ}_{\text{норм}}$, $\text{МГ}_{\text{тяж}}$ и $\text{МГ}_{\text{недоп}}$.

Результаты анализа установившегося режима максимальных нагрузок исследуемых РЭС 6–10 кВ показали, что на восьми магистралях необходимо проводить технические мероприятия, направленные на улучшение эффективности их функционирования. Три магистрали относятся к множеству недопустимых состояний ($\text{МГ}_{\text{недоп}}$), а пять – к множеству тяжелых состояний ($\text{МГ}_{\text{тяж}}$) (табл. 1).

Магистрали $\text{МГ}_{\text{недоп}}$ характеризуются как перегруженностью главных участков, так и низким уровнем напряжений на шинах ТП, а магистрали $\text{МГ}_{\text{тяж}}$ – только низким уровнем напряжений на шинах ТП: отклонение напряжения на стороне 380 В отдельных ТП превышает значение минус 5 %, а перегрузок участков линий магистралей не обнаружено (табл. 1).

Таблица 1

**Множества магистралей недопустимых и тяжелых состояний
и значения их характеристик**
**The totalities of mainlines of unacceptable and strenuous states
and the value of their characteristics**

Магистраль	Номинальное напряжение, кВ	Суммарная длина, км	Загруженность главного участка		Шины НН отдаленной трансформаторной подстанции	
			Ток, А	Отклонение тока, %	Напряжение, В	Отклонение напряжения, %
Магистрали МГ _{недоп}						
01	6	14,96	269,51	141,8	354,00	−6,84
02	6	34,99	241,14	112,1	350,00	−7,89
08	6	29,10	305,25	160,7	266,67	−29,82
Магистрали МГ _{тяж}						
11	10	41,12	124,16	59,1	360,80	−5,05
13	10	47,90	136,25	64,9	319,20	−16,00
10	6	19,23	158,72	83,5	341,33	−10,18
05	6	35,23	146,85	77,3	332,67	−12,46
19	6	29,44	111,78	58,8	345,33	−9,12

По результатам экспертной оценки мер, которые необходимо реализовать для магистралей множеств $МГ_{тяж}$ и $МГ_{недоп}$, было принято решение о переводе всех магистралей сети, работающих на напряжении 6 кВ, на напряжение 10 кВ. В этом случае обеспечивается снижение потерь активной мощности в сети на 56,52 % по сравнению с действующей сетью 6 и 10 кВ, а отклонение напряжения на шинах ТП магистралей, переведенных с напряжения 6 кВ на напряжение 10 кВ, не превышало 5,4 %.

Перевод всей исследуемой сети на напряжение 10 кВ позволяет применить схемно-техническую оптимизацию электросети, которая заключается в переводе части потребителей с одних магистралей на другие, изменении конфигурации сети, создании новых связей, изменении мест установки разрывов и т. п. Применение таких мер дает возможность уменьшить суммарные потери активной мощности на 47,6 % по сравнению со стартовым режимом 10 кВ и на 70,4 % – по сравнению с исходным режимом 6–10 кВ.

Исследования возможных вариантов развития РЭС 6–10 кВ предусматривали анализ режимов сети при условии прогнозируемого роста нагрузки на пятнадцатилетнюю перспективу. Действующая электрическая сеть 6–10 кВ не выдержит перспективного роста нагрузки, поскольку большинство ее магистралей относятся к множеству недопустимых состояний ($МГ_{недоп}$) из-за значительной загруженности главных участков, больших потерь напряжения в отдаленных ТП, соответственно недопустимо низкого уровня напряжения на шинах ТП. Для сети 10 кВ режим перспективного роста нагрузки допустим как по пропускной способности участков магистралей, так и по уровню напряжений на шинах ТП только при условии схемно-технической оптимизации электросети, за счет которой уменьшаются длины ЛЭП 10 кВ.

Для множества магистралей $МГ_{недоп}$ также рассматривалось другое мероприятие – перевод на более высокий уровень напряжения. Выполненные исследования показывают, что высокая эффективность функционирования сети будет в случае ее перевода на напряжение 20 кВ: отклонение напряжения на шинах ТП не будут превышать 3 %, технологические потери активной мощности составят 2,78 % от мощности, поступающей в сеть, что на 49,44 % меньше, чем потери в сети 10 кВ, для которой уже осуществлена схемно-техническая оптимизация.

Следующим шагом был выбор оптимального технического мероприятия для реконструкции исследуемых РЭС по показателям экономической эффективности от реализации мероприятия. Результаты расчета суммарных сводных дисконтированных затрат для двух основных предполагаемых траекторий развития исследуемых сетей приведены в табл. 2.

Таким образом, исследуемая сеть при условии перевода ее на напряжение 20 кВ имеет лучшие технико-экономические показатели, а ее дисконтированные затраты на 9,94 % меньше суммарных дисконтных расходов для сети 10 кВ. Однако при принятии окончательного решения по перспективной стратегии развития исследуемой сети следует учесть динамику

изменения кумулятивной суммы чистых денежных потоков, которая показывает, что период возврата капиталовложений в сеть 20 кВ составит более 15 лет.

Таблица 2

**Показатели экономической эффективности перспективных стратегий
с учетом экспертных оценок**

**Indicators of economic efficiency of perspective strategies
taking into account expert assessments**

Показатель	Сеть напряжением	
	10 кВ	20 кВ
Капиталовложения, тыс. грн	923337,75	870882,04
Затраты на эксплуатацию, тыс. грн/год	29703,30	28676,42
Затраты на покрытие потерь электроэнергии, тыс. грн/год	15392,88	8005,67
Суммарные ежегодные затраты, тыс. грн/год	45096,18	36682,09
Суммарные дисконтированные затраты, тыс. грн	1374299,55	1237702,94

ВЫВОДЫ

1. Представлена математическая модель, которая автоматически по реализации признаков состояния магистрали, полученных по результатам исследования установившихся режимов сети, относит магистраль к одному из предложенных классов ее состояния: нормальному, тяжелому, недопустимому.

2. Разработан алгоритм, реализация которого на этапе предпроектного формирования стратегии модернизации и реконструкции распределительных электрических сетей позволяет формализовать процедуру выбора оптимального технического мероприятия для реконструкции магистрали по показателям ее экономической эффективности и с учетом перспектив развития распределительных электрических сетей.

3. Математическая модель и алгоритм выбора оптимального технического мероприятия для реконструкции магистрали с учетом перспектив развития распределительных электрических сетей апробированы при разработке оптимальной стратегии развития распределительных электрических сетей 6–10 кВ одного из районов Западного региона Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. План розвитку розподільних електричних мереж на 2016–2025 рр. [Електронний ресурс] // Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Режим доступу: <http://mre.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish>.
2. Остап'юк, А. В. Економічне стимулювання підвищення енергоефективності розподілу електроенергії (150–0,4 кВ) / А. В. Остап'юк // Електричні мережі та системи. 2016. № 4–5. С. 9–11.
3. Перепечений, В. О. Вибір оптимальних параметрів розподільних електричних мереж в районах з малою щільністю навантаження / В. О. Перепечений // Комунальне господарство міст. 2015. Вип. 120. С. 94–97.

4. Романюк, Ю. Ф. Вибір оптимального розміщення головних розподільчих підстанцій (розподільчих пунктів) в мережах енергопостачальних компаній з врахуванням ліній зовнішнього живлення / Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак, А. О. Соломчак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2013. № 763. С. 91–97. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC_2013_763_18.
5. Гай, О. В. Оптимальне секціонування схем розподільних електричних мереж / О. В. Гай, Ю. І. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр. ІЕД НАНУ. 2011. Вип. 28. С. 10–14. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/63997>.
6. Aguila, A. Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems / A. Aguila, J. Wilson. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. No 73. doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
7. Омельчук, А. О. Зниження технологічних витрат електроенергії в розподільних електричних мережах / А. О. Омельчук // Енергетика та автоматика. 2016. № 4. С. 56–67.
8. Gholami, R. An Efficient Optimal Capacitor Allocation in DG Embedded Distribution Networks with Islanding Operation Capability of Micro-Grid Using a New Genetic Based Algorithm / R. Gholami, M. Shahabi, M. R. Haghifam // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2015. Vol. 71. P. 335–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.005>.
9. Kalambe, S. Loss Minimization Techniques Used in Distribution Network: Bibliographical Survey / S. Kalambe, G. Agnihotri // Renew. Sustain. Energy Rev. 2014. Vol. 29. P. 184–200. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.075.
10. Діхтярук, І. В. Вплив секціонування розподільних мереж напругою 6–10 кВ автоматичними роз'єднувачами на інтегральні показники надійності / І. В. Діхтярук // Електротехніка і промислова електроніка. Технологічний аудит і резерви виробництва. 2016. Т. 2, № 1. С. 35–39. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66889.
11. Циганенко, Б. В. Оптимальна реконфігурація розподільної електричної мережі / Б. В. Циганенко // Техн. електродинаміка. 2016. № 5. С. 55–57.
12. Rao Gampa, S. Multi-Objective Approach for Reconfiguration of Distribution Systems with Distributed Generations / S. Rao Gampa, D. Das // Electric Power Components and Systems. 2017. Vol. 45, Is. 15. P. 1678–1690. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1378944>.
13. Rajendran, A. Optimal Installation of Different DG Types in Radial Distribution System Considering Load Growth / A. Rajendran, K. Narayanan // Electric Power Components and Systems. 2017. Vol. 45, Is. 7. P. 739–751. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1309721>.
14. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні системи: ГКД 340.000.002–97. Київ: Міненерго України, 1997. 54 с.
15. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Загальні методичні положення: ГКД 340.000.001–95. Київ: Держстандарт, 1995.
16. Техніко-економічні аспекти впровадження електричних мереж напругою 20 кВ / З. М. Бахор [та інш.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 1. С. 53–58.
17. Комп'ютерна програма «АРЕМ – аналіз режимів електричних мереж» («АРЕМ»): авторське право на твір № 13579 Україна / О. В. Данилюк [та інш.]. Дата реєстрації 04.07.2005.

Поступила 05.07.2018 Подписана в печать 11.09.2018 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. The Development Plan of Electrical Grids Distribution for 2016–2025. *Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine*. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish> (in Ukrainian).

2. Ostapyuk A. V. (2016) Economic Stimulation of Energy Efficiency Increase of Electricity Distribution (150–0.4 kV). *Elektricheskije Seti i Sistemy* [Electrical Grids and Systems], (4–5), 9–11 (in Ukrainian).
3. Perepechenyi V. O. (2015) The Choice of Optimal Parameters of Distribution Electrical Grids in the Areas with Low Load Density. *Komunalne Hospodarstvo Mist = Municipal Economy of Cities*, 120, 94–97 (in Ukrainian).
4. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V., Solomchak A. O. (2013) Choosing the Optimal Location of Distribution Substations (Switchgear) in Networks of Power Supply Companies Considering External Power Lines. *Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivska Politehnika": Elektroenerhetychni ta Elektromekhanichni Systemy* [Bulletin of the National University of "Lviv Polytechnic". Electrical Power and Electromechanical Systems], 763, 91–97 (in Ukrainian).
5. Gai O. V., Tugai Yu. I. (2011) Optimum Partitioning Schemes for Distributed Electrical Grids. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy: Zb. Nauk. Pr.* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Collected Research Works]. Kyiv, 28, 10–14 (in Ukrainian).
6. Aguila A., Wilson J. (2018) Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 73, 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/73/1/012018>.
7. Omel'chuk A. O. (2016) Reduction of Technological Expenses of Electric Power in the Distributed Electrical Grids. *Enerhetyka i Avtomatyka = Energy and Automation*, (4), 56–67 (in Ukrainian).
8. Gholami R., Shahabi M., Haghifam M. R. (2015) An Efficient Optimal Capacitor Allocation in DG Embedded Distribution Networks with Islanding Operation Capability of Micro-Grid Using a New Genetic Based Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 71, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.03.005>.
9. Kalambe S., Agnihotri G. (2014) Loss Minimization Techniques Used in Distribution Network: Bibliographical Survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 184–200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.075>.
10. Dikhtyaruk I. V. (2016) The Impact of Sectionalization of Distribution Networks with the Voltage 6–10 kV by Automatic Disconnectors on Integral Indexes of Reliability. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1), 35–39. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.66889>.
11. Tsyhanenko B. V. (2016) Optimal Reconfiguration of the Distributed Electrical Grid. *Tekhnichna Elektrodynamika = Technical Electrodynamics*, (5), 55–57 (in Ukrainian).
12. Rao Gampa S., Das D. (2017) Multi-Objective Approach for Reconfiguration of Distribution Systems with Distributed Generations. *Electric Power Components and Systems*, 45 (15), 1678–1690. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1378944>.
13. Rajendran A., Narayanan K. (2017) Optimal Installation of Different DG Types in Radial Distribution System Considering Load Growth. *Electric Power Components and Systems*, 45 (7), 739–751. <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1309721>.
14. Industry Guidance Document 340.000.002–97. *Determination of Economic Efficiency of Capital Investments in Power Engineering. Method*. Power Systems and Electrical Systems. Kyiv, Ministry of Energy and Coal Industry Ukraine, 1997. 54 (in Ukrainian).
15. Industry Guidance Document 340.000.001–95. *Determination of Economic Efficiency of Investments in the Power Engineering. Method. General Methodical Provisions*. Kyiv, Derzhstandart, 1995 (in Ukrainian).
16. Bakhor Z. M., Kozovyi A. B., Lysiak H. M., Yatseiko A. Y. (2018) Technical and Economic Aspects of Implementing 20 kV Electrical Networks. *Visnyk Vinnitskogo Politekhnicznego Instytutu* [Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute], (1), 53–58 (in Ukrainian).
17. Danilyuk O. V., Opotyak Yu. V., D'yachenko S. V., Kozovyi A. B. (2005) *AREM – Analysis of Modes of Electrical Grids (AREM)*. Computer Program: Copyright to the Work No 13579 Ukraine. Registration Date: 04.07.2005 (in Ukrainian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-168-176>

УДК 621.313

Экспериментальная проверка адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора с электромагнитным возбуждением

А. Б. Менжинский¹⁾, А. Н. Малашин¹⁾, Ю. В. Суходолов²⁾

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

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье представлено математическое моделирование генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением, в результате которого получены эквивалентная электрическая схема, схема магнитной цепи генератора и выражения, описывающие электромагнитные процессы в генераторе возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением. Разработана нелинейная математическая модель генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением. Для экспериментальной проверки адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора, а также правомерности принятых допущений был изготовлен макетный образец возвратно-поступательного электрического генератора, состоящий из неподвижной части в виде двух П-образных магнитопроводов и подвижной части, представляющей собой Н-образный магнитопровод. На обоих П-образных магнитопроводах устанавливается сосредоточенная рабочая обмотка. На Н-образный магнитопровод намотана обмотка возбуждения и подключена к источнику постоянного тока. В макетном образце возвратно-поступательного электрического генератора для имитации свободнопоршневого двигателя применяется приводной электродвигатель мощностью 100 Вт с амплитудой возвратно-поступательных колебаний подвижной части, равной 16 мм, и частотой колебаний, регулируемой в диапазоне от 5 до 50 Гц. Экспериментально получены основные характеристики генератора (характеристика холостого хода и внешняя характеристика). Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показывает их расхождение не более чем на 4 %, следовательно, нелинейная математическая модель отражает характеристики генератора продольного типа с высокой степенью адекватности.

Ключевые слова: математическая модель, возвратно-поступательный электрический генератор, экспериментальная проверка адекватности, характеристика холостого хода, внешняя характеристика

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Экспериментальная проверка адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 62, № 2. С. 168–176. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-168-176>

Адрес для переписки

Менжинский Андрей Борисович
Военная академия Республики Беларусь
пр-т Независимости, 220,
220057, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 287-46-52
varb@mod.mil.by

Address for correspondence

Menzhinski Andrey B.
Military Academy of the Republic of Belarus
220 Nezavisimosty Ave.,
220057, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 287-46-52
varb@mod.mil.by

Experimental Verification of the Adequacy of Mathematical Model of the Reciprocating Electric Electromagnetically Excited Generator

A. B. Menzhinski¹⁾, A. N. Malashin¹⁾, Yu. V. Sukhodolov²⁾

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

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

Abstract. The article presents a mathematical simulation of the electromagnetically excited generator of reciprocating type, which resulted in an equivalent circuit diagram, a magnetic circuit design of the generator and some expressions describing the electromagnetic processes in the electromagnetically excited generator of reciprocating type. The nonlinear mathematical model of the electromagnetically excited generator of reciprocating type has been developed. In order of the experimental verification of the adequacy of the mathematical model of the reciprocating electric generator, as well as of the validity of the assumptions made, a breadboard sample of the reciprocating electric generator has been made consisting of a fixed part in the form of two U-shaped magnetic cores and a moving part representing an H-shaped magnetic cores. There is focused operating winding on both the U-shaped magnetic cores. The N-shaped magnetic core is coiled with excitation winding which is connected to a DC power source. In a breadboard sample of the reciprocating electric generator a drive motor of 100 W with an amplitude of reciprocating oscillations of the moving part equal to 16 mm, and a frequency of oscillations adjustable in the range from 5 to 50 Hz is used in order to simulate a free-piston engine. The main characteristics of the generator (viz., idle speed and external characteristics) have been experimentally obtained. Comparison of experimental and calculated results demonstrated their discrepancy of no more than 4 %; therefore, the nonlinear mathematical model reflects the characteristics of the generator of longitudinal type with a high degree of adequacy.

Keywords: mathematical model, reciprocating electric generator, experimental verification of adequacy, idle speed characteristic, external characteristic

For citation: Menzhinski A. B., Malashin A. N., Suhodolov Yu. V. (2019) Experimental Verification of the Adequacy of Mathematical Model of the Reciprocating Electric Electromagnetically Excited Generator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2), 168–176. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-168-176> (in Russian)

Введение

Исследования энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей (СПД) показали, что наиболее перспективными электромеханическими преобразователями энергии в них являются линейные электрические генераторы (ЛЭГ), возвратно-поступательные электрические генераторы (ВПЭГ) и их комбинированное использование [1–5].

Основное достоинство такой системы – отсутствие кривошипно-шатунного механизма в конструкции двигателя, что позволяет повысить его КПД до 50–60 %, в 2,5–3 раза увеличить габаритную мощность, уменьшить удельную массу и металлоемкость СПД [2], удельный расход топлива двигателя до 30 % [1], реализовать модульную структуру электромеханического преобразователя энергии. Средний ресурс до капитального ремонта увеличится до 50 тыс. ч в зависимости от типа СПД [5, 6].

Математическому описанию генераторов линейного типа посвящено достаточно работ, чего не скажешь о генераторах возвратно-поступательного типа [7, 8]. Однако в большинстве из них рассматриваются генераторы с постоянными магнитами, в то время как генераторам возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением, обладающим большей надежностью, меньшей стоимостью производства, простотой конструкции и регулировки потока возбуждения, по сравнению с магнитоэлектрическими генераторами уделяется меньше внимания ввиду их повышенных массогабаритных показателей.

В стационарных системах энергоснабжения, где не столь важны массогабаритные показатели, генераторы возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением могли бы найти широкое практическое применение.

Постановка задачи

Возникает необходимость в математическом описании генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением с целью его дальнейшего анализа и оценки эффективности применения. Математическая модель (ММ) генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением должна учитывать геометрические параметры магнитной системы генератора, действие реакции якоря, неравномерность распределения магнитного поля в магнитной системе генератора и зависимость коэффициентов рассеяния и выпучивания от координаты перемещения.

В качестве одной из перспективных схем генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением может быть предложена магнитная система, изображенная на рис. 1. Достоинством данной схемы является уменьшение электродвижущей силы (ЭДС) самоиндукции в обмотке возбуждения.

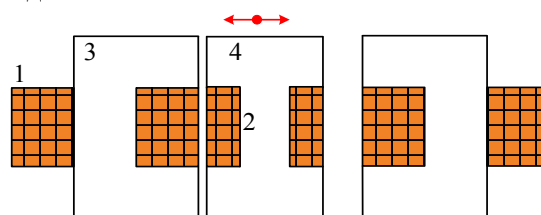


Рис. 1. Генератор возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением:
1 – рабочая обмотка; 2 – обмотка возбуждения; 3 – неподвижная часть магнитопровода;
4 – подвижная часть магнитопровода

Fig. 1. The electromagnetically excited generator of reciprocating type:
1 – working winding; 2 – excitation winding; 3 – fixed part of the magnetic core;
4 – moving part of the magnetic core

Условия функционирования генераторов:

- 1) однофазное исполнение;
- 2) линейная нагрузка;

- 3) обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока;
- 4) перемещение подвижной части генератора вдоль оси с синусоидальным законом изменения координаты во времени.

Математическая модель

В генераторе возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением система уравнений Кирхгофа для напряжений обмоток состоит из s уравнений, составленных для каждого из контуров. Уравнение для k -го контура имеет вид [9]

$$U_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt}, \quad (1)$$

где R_k – активное сопротивление k -го контура; i_k – ток k -го контура; ψ_k – потокосцепление k -го контура.

В линейном приближении (при допущении о бесконечно большой проницаемости материала магнитопровода) потокосцепление k -го контура может быть записано выражением

$$\psi_k = \sum_{n=1}^s \psi_{kn} = \sum_{n=1}^s i_n L_{kn}, \quad (2)$$

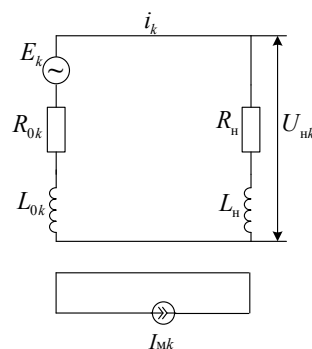
где i_n – ток в обмотках; L_{kk} – индуктивность k -й обмотки; L_{kn} – взаимная индуктивность k -й обмотки со всеми прочими обмотками; n – принимает любые значения от 1 до s [10].

Следует отметить, что индуктивность и взаимоиндуктивности являются функциями координаты перемещения x .

В соответствие рассматриваемой конструкции генератора возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением (рис. 1) может быть поставлена эквивалентная электрическая схема, показанная на рис. 2.

Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема для k -го рабочего контура возвратно-поступательного электрического генератора при работе на активно-индуктивную нагрузку:
 L_{0k} , R_{0k} – индуктивность и активное сопротивление рабочей обмотки; E_k – ЭДС движения;
 I_{mk} – идеальный источник тока

Fig. 2. The equivalent circuit diagram for the k^{th} working contour of the reciprocating electric generator operating for active-inductive loading:
 L_{0k} , R_{0k} – inductance and active resistance of the working winding; E_k – EMF of motion; I_{mk} – ideal current source



Анализ картины распределения магнитного поля программным продуктом ELCUT показал, что ВПЭГ может быть поставлена в соответствие эквивалентная схема магнитной цепи, показанная на рис. 3.

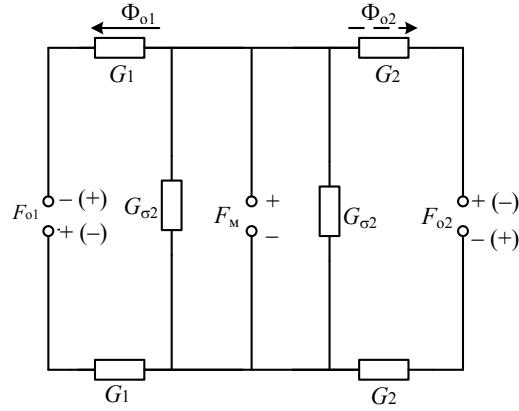


Рис. 3. Эквивалентная схема магнитной цепи
возвратно-поступательного электрического генератора

Fig. 3. The equivalent design of a magnetic circuit of the reciprocating electric generator

На рис. 3 индексы 1 и 2 относятся к левой и правой обмоткам возбуждения соответственно. $G_1 = \frac{G_{e1}G_{\delta 1}}{G_{e1} + G_{\delta 1}}$ и $G_2 = \frac{G_{e2}G_{\delta 2}}{G_{e2} + G_{\delta 2}}$, $G_{\delta 1}$ и $G_{\delta 2}$ – магнитные проводимости воздушных зазоров; G_{e1} , G_{e2} – магнитные проводимости воздушных промежутков по путям потоков выпучивания; $G_{\sigma 1}$, $G_{\sigma 2}$ – магнитные проводимости воздушных промежутков по путям потоков рассеяния; F_M – магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения; F_{o1} , F_{o2} – МДС рабочей обмотки; Φ_{o1} , Φ_{o2} – магнитный поток через рабочую обмотку.

На основании законов Кирхгофа [7, 11]: закон равновесия МДС и закон равенства потоков в узле, а также согласно эквивалентным схемам, представленным на рис. 2 и 3, и формулам (1) и (2), уравнение электрического равновесия и выражение для напряжения нагрузки k -го рабочего контура ВПЭГ с электромагнитным возбуждением запишем через компоненту A_z векторного магнитного потенциала $\vec{A}$:

$$i_k(R_{0k} + R_H) + L_H \frac{di_k}{dt} + \left(w_k i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) \frac{di_k}{dt} + i_k w_k \frac{d}{dt} \left(i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) + w_k \frac{d}{dt} \left(S^{-1} \oint A_{zk[i_1 \dots i_n, n \neq k]} dS \right) = 0; \quad (3)$$

$$U_{hk} = i_k R_H + L_H \frac{di_k}{dt}, \quad (4)$$

где R_{0k} – активное сопротивление обмотки k -го контура; R_H – активное сопротивление нагрузки; L_H – индуктивность нагрузки; w_k – количество витков k -го контура; $i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS$ – собственная индуктивность на один виток k -го контура, учитывающая продольное приращение магнитно-

го потока; $S^{-1} \oint_{A_{zk[i_1 \dots i_n, n \neq k]}} dS$ – потокосцепление на один виток k -го контура, созданное током n -го контура, учитывающее продольное приращение магнитного потока.

Нелинейная ММ на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала (3) и (4) описывает электромагнитные процессы в генераторе возвратно-поступательного типа с электромагнитным возбуждением и позволяет получить мгновенные значения напряжения, тока и мощности генератора, учитывая особенности конфигурации магнитной системы генератора, нелинейность кривой намагничивания ферромагнитных материалов и неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре. Математическую модель на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала целесообразно использовать на завершающих этапах электромагнитного расчета генератора в целях уточнения полученных результатов.

Эксперимент

Для экспериментальной проверки адекватности математической модели ВПЭГ (3) и (4) был изготовлен макетный образец ВПЭГ (рис. 4).

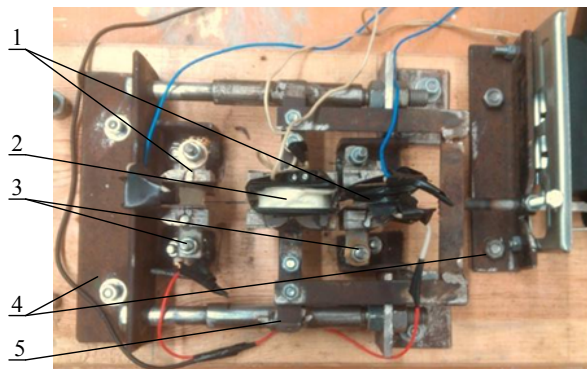


Рис. 4. Внешний вид макетного образца
возратно-поступательного электрического генератора

Fig. 4. Exterior of the breadboard sample of the reciprocating electric generator

Макетный образец ВПЭГ состоит из неподвижной части 1 в виде двух П-образных магнитопроводов и подвижной части 2, представляющей собой Н-образный магнитопровод. Магнитопроводы набраны из листов электротехнической стали марки Э-31, толщиной листа 0,5 мм. П-образные магнитопроводы закреплены с помощью металлической скобы 3 на неподвижном основании 4, что позволяет перемещать обе части магнитопровода в горизонтальном направлении, обеспечивая возможность регулировки воздушного зазора. Н-образный магнитопровод установлен на скользящие опоры 5, выполненные в виде полых толстостенных трубок, которые перемещаются вдоль направляющих, жестко закрепленных на неподвижном

основании. На обоих П-образных магнитопроводах устанавливается сосредоточенная обмотка, выполненная из медного изолированного провода сечением $0,679 \text{ мм}^2$. Обмотки между собой соединяются последовательно, при этом общее количество витков составляет 570. На Н-образный магнитопровод намотана обмотка возбуждения из медного изолированного провода сечением $0,113 \text{ мм}^2$ и числом витков 124 и подключена к источнику постоянного тока марки RFT-3712. В макетном образце ВПЭГ для имитации СПД применяется приводной электродвигатель мощностью 100 Вт с амплитудой возвратно-поступательных колебаний подвижной части, равной 16 мм, и частотой колебаний, регулируемой в диапазоне от 5 до 50 Гц. Сопротивление активной нагрузки – керамический проволочный регулируемый реостат с зафиксированным сопротивлением на 36 Ом.

С целью осуществления дальнейших исследований ВПЭГ при разработке макетного образца ВПЭГ по возможности была обеспечена его универсальность, что позволяет анализировать различные варианты конструкций ВПЭГ.

Временная диаграмма тока в рабочей обмотке генератора при линейной нагрузке представлена на рис. 5, характеристика холостого хода ВПЭГ (зависимость ЭДС холостого хода от МДС обмотки возбуждения) – на рис. 6, внешняя характеристика ВПЭГ (зависимость выходного напряжения генератора от тока в цепи нагрузки) – на рис. 7. Пунктирные линии на рисунках – экспериментальные значения, сплошные – расчетные значения, полученные с помощью нелинейной ММ.

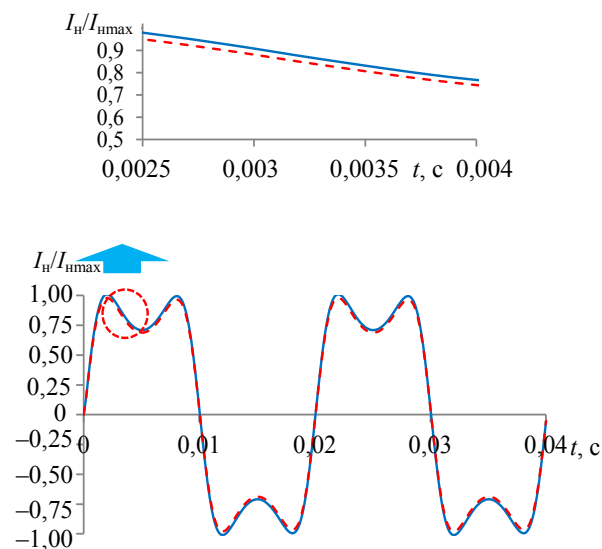


Рис. 5. Временная диаграмма тока в рабочей обмотке возвратно-поступательного электрического генератора при активно-индуктивной нагрузке

Fig. 5. Time diagram of the current in the working winding of the reciprocating electric generator during active-inductive loading

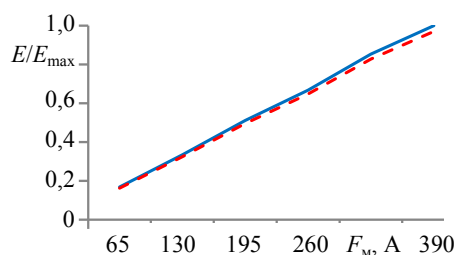


Рис. 6. Характеристика холостого хода
возвратно-поступательного электрического
генератора

Fig. 6. The characteristic of idle speed
of the reciprocating electric generator

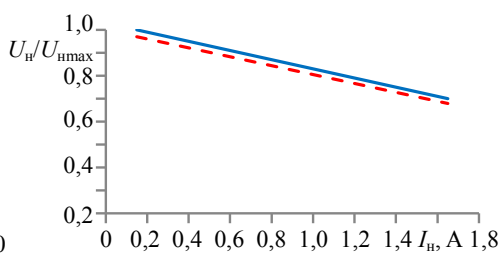


Рис. 7. Внешняя характеристика
возвратно-поступательного электрического
генератора

Fig. 7. The external characteristic
of the reciprocating electric generator

ВЫВОД

Сравнение экспериментальных и расчетных результатов, представленных на рис. 5–6, показывает их расхождение не более чем на 4 %. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что нелинейная математическая модель на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала (3) и (4) отражает характеристики генератора продольного типа с высокой степенью адекватности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // Мобильная техника. 2004. № 2. С. 13–17.
2. Design of a Hydraulic Free-Piston Engine / P. A. J. Achten [et. al] // SAE Off-Highway Engineering. 2001. February. P. 23–28.
3. Cawthorne, W. R. Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine / W. R. Cawthorne. West Virginia: Morgantown, 1999. 113 p.
4. Разработка математической модели энергоустановки для автономного образца вооружения на базе возвратно-поступательного электрического генератора полной мощностью до 15 кВА: отчет о НИР № 2073/16 / УО «ВА РБ»; рук. А. Н. Малашин. Минск, 2016. 76 с.
5. Темнов, Э. С. Разработка теоретических основ расчета и конструирования малоразмерных двигатель-генераторных установок как единой динамической системы / Э. С. Темнов. Тула, 2005. 134 с.
6. Костиков, В. Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование / В. Г. Костиков, Е. М. Парфенов, Е. М. Шахнов / 2-е изд. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. 344 с.
7. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский [и др.] // Вестник Военной академии Республики Беларусь. 2016. Т. 53, № 4. С. 108–114.
8. Сафонов, В. А. Термомеханический двигатель с линейным генератором, работающий по циклу Стирлинга / В. А. Сафонов, И. Л. Белецкий, П. Н. Кузнецов // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 4. С. 60–62.

9. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. СПб.: КОРОНА принт, 2013. 368 с.
10. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.
11. Балагуров, В. А. Электрические машины с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. Н. Ларионов. М.: Энергия, 1964. 480 с.

Поступила 29.03.2017 Подписана в печать 21.06.2017 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. Pinskii F. I. (2004) Power Plants with Free Piston Engine Generators. *Mobil'naya Tekhnika* [Mobile Technology], (2), 13–17 (in Russian).
2. Achten P. A. J., Van Den Oever J. P. J., Potma J., Vael G. E. M. (2001, February) *Design of a Hydraulic Free-Piston Engine*. SAE Off-Highway Engineering, 23–28.
3. Cawthorne W. R. (1999) *Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use with a Linear Internal Combustion Engine*. West Virginia, Morgantown. 113.
4. Malashin A. N. (Supervisor) (2016) *Development of a Mathematical Model of the Power Plant for an Autonomous Sample of Weapons on the Basis of Reciprocating Electric Generator of Full Power up to 15 kVA*: Report on Research Work N 2073/16. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus. 76 (in Russian).
5. Temnov E. S. (2005) *Development of Theoretical Bases of Calculation and Design of Small Engine Generator Sets as a United Dynamic System*. Tula. 134 (in Russian).
6. Kostikov V. G., Parfenov E. M., Shakhnov E. M. (2001) *Power Supplies for Electronic Means. Circuit Design and Construction*. 2nd ed. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom Publ. 344 (in Russian).
7. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Kaleda A. E., Sidyako O. V. (2016) The Use of the Reciprocating Electrical Generator to Improve the Efficiency of Power Units of Autonomous Specimens of Weapons. *Vestnik Voennoi Akademii Respubliki Belarus'* [Herald of the Military Academy of the Republic of Belarus], 53 (4), 108–114 (in Russian).
8. Safonov V. A., Beletskii I. L., Kuznetsov P. N. (2014) Thermomechanical Engine with a Linear Generator Operating in Accordance with the Stirling Cycle. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya = Aerospace Technic and Technology*, (4), 60–62 (in Russian).
9. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. (2013) *Synchronous Electrical Machines of Reciprocating Motion*. Saint Petersburg, KORONA Print Publ. 368 (in Russian).
10. Ivanov-Smolenskii A. V. (1980) *Electrical Machines*. Moscow, Energiya Publ. 928 (in Russian).
11. Balagurov V. A., Galteyev F. F., Larionov A. N. (1964) *Electric Machines with Permanent Magnets*. Moscow, Energiya Publ. 480 (in Russian).

Received: 29 March 2017

Accepted: 21 June 2017

Published online: 29 March 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>

УДК 666.97.035:691.32:519.6

Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов

А. М. Нияковский¹⁾, В. Н. Романюк¹⁾, Ю. В. Яцкевич¹⁾, А. Н. Чичко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В промышленных теплотехнологических установках ускоренной гидратации бетона, являющихся основным элементом теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий, режимы тепловой обработки и организация подвода теплоты к обрабатываемому в них изделию обусловлены требуемым распределением температур в объеме бетонного тела, обеспечивающим заданное качество продукции. Для оптимизации процессов, протекающих в таких теплотехнических устройствах, разработана математическая модель процесса твердения подвергаемого тепловой обработке бетонного изделия, позволяющая рассчитать пространственное распределение по его объему температуры и степени гидратации активной части цементного клинкера. Предлагаемая модель основывается на использовании нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности, учитывающего внутренние тепловыделения, обусловленные протеканием экзотермической реакции в бетонном теле и предопределяющие степень его гидратации и твердения. Для заданного режима тепловой обработки методом конечных объемов выполнено численное моделирование процесса твердения симметричного бетонного объекта кубической формы. В выделенных точках исследуемого объекта в зависимости от времени термообработки рассчитаны скорости изменения температуры и степени гидратации, проведен их анализ. При анализе графиков скорости изменения температуры выявлены характерные перегибы, согласующиеся с заданным тепловым режимом работы нагревателя. При заданном режиме тепловой обработки вида «подъем температуры – изотермическая выдержка – понижение температуры» в выделенных точках объекта наблюдается увеличение температуры по сравнению с температурой изотермической выдержки. Отмечается сдвиг температуры по сравнению с заданным тепловым режимом работы нагревателя, обусловленный неравновесностью процесса твердения бетона. Предлагаемая математическая модель позволяет определять момент достижения заданной температуры для любой точки внутреннего пространства подвергающегося тепловой обработке изделия, что можно использовать при проектировании новых и модернизации существующих теплотехнологических установок ускоренной гидратации бетона, а также систем автоматизированного управления процессом твердения бетона в указанных устройствах. Полученные в ходе исследования результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными других авторов.

Ключевые слова: энергетические системы, теплотехнические установки, твердение бетона, расчет тепловых режимов, математическое моделирование, кинетика гидратации цемента, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, разработка методов исследований

Для цитирования: Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes

A. M. Niyakovskii¹⁾, V. N. Romaniuk¹⁾, Yu. V. Yatskevich¹⁾, A. N. Chichko¹⁾

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

Abstract. In industrial heat-technological installations for accelerated hydration of concrete, which are the main element of the thermal power system of enterprises of concrete products, the modes of heat treatment and the organization of heat supply to the product processed in them are due to the required temperature distribution in the volume of the concrete body, providing a given product quality. In order to optimize the processes occurring in such thermal device, a non-stationary mathematical model of the hardening process of the concrete product subjected to heat treatment has been developed, which allows calculating the spatial distribution of its volume temperature and degree of hydration of the active part of the cement clinker. The proposed model is based on the use of a non-stationary three-dimensional heat equation that takes into account the internal heat release due to the exothermic reaction in a concrete body and determines the degree of its hydration and hardening. For a given mode of heat treatment with the use of the finite volume method, numerical simulation of the hardening process of a symmetric concrete object of cubic shape is performed. In the selected points of the object under study, depending on the time of heat treatment, the rates of temperature change and the degree of hydration were calculated and their analysis was carried out. When analyzing the graphs of the temperature change rate, the characteristic inflections consistent with the given thermal mode of the heater were revealed. By a given mode of heat treatment of the form of “temperature rise – isothermal exposure – temperature decrease” in the selected points of the object there is an increase in temperature compared with the specified maximum temperatures of isothermal exposure, which is associated with the exothermic effect of the hydration reaction. A temperature shift relative to the specified thermal mode of the heater due to the non-equilibrium of the concrete hardening process is observed. The proposed mathematical model allows determining the time of reaching a preset temperature for any point of the internal space of the product subjected to heat treatment that can be used in the when designing of new and modernizing of existing thermal technological installations of accelerated hydration of concrete, as well as systems for automated control of the concrete hardening process in these devices. The results obtained during the study are in satisfactory agreement with the experimental data of other authors.

Keywords: energy systems, heat engineering installations, concrete hardening, mathematical modeling, kinetics of cement hydration, temperature field, transient heat conduction equation, the development of research methods, the calculation of thermal modes

For citation: Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian)

Введение

Важное место в строительном комплексе Республики Беларусь занимает производство железобетонных изделий и конструкций (ЖБИ), удельный вес которого в общем объеме выпуска продукции промышленности строительных материалов страны около 15 % [1]. Действующей Государственной программой «Строительство жилья» на 2016–2020 годы [2] предусматривается доведение к 2020 г. норматива обеспеченности граждан жильем

до уровня не менее 27,3 м² на человека. В последнее десятилетие не менее 40 % вновь построенного в Беларуси жилья (если оценку вести в тысячах квадратных метрах общей площади) возводится с использованием в качестве стеновых материалов сборного бетона и железобетона [3]. В силу указанных причин проблема снижения энергоемкости производства сборного бетона и железобетона становится особенно актуальной, а ее решение будет способствовать удешевлению жилищного строительства.

При производстве ЖБИ в климатических условиях Республики Беларусь требуется тепловлажностная обработка (ТВО). Основными технологическими аппаратами, потребляющими теплоту на эти цели, являются устройства ускоренной гидратации (ямные камеры, обогреваемые стенды, кассеты), оптимизация технических и технологических параметров которых требует разработки новых и совершенствования существующих методов исследований и расчетов теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, режимов их функционирования. Решение этой важной задачи на современном этапе лежит в сфере информационных технологий и, в частности, математического моделирования.

Разработка физико-математических моделей процесса твердения строительных материалов является одной из сложнейших задач, имеющих важное как теоретическое, так и практическое значение для строительной отрасли [4, 5]. Несмотря на огромный практический интерес к расчетам процесса твердения строительных материалов, многие вопросы, касающиеся математического описания процессов твердения, еще недостаточно изучены, особенно в части применения к реальным конструкциям из бетона [6, 7].

Развитие IT-технологий применительно к задачам расчета процессов твердения при ТВО открывает новые пути для оптимизации технологических процессов, связанных с изготовлением бетонных конструкций [8]. Как известно, твердение бетона сопровождается процессом гидратации активной части цементного клинкера, определяющим, в конечном итоге, качество промышленной продукции из бетона и его прочность. Но при выполнении расчетов процессов твердения реальных объектов все еще преобладают тенденции, связанные с применением упрощенных одномерных приближений, в которых игнорируются одна или две координаты [9, 10]. Фактически при выборе технических решений в части оптимизации технологии изготовления изделий из бетона не учитываются особенности твердения материала, связанные с переносом теплоты по трем направлениям. В то же время именно задачи с 3D-геометрией позволяют учесть многие особенности реальных процессов, прежде всего для несимметричных объектов. Все это обосновывает необходимость разработки новых методов исследования и расчета устройств ускоренной гидратации и технологических режимов их эксплуатации при осуществлении ТВО.

Цель исследований – разработка новых методов моделирования процесса тепловой обработки бетона, направленных на повышение энергетиче-

ческой эффективности теплотехнологического оборудования и основанных на нестационарном трехмерном уравнении теплопроводности, учитывающем внутренний источник тепловыделения.

Математическая модель процесса и исходные данные

Для реализации цели была предложена математическая модель, включающая уравнение теплопроводности в трехмерной форме с источником тепловыделения, имитирующим процесс гидратации бетонной смеси. В качестве объекта для расчета использовался куб размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м. Поверхность его была окружена жесткой конструкцией в виде опалубки, которая задавала систему граничных условий для численного решения задачи теплопереноса. Три типа областей, имитирующих расчетную область куба, включая пространство твердеющего бетона Ω_1 , контур опалубки Ω_2 , контур тепловой среды Ω_3 , показаны на рис. 1. Каждая из перечисленных областей характеризовалась теплопроводностью, плотностью и удельной теплоемкостью материалов, включенных в расчет.

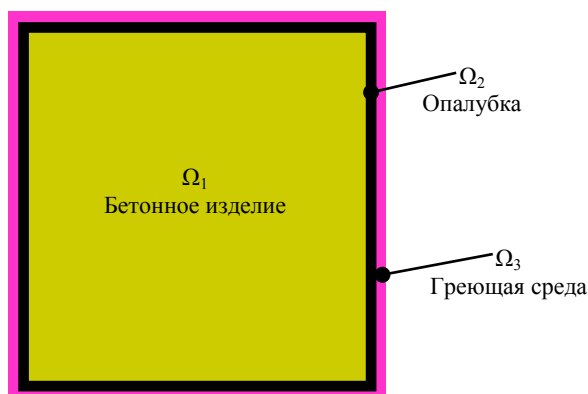


Рис. 1. Схематичная область моделируемого пространства

Fig. 1. A schematic of the simulated region of space

В расчетах использовался состав бетона, который соответствовал по массе соотношению Ц:П:Щ = 1:1,76:2,98, с $V/C = 0,4$, где Ц, П, Щ, В – удельные расходы составляющих бетон материалов (цемента, песка, щебня, воды), $\text{кг}/\text{м}^3$. В качестве вяжущего применяли портландцемент марки М400-Д20 с удельным расходом цемента $350 \text{ кг}/\text{м}^3$. Таким образом, плотность свежесозданной и уплотненной бетонной смеси (влажного бетона) составила: $\rho_b = Ц + П + Щ + В = 350 + 616 + 1043 + 140 = 2149 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Большинство бетонов в сухом состоянии имеют постоянное значение удельной теплоемкости, равное $840 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Вследствие малой изменчивости этого значения среднюю удельную теплоемкость свежесформованного бетонного изделия рассчитывали по формуле

$$c_6 = \frac{840(\Pi + \Pi + \Pi) + 4190B}{\Pi + \Pi + \Pi + B} = 1058 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}. \quad (1)$$

Удельная теплота гидратации использованного цемента (максимальное тепловыделение) составляла $Q_{\max} = 418,7$ кДж/кг. В численных расчетах использована функция $Q(T, \tau)$ (табл. 1), характеризующая процесс тепловыделения цемента при различных температурах, построенная на основе экспериментальных данных [11].

Таблица 1

Удельное тепловыделение цемента М400 (кДж/кг) $Q(T, \tau)$
в зависимости от температуры и времени гидратации

Specific heat dissipation of cement M400 (kJ/kg) $Q(T, \tau)$
depending on the temperature and time of hydration

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Время, сут									
	0	0,125	0,25	0,5	1	2	3	7	14	28
10	0	23	45	85	156	233	283	324	372	419
20	0	45	85	156	233	283	324	372	419	419
30	0	65	122	216	259	324	372	419	419	419
40	0	85	156	233	283	358	409	419	419	419
50	0	104	188	246	304	386	419	419	419	419
60	0	122	216	259	324	409	419	419	419	419
70	0	140	226	271	342	419	419	419	419	419
80	0	156	233	283	358	419	419	419	419	419
90	0	172	240	294	372	419	419	419	419	419
100	0	188	246	304	386	419	419	419	419	419

В качестве основного уравнения для расчета изменения температуры и степени гидратации использовалось уравнение теплопроводности, учитывающее экзотермический характер реакции гидратации, которое в указанной постановке имеет вид

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial \tau} = \frac{1}{c_6 \rho_6} \left(\frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right)}{\partial z} + \Pi P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right), \quad (2)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось y направлена вертикально); $T(x, y, z, \tau)$ – температура бетона в точке с координатами (x, y, z) в момент вре-

мени τ ; ρ_b – плотность бетона; Π – удельный расход цемента в бетоне, кг/м^3 ; c_b – удельная теплоемкость бетона; $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) на момент времени τ ; $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau)/Q_{\max}$ – степень гидратации цемента; $Q_{\max}$ – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг ; $\lambda(H, T)$ – теплопроводность бетона, зависящая от степени его гидратации и температуры; $P_q(Q, T)$ – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг , которая определяется по формуле

$$P_q(Q, T) = \frac{\partial Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T))}{\partial \tau} \approx \frac{Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T) + \Delta\tau) - Q(T, \tau_{\text{пр}}(Q, T))}{\Delta\tau}, \quad (3)$$

Q – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента к рассматриваемому моменту времени; $Q(T, \tau)$ – функция тепловыделения цемента (табл. 1); $\tau_{\text{пр}}(Q, T)$ – приведенное время гидратации цемента, которое определяется из табл. 1 как функция, обратная $Q(T, \tau)$, при фиксированном значении $T(\tau_{\text{пр}}(Q, T) = Q^{-1}(T, Q))$; $\Delta\tau$ – шаг изменения времени.

Параллельно с распределением температур в пространстве бетонного изделия производился расчет распределения тепловыделения и соответствующей ему степени гидратации цемента

$$\frac{\partial Q(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = Q_{\max} \frac{\partial H(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = P_q(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)). \quad (4)$$

Расчет изменения температуры в различных точках трехмерного пространства стальной опалубки и конструктивных элементов оборудования Ω_2 выполняли согласно уравнению теплопроводности

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{c_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}}} \left(\frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты; $T(x, y, z, \tau)$ – температура в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ ; $c_{\text{ст}}$ – удельная теплоемкость стали (475 Дж/кг); $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стали (7850 кг/м^3); $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность стали ($44,5 \text{ Вт/(м·К)}$).

Температура во всем пространстве среды (Ω_3) была задана режимом термообработки вида «подъем температуры – изотермическая выдержка – понижение температуры», изменявшимся по следующему закону: увеличение температуры от 20 до 85°C – в течение 4 ч, изотермическая выдержка при 85°C – 6 ч, охлаждение до 20°C со скоростью $11,25^\circ\text{C/ч}$ – примерно $5,8$ ч. В математической форме условия изменения температуры тепловой среды были заданы следующей записью:

$$\frac{\partial T_{\text{cp}}(\tau)}{\partial \tau} = \begin{cases} (85 - 20)/(4 \cdot 3600) \text{ град/с} & \text{при } 0 \leq \tau < 4 \text{ ч;} \\ 0 \text{ град/с} & \text{при } 4 \leq \tau < 10 \text{ ч;} \\ -11,25/3600 \text{ град/с} & \text{при } 10 \leq \tau < 15,8 \text{ ч;} \\ 0 \text{ град/с} & \text{при } 15,8 \leq \tau \text{ ч.} \end{cases} \quad (6)$$

Начальные условия для математической модели:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1. \end{cases} \quad (7)$$

Граничные условия математической модели на поверхности «бетон – среда тепловой обработки» (Ω_1 – Ω_3)

$$\begin{aligned} -\lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} &= \\ &= \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} - T_{\text{cp}}(\tau) \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где ∂i – это ∂x , или ∂y , или ∂z в соответствии с пространственной ориентацией границы; α – коэффициент теплоотдачи, соответствующий конвективному теплообмену в воздушной среде (принимали $\alpha = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$).

Аналогично граничные условия на поверхности «опалубка – среда тепловой обработки» (Ω_2 – Ω_3)

$$-\lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} = \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} - T_{\text{cp}}(\tau) \right). \quad (9)$$

Граничные условия на поверхности «опалубка – бетон» (Ω_2 – Ω_3)

$$\begin{aligned} \lambda(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} &= \\ &= \lambda_{\text{ст}} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_3 \cap \Omega_1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где ∂i – это ∂x , или ∂y , или ∂z в соответствии с пространственной ориентацией границы.

Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda(H, T)$ зависит от его температуры, водоцементного отношения, влажности, плотности. Значения $\lambda(H, T)$ приняты на основе проведенного анализа и систематизации опубликованных экспериментальных данных [12]. Полученные для использованного бетона величины сведения, по которым путем линейной интерполяции вычислялись коэффициенты теплопроводности бетона в его состоянии на каждый заданный момент времени, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda(H, T)$ в зависимости от температуры и степени гидратации цемента, Вт/(м·К)

Thermal conductivity coefficient of concrete $\lambda(H, T)$ depending on temperature and degree of cement hydration, W/(m·K)

Степень гидратации, %	Коэффициент теплопроводности при температуре, °С									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	4,15	4,10	4,05	4,00	3,95	3,90	3,85	3,80	3,75	3,70
20	3,78	3,77	3,76	3,75	3,74	3,73	3,72	3,71	3,70	3,69
40	3,44	3,43	3,42	3,41	3,40	3,39	3,38	3,37	3,36	3,35
60	3,11	3,10	3,09	3,08	3,07	3,06	3,05	3,04	3,03	3,02
80	2,77	2,76	2,75	2,74	2,73	2,72	2,71	2,70	2,69	2,68
100	2,44	2,43	2,42	2,41	2,40	2,39	2,38	2,37	2,36	2,35

Результаты расчета

Расчетный фрагмент визуализации распределения коэффициента гидратации в различных сеточных элементах на момент времени тепловой обработки $\tau = 14400$ с для центральной плоскости куба ($Y = 0,15$ м) размера $0,3 \times 0,3 \times 0,3$ м, подвергнутого тепловой обработке, представлен в табл. 3 (координаты точек сеточных элементов выделены курсивом). Из табл. 3 видно, что процесс твердения гидратирующего цемента сопровождается как нестационарностью, так и неоднородностью степени гидратации в пространстве куба.

Для численного анализа процесса твердения бетона были выделены точки объекта A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0,0375$ м от A_0); A_2 ($a = 0,075$ м от A_0); A_3 ($a = 0,15$ м от A_0), где a – расстояние между точками, для которых были построены зависимости изменения температуры и степени гидратации от времени тепловой обработки (рис. 2).

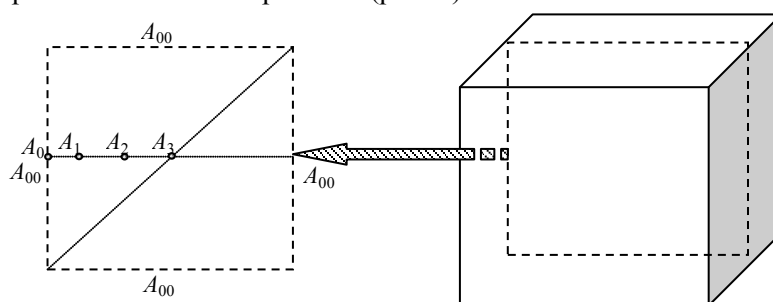


Рис. 2. Схематичное положение выделенных точек расчетного пространства куба с центральной плоскостью: A_{00} – множество точек по шести граням куба, определяющих заданную функцию режима тепловой обработки; A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0,0375$ м от A_0); A_2 ($a = 0,075$ м от A_0); A_3 ($a = 0,15$ м от A_0)

Fig. 2. Schematic position of the selected points of the calculated cube space with the central plane: A_{00} – a set of points on six faces of the cube that define a given function of the heat treatment mode; A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0.0375$ m from A_0); A_2 ($a = 0.075$ m from A_0); A_3 ($a = 0.15$ m from A_0)

Таблица 3

Числовые значения сеточных элементов, показывающие распределение коэффициента гидратации для центрального сечения плоскости куба $Y = 0,15$ м на момент времени тепловой обработки 4 ч (14400 с)
 Numerical values of the net elements showing the hydration coefficient distribution for the central axe cube of $Y = 0.15$ m at 4 hour heat treatment mark (14400 s)

Z/X	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28
0,30	22,69	22,53	22,36	22,21	22,09	22,00	21,93	21,90	21,91	21,95	22,02	22,12	22,25	22,40	22,57
0,28	22,53	22,12	21,83	21,61	21,45	21,33	21,25	21,21	21,22	21,27	21,35	21,48	21,66	21,90	22,21
0,26	22,36	21,83	21,45	21,16	20,95	20,80	20,71	20,67	20,68	20,73	20,84	21,00	21,22	21,53	21,95
0,24	22,21	21,61	21,16	20,82	20,58	20,41	20,30	20,25	20,26	20,32	20,44	20,63	20,90	21,26	21,75
0,22	22,09	21,45	20,95	20,58	20,30	20,11	19,99	19,94	19,95	20,02	20,15	20,36	20,66	21,06	21,59
0,20	22,00	21,33	20,80	20,41	20,11	19,91	19,78	19,73	19,73	19,81	19,95	20,18	20,49	20,92	21,48
0,18	21,93	21,25	20,71	20,30	19,99	19,78	19,65	19,59	19,60	19,68	19,83	20,06	20,39	20,83	21,41
0,16	21,90	21,21	20,67	20,25	19,94	19,73	19,59	19,53	19,54	19,62	19,77	20,01	20,34	20,79	21,37
0,14	21,91	21,22	20,68	20,26	19,95	19,73	19,60	19,54	19,55	19,63	19,78	20,02	20,35	20,80	21,38
0,12	21,95	21,27	20,73	20,32	20,02	19,81	19,68	19,62	19,63	19,70	19,85	20,08	20,41	20,85	21,42
0,10	22,02	21,35	20,84	20,44	20,15	19,95	19,83	19,77	19,78	19,85	20,00	20,22	20,53	20,95	21,50
0,08	22,12	21,48	21,00	20,63	20,36	20,18	20,06	20,01	20,02	20,08	20,22	20,42	20,71	21,11	21,63
0,06	22,25	21,66	21,22	20,90	20,66	20,49	20,39	20,34	20,35	20,41	20,53	20,71	20,97	21,32	21,79
0,04	22,40	21,90	21,53	21,26	21,06	20,92	20,83	20,79	20,80	20,85	20,95	21,11	21,32	21,61	22,01
0,02	22,57	22,21	21,95	21,75	21,59	21,48	21,41	21,37	21,38	21,42	21,50	21,63	21,79	22,01	22,29

Изменения температуры от времени тепловой обработки для выделенных точек центрального сечения куба представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, температура в выделенных точках A_i изменяется по закону, подобному режиму тепловой обработки (множество точек A_{00}), с некоторым запаздыванием во времени, что является характеристикой нестационарности процесса твердения бетона. Причем в области времени обработки $\tau = 20000\text{--}40000$ с для всех точек объекта имеется увеличение температуры по отношению к изотермической площадке заданного теплового режима обработки, что связано с тепловыделением, сопровождающим гидратацию цемента. При изменении положения точек A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0,0375$ м от A_0); A_2 ($a = 0,075$ м от A_0); A_3 ($a = 0,15$ м от A_0) по направлению к центру куба можно видеть, что зависимости $T(x, y, z, \tau)$ для всех точек смещены к центральной точке, что вполне согласуется в данном случае с физикой процесса нагревания твердеющего бетона (рис. 3).

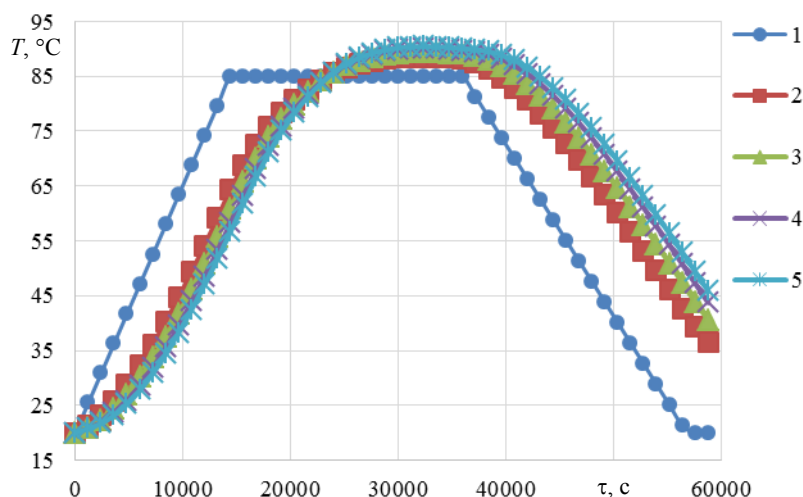


Рис. 3. Зависимость температуры от времени твердения кубического изделия размерами 0,30×0,30×0,30 м в выделенных точках пространства: 1 – множество точек, характеризующих работу нагревателя A_{00} ; 2 – точка A_0 ; 3 – A_1 ; 4 – A_2 ; 5 – A_3 ; A_{00} – функция режима термической обработки; A_0, A_1, A_2, A_3 – то же, что на рис. 2

Fig. 3. Temperature dependence on the hardening time of a 0.30×0.30×0.30 m cubic product in the selected points of space: 1 – set of points of the heating environment A_{00} ; 2 – point A_0 ; 3 – A_1 ; 4 – A_2 ; 5 – A_3 ; A_{00} – function of heat treatment; A_0, A_1, A_2, A_3 – same as in fig. 2

Скорость изменения температуры $\partial T/\partial \tau$ от времени тепловой обработки для выделенных точек центрального сечения куба показана на рис. 4. Как видно из рис. 4, на кривой скорости температуры $\partial T/\partial \tau$ в выделенных точках A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0,0375$ м от A_0); A_2 ($a = 0,075$ м от A_0); A_3 ($a = 0,15$ м от A_0) имеются перегибы, согласующиеся с соответствующими τ -точками перехода: «подъем температуры – изотермическая выдержка», «изотермическая выдержка – снижение температуры».

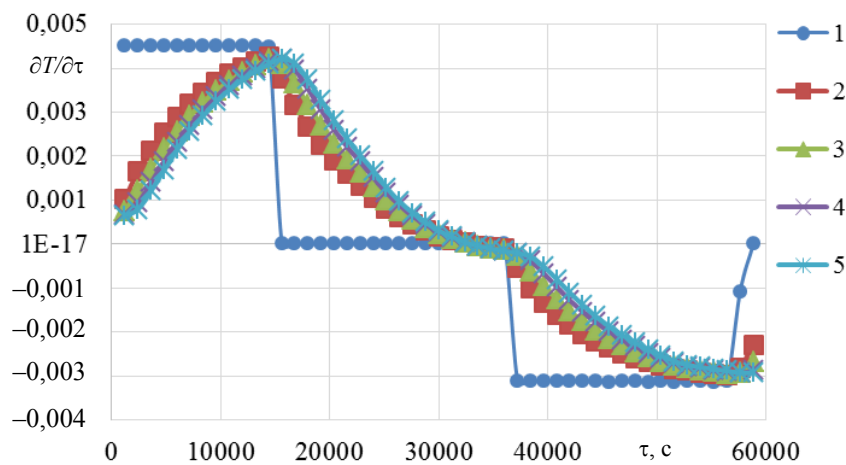


Рис. 4. Зависимость скорости изменения температуры $\partial T/\partial \tau$ от времени твердения кубического изделия размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м в выделенных точках пространства: 1 – множество точек, характеризующих работу нагревателя A_{00} ; 2 – точка A_0 ; 3 – A_1 ; 4 – A_2 ; 5 – A_3 ; A_{00} – функция режима термической обработки; A_0, A_1, A_2, A_3 – то же, что на рис. 2

Fig. 4. Dependence of the temperature change rate $\partial T/\partial \tau$ on the hardening time of a $0.30 \times 0.30 \times 0.30$ m cubic product in the selected points of space: 1 – set of points characterizing the operation of the heater A_{00} ; 2 – point A_0 ; 3 – A_1 ; 4 – A_2 ; 5 – A_3 ; A_{00} – function of heat treatment; A_0, A_1, A_2, A_3 – same as in fig. 2

Результаты моделирования коэффициента гидратации в выделенных точках A_0 (0,15; 0; 0,15); A_1 ($a = 0,0375$ м от A_0); A_2 ($a = 0,075$ м от A_0); A_3 ($a = 0,15$ м от A_0) центрального сечения куба, подвергнутого тепловой обработке, представлены в табл. 4. Согласно табл. 4, степень гидратации в выделенных точках увеличивается со временем тепловой обработки для всех рассмотренных точек. Причем характер изменения производной степени гидратации сопровождается аналогичными перегибами в переходных точках режима тепловой обработки, что имеет место для зависимостей $T(x, y, z, \tau)$ и $\partial T/\partial \tau$ (рис. 3 и 4 соответственно).

Как видно из табл. 4, максимизация скорости гидратации наблюдается в интервале времени тепловой обработки 16800–20400 с. Функция скорости гидратации изменяется по закону Гаусса. Однако в интервале 40000–50000 с тепловой обработки имеются некоторые отклонения в изменении степени гидратации от этого закона, что связано с прохождением третьего интервала режима термической обработки, сопровождающегося уменьшением температуры. Следует отметить эффект запаздывания в изменении скорости гидратации ($\partial H/\partial \tau$), что связано с нестационарностью процесса твердения.

На следующем этапе исследования был выполнен сравнительный анализ приведенных выше закономерностей с опубликованными экспериментальными данными. В частности, математически обработаны экспериментальные данные, полученные в [13], для двух выделенных точек куба

размерами 0,3×0,3×0,3 м, которые на рис. 5 условно обозначены как *E* и *F* и находятся на разных расстояниях от поверхности куба в его центральном сечении. Как видно из рис. 5, кривая нагрева температур для точек *E* и *F* сдвинута относительно кривой температуры тепловой обработки на границе раздела системы «бетон в опалубке – среда тепловой обработки».

Таблица 4

Значения коэффициента гидратации *H* и скорости гидратации $\partial H/\partial \tau$ от времени тепловой обработки τ в выделенных точках куба *A_i* размерами 0,30×0,30×0,30 м
Values of the coefficient of hydration *H* and the rate of hydration $\partial H/\partial \tau$ of the heat treatment time τ in the selected points of the cube *A_i* size 0.30×0.30×0.30 m

τ , с	<i>H</i> , % (<i>A</i> ₀)	$\partial H/\partial \tau$ (<i>A</i> ₀)	<i>H</i> , % (<i>A</i> ₁)	$\partial H/\partial \tau$ (<i>A</i> ₁)	<i>H</i> , % (<i>A</i> ₂)	$\partial H/\partial \tau$	<i>H</i> , % (<i>A</i> ₃)	$\partial H/\partial \tau$ (<i>A</i> ₃)
0	0,0005		0,0005		0,0005		0,0005	
1200	1,2040	0,001003	1,1990	0,000999	1,1970	0,000997	1,1970	0,000997
2400	2,4570	0,001044	2,4210	0,001018	2,4060	0,001008	2,4010	0,001003
3600	3,7900	0,001111	3,6990	0,001065	3,6510	0,001038	3,6290	0,001023
4800	5,2290	0,001199	5,0580	0,001133	4,9610	0,001092	4,9110	0,001068
6000	6,7920	0,001303	6,5250	0,001223	6,3620	0,001168	6,2740	0,001136
7200	8,4950	0,001419	8,1170	0,001327	7,8770	0,001263	7,7430	0,001224
8400	10,3500	0,001546	9,8490	0,001443	9,5230	0,001372	9,3350	0,001327
9600	12,3600	0,001675	11,7300	0,001568	11,3100	0,001489	11,0700	0,001446
10800	14,5200	0,001800	13,7700	0,001700	13,2600	0,001625	12,9500	0,001567
12000	16,8400	0,001933	15,9600	0,001825	15,3500	0,001742	14,9900	0,001700
13200	19,3000	0,002050	18,3000	0,001950	17,6100	0,001883	17,1800	0,001825
14400	21,9000	0,002167	20,7900	0,002075	20,0100	0,002000	19,5200	0,001950
15600	24,5900	0,002242	23,3900	0,002167	22,5400	0,002108	22,0100	0,002075
16800	27,3300	0,002283	26,0800	0,002242	25,1700	0,002192	24,6000	0,002158
18000	30,0700	0,002283	28,8000	0,002267	27,8700	0,002250	27,2800	0,002233
19200	32,8000	0,002275	31,5300	0,002275	30,5900	0,002267	29,9900	0,002258
20400	35,5000	0,00225	34,2500	0,002267	33,3200	0,002275	32,7200	0,002275
21600	38,1600	0,002217	36,9300	0,002233	36,0200	0,002250	35,4300	0,002258
22800	40,7000	0,002117	39,5600	0,002192	38,6800	0,002217	38,1100	0,002233
24000	43,0400	0,001950	42,0300	0,002058	41,2400	0,002133	40,7100	0,002167
25200	45,1700	0,001775	44,2900	0,001883	43,5900	0,001958	43,1300	0,002017
26400	47,1000	0,001608	46,3400	0,001708	45,7400	0,001792	45,3400	0,001842
27600	48,8400	0,001450	48,1900	0,001542	47,6800	0,001617	47,3300	0,001658
28800	50,3900	0,001292	49,8400	0,001375	49,4100	0,001442	49,1200	0,001492
30000	51,7600	0,001142	51,3100	0,001225	50,9500	0,001283	50,7100	0,001325
31200	52,9900	0,001025	52,6100	0,001083	52,3100	0,001133	52,1100	0,001167
32400	54,0700	0,000900	53,7500	0,00095	53,5100	0,001000	53,3500	0,001033
33600	55,0200	0,000792	54,7600	0,000842	54,5700	0,000883	54,4300	0,000900
34800	55,8600	0,000700	55,6500	0,000742	55,4900	0,000767	55,3800	0,000792
36000	56,6000	0,000617	56,4300	0,000650	56,3000	0,000675	56,2100	0,000692

Окончание табл. 4

$\tau, \text{с}$	$H, \% (A_0)$	$\partial H / \partial \tau (A_0)$	$H, \% (A_1)$	$\partial H / \partial \tau (A_1)$	$H, \% (A_2)$	$\partial H / \partial \tau$	$H, \% (A_3)$	$\partial H / \partial \tau (A_3)$
37200	57,2500	0,000542	57,1100	0,000567	57,0100	0,000592	56,9300	0,000600
38400	57,8700	0,000517	57,7400	0,000525	57,6400	0,000525	57,5800	0,000542
39600	58,4800	0,000508	58,3500	0,000508	58,2500	0,000508	58,1900	0,000508
40800	59,0600	0,000483	58,9400	0,000492	58,8500	0,000500	58,7900	0,000500
42000	59,6300	0,000475	59,5200	0,000483	59,4300	0,000483	59,3800	0,000492
43200	60,1600	0,000442	60,0700	0,000458	59,9900	0,000467	59,9400	0,000467
44400	60,6700	0,000425	60,5900	0,000433	60,5300	0,000450	60,4800	0,00045
45600	61,1300	0,000383	61,0900	0,000417	61,0400	0,000425	61,0000	0,000433
46800	61,5600	0,000358	61,5500	0,000383	61,5200	0,000400	61,5000	0,000417
48000	61,9300	0,000308	61,9600	0,000342	61,9600	0,000367	61,9500	0,000375
49200	62,2400	0,000258	62,3300	0,000308	62,3600	0,000333	62,3700	0,000350
50400	62,5000	0,000217	62,6400	0,000258	62,7100	0,000292	62,7400	0,000308
51600	62,7500	0,000208	62,9000	0,000217	63,0000	0,000242	63,0600	0,000267
52800	63,0000	0,000208	63,1500	0,000208	63,2500	0,000208	63,3200	0,000217
54000	63,2500	0,000208	63,4000	0,000208	63,5100	0,000217	63,5700	0,000208
55200	63,5000	0,000208	63,6500	0,000208	63,7600	0,000208	63,8300	0,000217
56400	63,7300	0,000192	63,9000	0,000208	64,0100	0,000208	64,0800	0,000208
57600	63,9500	0,000183	64,1300	0,000192	64,2600	0,000208	64,3300	0,000208
58800	64,1300	0,000150	64,3400	0,000175	64,4800	0,000183	64,5600	0,000192

Аналогичный эффект запаздывания имел место и для данных, полученных по модели (1)–(10). Несмотря на различие в функциях тепловой обработки, используемых в [13] и в настоящей статье, следует отметить удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных, показывающее адекватность предлагаемой нестационарной модели процесса твердения бетонного изделия в трехмерной постановке.

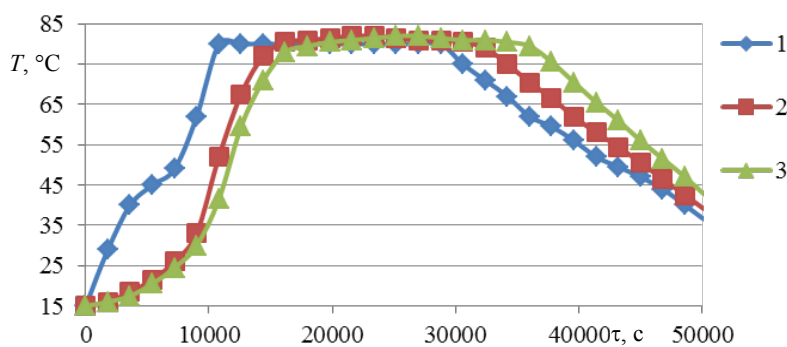


Рис. 5. Экспериментальная зависимость температуры от времени твердения кубического изделия размерами 0,30×0,30×0,30 м в выделенных точках пространства: 1 – множество точек, характеризующих работу нагревателя; 2 – точка E; 3 – точка F

Fig. 5. Experimental dependence of the temperature on the hardening time of size 0.30×0.30×0.30 m cubic products in the selected points of space: 1 – set of points that characterize the operation of the heater; 2 – point E; 3 – point F

ВЫВОДЫ

1. На основе нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности с учетом источника тепловыделения предложена модель для расчета процесса твердения бетона в симметричной форме с системой начальных и граничных условий. Выполнены компьютерные расчеты эволюционного пространственного распределения температур и коэффициента гидратации для заданного объекта симметричной формы размерами $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ м. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных, взятых из [13], по температурам, что свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

2. Установлено, что при режиме термообработки вида «подъем температуры – изотермическая выдержка – снижение температуры» в выделенных точках объекта наблюдается повышение температуры по сравнению с заданными максимальными температурами изотермической выдержки, связанное с выделением теплоты гидратации. Расчетным методом показан эффект передачи теплоты от тепловой среды с опалубкой к центральной части изделия, заключающийся в сдвиге эволюционной кривой температуры сеточного элемента по сравнению с заданным режимом «подъем температуры – изотермическая выдержка – снижение температуры», что обусловлено неравновесностью процесса твердения бетона.

3. Предложенная математическая модель позволяет определять эффекты запаздывания температуры и степени гидратации, превышения температуры для различных точек внутреннего пространства объекта над температурой греющей среды, а также производить расчет оптимального распределения температур по внешней границе бетонного тела, обеспечивающего равномерную степень гидратации по его объему при минимальных затратах тепловой энергии. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации установок ускоренной гидратации бетонов и разработке систем автоматизированного управления ими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство строительных материалов – 2015 год [Электронный ресурс] // ЗАО «Инвестиционная компания «ЮНИТЕР». Режим доступа: <http://www.uniter.by/upload/Construction%20materials%20industry.pdf>. Дата доступа: 19.01.2019.
2. Государственная программа «Строительство жилья» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 21.04.2016 № 325 // Совет Министров Республики Беларусь. Режим доступа: <http://www.government.by/ru/solutions/2470>.
3. Инвестиции и строительство в Республике Беларусь за 2011–2017 годы. [Электронный ресурс] // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Режим доступа: http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_7856/. Дата доступа: 19.01.2019.
4. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
5. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.

6. Дмитривич, А. Д. Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде / А. Д. Дмитривич. М.: Стройиздат, 1967. 243 с.
7. Ушеров-Маршак, А. В. Информационная технология бетона ускоренного твердения / А. В. Ушеров-Маршак, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. 1994. № 6. С. 2–4.
8. Ушеров-Маршак, А. В. «Термобет-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. 2000. № 4. С. 2–5.
9. Федосов, С. В. Применение методов математической физики для моделирования массо- и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гущин // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 65–67.
10. Аксенчик, К. В. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер для тепловлажностной обработки железобетонных изделий / К. В. Аксенчик. Иваново, 2014. 20 с.
11. Марьямов, Н. Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки) / Н. Б. Марьямов. М.: Стройиздат, 1970. 272 с.
12. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. № 2. С. 29–34.
13. Миронов, С. А. Ускорение твердения бетона / С. А. Миронов, Л. А. Малинина. М.: Стройиздат, 1964. 348 с

Поступила 25.12.2018 Подписана в печать 26.02.2019 Опубликовано онлайн 29.03.2019

REFERENCES

1. Production of Construction Materials-2015. CJSC “Investment Company “UNITER”. Available at: [http://www.uniter.by/upload/Construction %20materials% 20industry.pdf](http://www.uniter.by/upload/Construction%20materials%20industry.pdf). (Accessed 19 January 2019) (in Russian).
2. The “Housing Construction” State Program for 2016–2020 Approved by the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 21.04.2016, No 325. *Council of Ministers of the Republic of Belarus*. Available at: <http://www.government.by/ru/solutions/2470>. (Accessed 19 January 2019) (in Russian).
3. Investments and Construction in the Republic of Belarus for 2011–2017. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_compilation/index_7856/. (Accessed 19 January 2019.) (in Russian).
4. Bazhenov Y. M. (2002) *Technology of Concrete*. Moscow, ASV Publ. 500 (in Russian).
5. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Physics Concrete*. Moscow, Stroizdat Publ. 464 (in Russian).
6. Dmitrovich A. D. (1967) *Heat and Mass Transfer During Hardening of Concrete in a Steam Environment*. Moscow, Stroizdat Publ. 243 (in Russian).
7. Usharov-Marshak A. V., Sinyakin A. G. (1994) Information Technology of Concrete Accelerated Curing. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (6), 2–4 (in Russian).
8. Usharov-Marshak A. V., Gil’ Yu. B., Sinyakin A. G. (2000) “Thermoset-M” Information Technology for Cast-in-Situ Concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 4, 2–5 (in Russian).
9. Fedosov S. V., Ibragimov A. M., Gushchin A. V. (2008) Application of Methods of Mathematical Physics for the Simulation of Mass- and Energy Transfer in Technological Processes of the Construction Industry. *Stroitel’nye Materialy* [Construction Materials], (4), 65–67 (in Russian).
10. Aksenchik V. K. (2014) *Improvement of Thermal Work of Steaming Chambers for Heat and Moisture Treatment of Reinforced Concrete Products*. Ivanovo, 20 (in Russian).
11. Mar'yamov N. B. *Heat Treatment of Products at the Plant of Precast Concrete (Processes and Installations)*. Moscow, Stroizdat Publ. 272 (in Russian).
12. Krasulina L. V. (2012) Structural and Thermophysical Properties of Hardening Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 29–34 (in Russian).
13. Mironov S. A. (1964) *Acceleration of Hardening of Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 348 (in Russian).

Received: 25 December 2018 Accepted: 26 February 2019 Published online: 29 March 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-192-200>

UDC 681.5

Compare of Transient Quality in Automatic Control Systems with Classic PID Algorithm and Optimal Regulator

G. T. Kulakov¹⁾, K. I. Artsiomenka¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Abstract. Currently, about 90–95% of generic controllers use the PID algorithm to generate control actions, while 64% of the PID controllers are used in single-circuit automatic control systems. Most of industries (power industry among them) use hundreds of automatic control systems. The quality of their work is the basis of economic efficiency of technical processes, ensuring safety, reliability, durability and environmental friendliness of both technological equipment and automation equipment. There are different modifications of PID-controller structure implementation. In practice the ideal PID controller with a filter and the classic PID regulator (serial connection of the ideal PI controller and the real PD regulator as the direct action elements) are widely used. The problem of choosing a rational structure and a method of parametric optimization of PID controllers, which provide the best direct indicatives of the quality in the development of the main effects in single-circuit automatic control systems, becomes urgent. However, only for the classical PID controllers, which are widely used at present, there are more than three hundred methods for adjusting the three parameters of the optimal dynamic adjustment, as well as the ballast time constant. This results in arising a problem of substantiation of the best structure and method of parametric optimization of classical PID regulators. As a basic option, one of the simplest and most obvious one, viz. the method of automated adjustment of the controller in the Simulink MatLab environment had been chosen, which was compared with the method of full compensation in general for objects with a transfer function in the form of an inertial link with a conditional delay. Two variants of control action realization on the basis of the structural scheme of the optimal regulator developed by the Belarusian national technical University were also offered. In contrast with the classic PID controller, the optimal controller has one parameter of dynamic adjustment setting. The results of simulation of transients at basic perturbations confirmed that the best direct indicatives of the quality are provided with an optimal regulator, which makes it possible to recommend it for wide implementation instead of the classic PID controllers.

Keywords: transfer function, transient process, classic PID controller, optimal regulator, directly indicative of the quality, single-circuit automatic control system

For citation: Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2019) Compare of Transient Quality in Automatic Control Systems with Classic PID Algorithm and Optimal Regulator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 192–200. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-192-200>

Сравнение качества переходных процессов систем автоматического управления с классическим ПИД-алгоритмом и оптимальным регулятором

Г. Т. Кулаков¹⁾, К. И. Артёменко¹⁾

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

Реферат. В настоящее время около 90–95 % типовых регуляторов используют ПИД-алгоритм формирования управляющих воздействий, при этом среди ПИД-регуляторов 64 %

Адрес для переписки

Кулаков Геннадий Тихонович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes_bntu@tut.by

Address for correspondence

Kulakov Gennady T.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes_bntu@tut.by

используется в одноконтурных системах. Большинство отраслей промышленности, в том числе энергетика, содержат сотни систем автоматического управления, качество работы которых является основой экономической эффективности технических процессов, обеспечивая безопасность, надежность, долговечность и экологичность работы как технологического оборудования, так и самих технических средств автоматизации. Существуют разные модификации реализации структуры ПИД-регуляторов. На практике чаще всего применяют идеальные ПИД-регуляторы с фильтром, а также классические ПИД-регуляторы как последовательное соединение идеального и реального ПД-регуляторов в виде звеньев быстрого реагирования. Актуальной становится задача выбора рациональной структуры и метода параметрической оптимизации ПИД-регуляторов, которые обеспечивают лучшие прямые показатели качества при отработке основных воздействий в одноконтурных системах автоматического управления. Вместе с тем только для классических ПИД-регуляторов, широко используемых в настоящее время, существует более трехсот методов настройки трех параметров оптимальной динамической настройки, а также балластной постоянной времени. Из-за этого возникает проблема обоснования лучшей структуры и метода параметрической оптимизации классических ПИД-регуляторов. В качестве базового варианта выбран один из самых простых и наглядных – метод автоматизированной настройки регулятора в среде Simulink MatLab, который сравнивался с методом полной компенсации в общем виде для объектов с передаточной функцией в виде инерционного звена с условным запаздыванием. Также предложены два варианта реализации управляющего воздействия на базе структурной схемы оптимального регулятора, разработанного Белорусским национальным техническим университетом. В отличие от классического ПИД-регулятора оптимальный регулятор имеет один параметр динамической настройки. Результаты моделирования переходных процессов при основных возмущениях подтверждают, что лучшие прямые показатели качества обеспечивает оптимальный регулятор. Это позволяет рекомендовать его для широкого внедрения вместо классических ПИД-регуляторов.

Ключевые слова: передаточная функция, переходной процесс, классический ПИД-регулятор, оптимальный регулятор, прямые показатели качества, одноконтурная система автоматического управления

Для цитирования: Кулаков, Г. Т. Сравнение качества переходных процессов систем автоматического управления с классическим ПИД-алгоритмом и оптимальным регулятором / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёмченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 192–200. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-192-200>

Introduction

Adaptive control systems design is one of most effective method to upgrade regulation quality of process variables. Adaptive control systems must consider plant's dynamic behaviours for wide range of load variation and dynamics of disturbances. They must use combined control principle in response to deviation and disturbance [1].

Long list of papers verifies this problem's relevance and importance. These scientific papers deal with PID controllers' adjustment and their realization [2–10]. This type of controller is the most difficult for adjustment among continuous controllers. PID controllers are used to regulate plants those are described differential equations of higher order. So transfer functions of plants can't be approximated dynamic elements of first order with time delay, because they can't give significant improvement of PID controller control quality [5]. Problem of adaptation automatic process regulator settings is reputed relevance

too, because dynamic behaviours of plant are varied in wide range of load variation [6].

Within the order of 90–95 % under service regulators are using PID algorithm [6]. Also 64 % PID controllers are used in single loop automatic control systems and 36 % are used in multi loop systems. Thus problem of design and parametric optimization method for PID controllers becomes relevance. Solution to this problem lets to get best regulation costs in single loop automatic control systems to the different disturbances.

Description of simulation model

Block diagram of transient simulation for single loop automatic control system (ACS) is shown in the fig. 1.

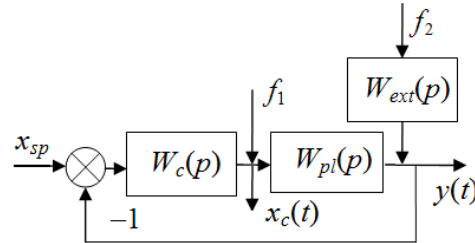


Fig. 1. Block diagram of transient simulation: x_{sp} – set point of controlled variable; $W_c(p)$ – controller's transfer function; $W_{pl}(p)$ – plant's transfer function; $W_{ext}(p)$ – transfer function of external disturbance; f_1 – internal disturbance; f_2 – external disturbance; $x_c(t)$ – control action; $y(t)$ – controlled variable

Plant's transfer function is a second-order relaxation circuit with delay time. Parameters of this transfer function are specified with the help of plant's transfer function experiment diagram for controlling action channel [9]

$$W_{pl}(p) = \frac{k e^{-\tau_c p}}{(Tp+1)(\sigma p+1)} = \frac{1,6 e^{-11,2p}}{(101p+1)(19p+1)}, \quad (1)$$

where k – plant's transfer function coefficient; T , σ – larger and lesser transfer function time constants, s; τ_c – delay time for controlling action channel, s.

Plant's transfer function for external disturbance channel

$$W_{ext}(p) = \frac{k_{ext}}{T_{ext}p+1} = \frac{10}{10p+1}, \quad (2)$$

where k_{ext} – transfer function coefficient for external disturbance channel; T_{ext} – transfer function time constant for external disturbance channel, s.

Widely used transfer function of classic PID controller is written as

$$W_c(p) = \frac{k_c (T_i p + 1)(T_d p + 1)}{T_i p (T_b p + 1)}, \quad (3)$$

where k_c – transfer function coefficient of controller; T_i , T_d , T_b – integration, derivative and ballast time constants, s.

There are a lot of different adjustment methods for PID controllers at this moment [2]. Automatized controller adjustment with the help of Simulink MatLab API is one of the most simplest methods. Process of adjustment and optimization is written [7]. Settings of optimal dynamic adjustment for PID controller after automatized controller adjustment are: $k_c = 2,789$, $T_i = 0,0246$ s, $T_d = 38,67$ s and $T_b = 0,4$ s (first variant). These settings are chosen of minimum integral of the squared error (ISE). Automatic control system has minimum overshoot and minimum time, when controlled variable get to the controller's dead band (± 2 %), under the given settings. This method can't help to calculate controller settings, which let controlled variable be changed without overshoot to the controlled variable step input.

Full compensation method in general terms will be the second variant of PID controller dynamic adjustment settings [9]. Derivative time is equal to delay time for controlling action channel under this method. Ballast time constant is calculated as mean value $T_b = T_d/N$, where $N = 10$ [2]. Time constants are equal for the second variant of PID controller dynamic adjustment settings:

$$T_i = T + \sigma = 101 + 19 = 120 \text{ s}; \quad (4)$$

$$T_d = \tau_c = 11,2 \text{ s}; \quad (5)$$

$$T_b = T_d/N = 11,2/10 = 1,12 \text{ s}. \quad (6)$$

Transfer function coefficient is calculated as

$$k_c = \frac{T + \sigma}{4\xi^2 k \tau_c} = \frac{101 + 19}{4 \cdot 1^2 \cdot 1,6 \cdot 11,2} = 1,674, \quad (7)$$

where ξ – damping coefficient (equal 1), that help to rectify overshoot to the controlled variable step input.

PID controller structure can be made with the help of optimal regulator transfer function to the controlled variable step input [10]. Optimal regulator let to operate input step without overshoot (fig. 2).

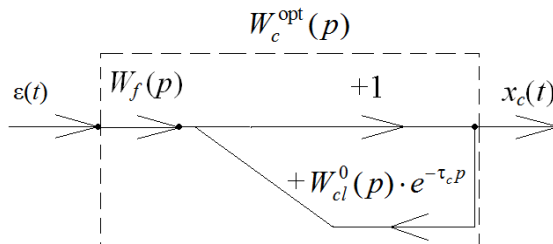


Fig. 2. Optimal regulator signal graph: $W_c^{\text{opt}}(p)$ – optimal regulator transfer function;
 $W_f(p)$ – filter transfer function; $W_{cl}^0(p)$ – part of closed-loop automatic control system's
specified transfer function without delay time; $\varepsilon(t)$ – control error;
 τ_c – delay time for controlling action channel

Transfer function of closed-loop automatic control system (criterion of optimality)

$$W_{y, x_{sp}}(p) = W_{cl}(p) = W_{cl}^0(p)e^{-\tau_c p} = \frac{W_c(p)W_{pl}(p)}{1 + W_c(p)W_{pl}(p)}. \quad (8)$$

Optimal regulator transfer function under input step can be found with the help of equations (8) and (1)

$$\begin{aligned} W_c^{\text{opt}}(p) &= \frac{W_{cl}(p)}{W_{pl}(p) \cdot [1 - W_{cl}(p)]} = \frac{W_{cl}^0(p)}{W_{pl}^0(p) \cdot [1 - W_{cl}(p)]} = \\ &= W_f(p) \cdot \frac{1}{1 - W_{cl}^0(p) \cdot e^{-\tau_c p}}, \end{aligned} \quad (9)$$

where $W_f(p) = \frac{W_{cl}^0(p)}{W_{pl}^0(p)}$ – filter transfer function; $W_{pl}^0(p)$ – part of plant's transfer function without delay time.

Specified transfer function of closed-loop automatic control system, which is based on structure of plant's transfer function (1) (optimal input step criterion)

$$W_{cl}(p) = W_{cl}^0(p)e^{-\tau_c p} = \frac{e^{-\tau_c p}}{(T_{cl}p + 1)^2}, \quad (10)$$

where T_{cl} – one and only one calculated dynamic adjustment setting of optimal regulator, which help to calculate regulation costs of automatic control system to the controlled variable step input.

Filter transfer function with the help of equations (1) and (10) is equal

$$W_f(p) = \frac{W_{cl}^0(p)}{W_{pl}^0(p)} = \frac{(Tp + 1)(\sigma p + 1)}{k(T_{cl}p + 1)^2} = \frac{(101p + 1)(19p + 1)}{1,6(T_{cl}p + 1)^2}. \quad (11)$$

The numerical value of T_{cl} is calculated with the help of golden ratio number sequence (third variant) [10]

$$T_{cl1} = 0.618\tau_c = 0.618 \cdot 11.2 = 6.92 \text{ s}. \quad (12)$$

The numerical value of T_{cl} must be increased to make maximum control action equals to automatized controller adjustment method with the help of Simulink MatLab API (fourth variant)

$$T_{cl2} = 0.725\tau_c = 0.725 \cdot 11.2 = 8.12 \text{ s}. \quad (13)$$

The tab. 1 gives dynamic adjustment settings for all four methods.

Table 1

Dynamic adjustment settings of four compared controllers

Number of variant	Name of method	Dynamic adjustment settings				
		k_c	T_i, s	T_d, s	T_b, s	T_{cl}, s
1	Automatized controller adjustment (Simulink MatLab API)	2.789	0.0246	38.67	0.40	—
2	Full compensation method in general terms	1.674	120.0000	11.20	1.12	—
3	Optimal regulator ($T_{cl1} = 6.92 s$)	—	—	—	—	6.92
4	Optimal regulator ($T_{cl2} = 8.12 s$)	—	—	—	—	8.12

Results of transient simulation

Fig. 3 shows control action variation in open-loop automatic control system for classic PID controller and optimal regulator (first and fourth adjustment variants).

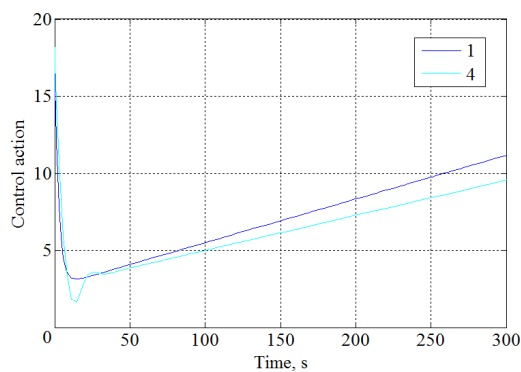


Fig. 3. Control action variation in open-loop automatic control system

Curves of control action variation in open-loop automatic control system are in close agreement for optimal and PID controllers as we can see on fig. 3.

Fig. 4 and 5 show controlled variable variation ($y(t)$) and control action variation ($x_c(t)$) to the controlled variable step input (x_{sp}).

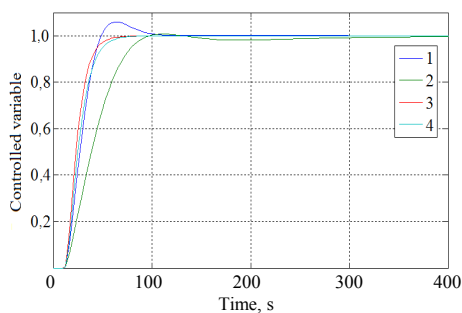


Fig. 4. Controlled variable variation to the controlled variable step input

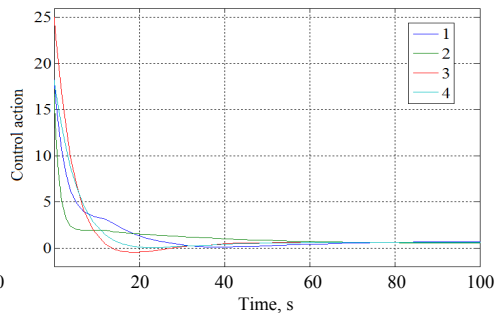


Fig. 5. Control action variation to the controlled variable step input

Fig. 6 and 7 show controlled variable variation ($y(t)$) to the internal disturbance (f_1) and external disturbance (f_2).

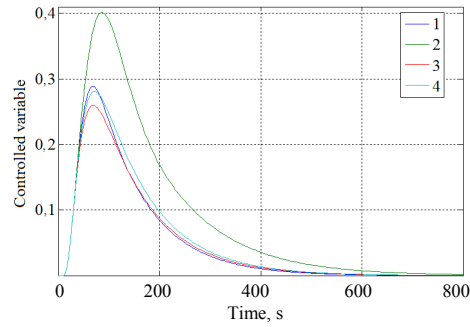


Fig. 6. Controlled variable variation to the internal disturbance

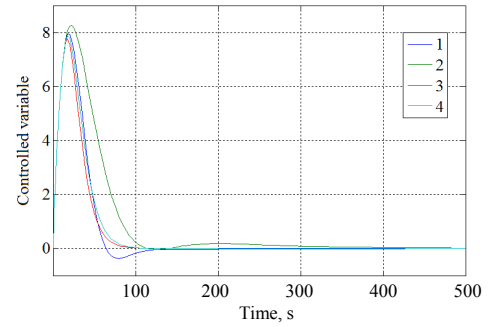


Fig. 7. Controlled variable variation to the external disturbance

The tab. 2 gives regulation costs of the automatic control systems to the controlled variable step input (x_{sp}), internal disturbance (f_1) and external disturbance (f_2).

Table 2

Transient regulation costs of four compared controllers

Variant	Kind of disturbance	t_c , s	$\sigma_{\max}$, %	$x_y^{\max}$	$\Delta y^{\max}$
1	x_{sp}	89	5.93	18.26	—
	f_1	340	—	—	+0.289
	f_2	98	—	—	+7.950
2	x_{sp}	88	0	16.74	—
	f_1	470	—	—	+0.401
	f_2	102	—	—	+8.260
3	x_{sp}	53	0	25.05	—
	f_1	350	—	—	+0.260
	f_2	73	—	—	+7.770
4	x_{sp}	60	0	18.19	—
	f_1	360	—	—	+0.281
	f_2	78	—	—	+7.890
Keys used: t_c – time, when controlled variable get to the controller's dead band ($\pm 2\%$); $\sigma_{\max}$ – maximum overshoot; $x_y^{\max}$ – maximum control action variation; $\Delta y^{\max}$ – maximum dynamic controlled variable variation to the internal and external disturbances.					

When regulation costs of four compared controllers (PID controllers and optimal regulators) were analyzed, it was found that fourth variant has the best regulation costs to the controlled variable step input, but third variant marginally better than fourth variant to the internal and external disturbances.

CONCLUSIONS

1. It has been suggested three variants of PID and optimal controller adjustment (number 2–4), which were compared with automatized adjusted controller (Simulink MatLab API) to the input step in automatic control system.

2. ACS automatized adjustment with the help of Simulink MatLab API didn't let to adjust controller in such a way that controlled variable varies monotonically without overshoot to input step.

3. If PID controller has non-free behavior (only controller coefficient and time constants are adjusted), then controller adjustment with the help of full compensation method in general terms (second variant) has some advantages compared to automatized adjustment (first variant). There are: no overshoot; time, when controlled variable get to the controller's dead band, is by a 1.1 % less and maximum control action variation is by a 8.3 % less to input step. But maximum dynamic controlled variable variation is by a 38.7 % larger and stabilization time is by a 38.2 % larger than first variant to the internal disturbance (f_1). And maximum dynamic controlled variable variation is by a 3.9 % larger and stabilization time is by a 4.1 % larger than first variant to the external disturbance (f_2).

4. If PID controller has free behavior (controller structure can be changed), then it is appropriate to use optimal controller transfer function for controller adjustment. Simulation results of transients show significant improvement of control quality to the controlled variable step input. Stabilization time is by a 40.4 % less (third variant) and by a 32.6 % less (fourth variant) than automatized controller adjustment (first variant). But maximum control action variation is by a 37.2 % larger for third variant and by a 1.0 % less for fourth variant. As well these variants have no overshoot.

5. First, third and fourth variants have virtually the same regulation costs to the internal disturbance f_1 . Stabilization time is by a 2.9 % larger (third variant) and by a 5.9 % larger (fourth variant) than first variant. But maximum control action variation is by a 10.0 % less for third variant and by a 2.8 % less for fourth variant.

6. Use of optimal regulator let to improve regulation costs to the external disturbance f_2 . Stabilization time is by a 25.5 % less (third variant) and by a 20.4 % less (fourth variant) than first variant. But maximum control action variation is by a 2.3 % less for third variant and by a 0.8 % less for fourth variant.

7. Controller design with the help of optimal regulator transfer function let to improve greatly transient regulation costs to the input step and disturbances and let to simplify adjustment process too, because of optimal regulator has one and only one dynamic adjustment setting. Curves of control action variation in open-loop automatic control system are in close agreement for optimal and PID controllers.

REFERENCES

1. Panferov S. V., Panferov V. I. (2012) About one Automatic Controller Synthesis Problem Solution in Automatic Adaptive Control Heating Systems. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya "Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika" = Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer Technologies, Control, Radio Electronics"*, (23), 142–149 (in Russian).
2. Aidan O'Dwyer (2009) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed. Dublin, Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 529. <https://doi.org/10.1142/9781848162433>.
3. Gorecki H. (1974) *Analysis and Synthesis of Control Systems with Time Delays*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 328 (in Russian).
4. Stefani E. P. (1972) *Calculation Basis of Thermal Power Process Control Setting*. Moscow, Energiya Publ. 372 (in Russian).
5. Rotach V. Ya. (2008) *Automatic Control Theory of Thermal Power Process*. Moscow, MEI Publ. 396 (in Russian).
6. Bertocco M., Cappellazzo S., Flammini A., Parvis M. (2002) A Multi-Layer Architecture for Distributed Data Acquisition. *IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No 00CH37276)*, 1261–1264. <https://doi.org/10.1109/imtc.2002.1007138>.
7. *PID Controller*. Mathworks Inc. (2018) Available at: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>. (Accessed: 22.10.2018).
8. Kulakov G. T. (1984) *Engineering Proximate Methods of Design Calculation for Industrial Regulating Systems*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 192 (in Russian).
9. Kulakov G. T. (2003) *Analysis and Synthesis of Automatic Regulation System*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 134 (in Russian).
10. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kravchenko V. V., Kuchorenko A. N., Artsiomenka K. I., Kovrigo Yu. M., Golinko I. M., Bagan T. G., Bunke A. S. (2017) *Automatic Control Theory for Thermal Power Activities*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 238 (in Russian).

Received: 20 November 2018

Accepted: 29 January 2019

Published online: 29 March 2019