

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 67, № 3
2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Редько С. В., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П., Никифоров И. В., Краков М. С.** Математическое и натурное моделирование режимов работы капиллярного эмиттера электростатического коллоидного микродвигателя 193
- Доброго К. В., Козначеев И. А., Червинский В. Л.** Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии 209
- Емельянчиков В. И., Лойкуц Е. Э., Опейко О. Ф.** Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы 228

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Игнатович Р. С., Седнин В. А., Зуева Е. С.** Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 1 241
- Струцкий Н. В., Романюк В. Н.** Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь 257

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

- Веременик В. В., Ивашечкин В. В., Крицкая В. И.** Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами 268

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

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),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
П. В. ЖУКОВСКИИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
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),
Ф. А. РОМАНИЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 марта 2024 г.
Регистрационный номер 1257

Подписано к печати 31.05.2024. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 7,53. Тираж экз.
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2024

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 67, No 3
2024

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Belarusian National Technical University

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

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Redko S. V., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Nikiforov I. V., Krakov M. S. Mathematical and Experimental Simulation of Operating Modes of Capillary Emitter of Electrostatic Colloidal Microthruster	193
Dobrego K. V., Koznacheev I. A., Charvinski V. L. Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System	209
Emeliantchikov V. I., Loikuts E. E., Opeiko O. F. Electric Drive and Automation of Sampling System for Chimney Gas Analyzer	228

HEAT POWER ENGINEERING

Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 1.	241
Strutsky N. V., Romaniuk V. N. Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus	257

POWER ENGINEERING ECONOMICS

Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines . . .	268
--	-----

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

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),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
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),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. Yu. RUMLIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
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),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
G. N. UZAKOV (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (RUE “Belinvestenergosberezhenie”, Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2024, March, 19th
Reg. No 1257**

Passed for printing 31.05.2024. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of copies. Date of publishing 2024. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-193-208>

УДК 621.3.032.269.1:621.455.4:532.54

Математическое и натурное моделирование режимов работы капиллярного эмиттера электростатического коллоидного микродвигателя

С. В. Редько¹⁾, Е. Б. Чубенко¹⁾, В. П. Бондаренко¹⁾, И. В. Никифоров²⁾,
М. С. Краков³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В работе экспериментально и теоретически анализируется динамика процесса эмиссии ионов из капиллярного эмиттера, заполненного ионной жидкостью в качестве рабочего тела. Такие эмиттеры могут использоваться в энергетической системе спутников малой массы в качестве источника реактивной тяги. Экспериментально исследована зависимость тяги микродвигателя от подаваемой на него электрической мощности, что позволило определить наиболее эффективные режимы работы микродвигателя. Это представляет интерес с точки зрения повышения энергоэффективности последнего в условиях ограниченной энерговооруженности спутников малой массы. Обнаружено, что характеристика «напряжение электрического поля – тяга эмиттера» является немонотонной с ярко выраженным максимумом, что накладывает ограничения на величину электрического поля в эмиттере. Для объяснения предела интенсивности эмиссии построена диффузионно-конвективная модель движения ионов внутри капилляра. Основной идеей предложенной модели является предположение о том, что интенсивность эмиссии ионов определяется их концентрацией в устье капилляра, а скорость эмитируемых ионов выше скорости движения ионной жидкости в капилляре как сплошной среды. Причем ускорение ионов в устье эмиттера нелинейно возрастает с повышением внешних сил. Снижение концентрации ионов по мере их эмиссии должно компенсироваться за счет их диффузии внутри капилляра и конвективных потоков, скорость которых ограничена. Построенная модель анализируется численно. Для системы уравнений Навье – Стокса применена схема расщепления, предложенная Чориным. На каждом временном шаге на основе известного поля скорости, плотности и распределения концентрации делается шаг по времени для уравнений движения. Затем с учетом найденной скорости делается шаг по времени для уравнений конвективной диффузии и производится пересчет поля плотности. Созданный код позволил подтвердить возможность существования максимума массового расхода ионов, то есть тяги микродвигателя, что качественно соответствует экспериментальным данным. Определяющим фактором, от которого зависит величина максимума и его положение, является степень нелинейности коэффициента, ответственного за ускорение ионов на выходе из капилляра.

Ключевые слова: ионная жидкость, микродвигатель, диффузия ионов

Для цитирования: Математическое и натурное моделирование режимов работы капиллярного эмиттера электростатического коллоидного микродвигателя / С. В. Редько [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 193–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-193-208>

Адрес для переписки

Краков Михаил Самуилович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-10-11
krakov@bntu.by

Address for correspondence

Krakov Mikhail S.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-10-11
krakov@bntu.by

Mathematical and Experimental Simulation of Operating Modes of Capillary Emitter of Electrostatic Colloidal Microthruster

S. V. Redko¹⁾, E. B. Chubenko¹⁾, V. P. Bondarenko¹⁾, I. V. Nikiforov²⁾,
M. S. Krakov³⁾

¹⁾Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. This work experimentally and theoretically analyzes the dynamics of the process of ion emission from a capillary emitter filled with an ionic liquid as a working fluid. Such emitters can be used in the energy system of low-mass satellites as a source of jet propulsion. The dependence of the thrust of a micromotor on the electrical power supplied to it was experimentally studied, which made it possible to determine the most efficient operating modes of the microthruster. This is of interest from the point of view of increasing the energy efficiency of the latter in conditions of limited power availability of low-mass satellites. It was found that the characteristic “electric field voltage – emitter thrust” is non-monotonic with a pronounced maximum, which imposes restrictions on the magnitude of the electric field in the emitter. To explain the limit of emission intensity, a diffusion-convective model of ion movement inside the capillary was constructed. The main idea of the proposed model is the assumption that the intensity of ion emission is determined by their concentration at the outlet of the capillary, and the velocity of the emitted ions is higher than the velocity of flow of the ionic liquid in the capillary as a continuous medium. Moreover, the acceleration of ions at the outlet of the emitter increases nonlinearly with increasing external forces. The decrease in the concentration of ions as they are emitted must be compensated by their diffusion inside the capillary and convective flows, the velocity of which is limited. The constructed system of equations is analyzed numerically. For the system of Navier – Stokes equations, the projection method proposed by Chorin is applied. Based on the known velocity field, density, and concentration distribution, a time step is taken for the equations of motion. Then, taking into account the found velocity, a time step is taken for the convective diffusion equations and the density field is recalculated. The created code made it possible to confirm the possibility of the existence of a maximum mass flow rate of ions, i.e., micromotor thrust, which is in qualitative agreement with the experimental data. The main factor on which the magnitude of the maximum and its position depend is the degree of nonlinearity of the coefficient responsible for the acceleration of ions at the outlet of the capillary.

Keywords: ionic fluid, microthruster, ion diffusion

For citation: Redko S. V., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Nikiforov I. V., Krakov M. S. (2024) Mathematical and Experimental Simulation of Operating Modes of Capillary Emitter of Electrostatic Colloidal Microthruster. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 193–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-193-208> (in Russian)

Введение

В последнее десятилетие на околоземные орбиты выводится большое количество спутников малой массы. По общепринятой классификации [1] такие аппараты классифицируют как микроспутники (масса от 10 до 100 кг), наноспутники (масса от 1 до 10 кг), пикоспутники (масса от 0,1 до 1 кг) и фемтоспутники (масса до 0,1 кг). Находясь на низких орбитах, эти спутники из-за трения в верхних слоях атмосферы требуют периодической коррекции орбиты, которая позволяет значительно продлить срок существования

спутников. Возможность коррекции орбиты зависит от энерговооруженности космического аппарата и энергоэффективности работы корректирующих орбиту двигателей. Последняя определяется [2] удельным импульсом I_{sp} , который равен отношению средней скорости истечения газов из двигателя V_{ef} к ускорению свободного падения:

$$I_{sp} = \frac{V_{ef}}{g_0}. \quad (1)$$

Расход рабочего тела двигателя (пропеллента) связан с удельным импульсом следующим соотношением [2]:

$$\Delta m = m_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{\Delta V}{g_0 I_{sp}} \right) \right]. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует, что чем выше удельный импульс, тем меньше расход пропеллента, что решающим образом влияет на энергоэффективность корректирующего орбиту двигателя.

Для коррекции орбиты могут быть использованы двигатели различного принципа действия: разгон реактивной струи за счет сжигания топлива, высвобождение энергии сжатого газа, передача энергии электрического поля заряженным частицам, в том числе за счет эффекта Холла. Каждый из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Химические двигатели обладают большой тягой, но малым удельным импульсом (до 400 с^{-1}), что ведет к повышенному расходу пропеллента и, следовательно, низкой энергоэффективности. Хранение практически значимой массы сжатого газа требует крупных прочных сосудов, способных выдерживать высокие давления, что увеличивает бесполезную инертную массу спутника. Двигатели, использующие эффект Холла, плохо масштабируются с уменьшением размеров спутников.

В последнее время для малых космических аппаратов все большее распространение получают двигатели, использующие электростатическое поле для ускорения пропеллента [4]. Электростатический коллоидный (или электрораспылительный) двигатель малой тяги можно легко масштабировать за счет агрегации группы эмиттеров и изменения их геометрии для достижения желаемых характеристик тяги. Кроме того, у электрораспыления есть потенциал для дуального применения, когда одно и то же топливо может использоваться в нескольких бортовых системах. Обычное топливо, которое может быть выброшено за счет электростатического поля, можно также сжигать в химическом двигателе, то есть с одним видом топлива можно работать в разных режимах тяги: малая тяга с высокой эффективностью или большая тяга с малой эффективностью.

Первый вариант двигательной системы с электрораспылением и ионной жидкостью в качестве рабочего тела был относительно успешно использован в миссии ST-7/LISA Pathfinder [5]. Необходимость продолжения развития этой технологии стала очевидной из-за некоторых аномалий, которые

возникли во время миссии: один двигатель малой тяги имел медленное время отклика и скачки тока, а другой двигатель малой тяги вышел из строя после 1670 ч работы.

Основные преимущества двигателей на ионных жидкостях по сравнению с двигателями на жидких металлах состоят в том, что такие источники способны генерировать пучки как положительно, так и отрицательно заряженных ионов с различной массой, в том числе в диапазоне выше 5000 атомных единиц массы (а. е. м.). Жидкометаллические источники принципиально не могут эмитировать отрицательные ионы, а масса даже очень тяжелых металлических кластерных ионов не превышает 1500 а. е. м. Рабочее напряжение при использовании ионных жидкостей будет ниже, чем при использовании жидких металлов из-за более низкого поверхностного натяжения ионных жидкостей; также отпадает необходимость даже в минимальном нагреве ионных жидкостей, без которого нельзя обойтись в случае жидких металлов и сплавов [6]. Эти преимущества особенно важны для нано-, пико- и фемтоспутников с ограниченными ресурсами бортовой энергосети.

В двигателях на ионных жидкостях эмиссия ионов происходит с вершины конуса Тейлора, образовавшегося в результате развития неустойчивости под действием электрического поля. Подача жидкости к поверхности эмиссии осуществляется с помощью системы капилляров или пористой среды. В ряде работ (например, [7]) было отмечено, что вольт-амперная характеристика двигателя может быть нестабильной. Оптическими методами в работе [7] зафиксировано, что при запуске двигателя малой тяги на поверхности эмиссии появлялись светящиеся точки. Количество точек увеличивалось с ростом тока. При некотором критическом значении наблюдались сильные колебания ионного тока. В зависимости от напряжения или уровня тока эмиссии флуктуации носили разный характер. Среди них наиболее выраженными были так называемые ступенчатые колебания с крутыми подъемами и спадами. Кроме того, были обнаружены и некоторые другие периодические колебания эмитируемого тока. Природа описанной нестабильности не до конца ясна.

Целью настоящей работы является установление экспериментальных закономерностей работы капиллярного микродвигателя и построение математической модели, которая способна объяснить как нелинейный характер вольт-амперной характеристики ионных двигателей, так и нестационарный режим их работы.

Экспериментальный анализ

Цель эксперимента – получение зависимости тяги микродвигателя от подаваемой на него электрической мощности. По данной зависимости можно определить наиболее эффективные режимы работы микродвигателя, что представляет определенный интерес с учетом ограниченной энергообеспеченности спутников малой массы.

Для проведения исследований изготовлен прототип электростатического коллоидного микродвигателя, который представлял собой ионный источник, состоящий из металлического тянущего электрода с круглым отверстием, выполняющим роль пролетной щели, фторопластового корпуса, заполненного пропеллентом – ионной жидкостью, и кварцевого цилиндрического капилляра внутренним диаметром 100 мкм, выполняющего функцию эмиттера, расположенного напротив центра пролетной щели тянущего электрода. Измерение зависимости тяги от электрической мощности проводилось в вакуумной камере с помощью лабораторных электронных весов Sartorius CP225D высокого класса точности, регулируемого высоковольтного источника питания Advanced Energy, электронной дистанционной системы управления и телеметрии. Фотография исследуемого прототипа микродвигателя на стенде в вакуумной камере приведена на рис. 1а. Для измерения тяги использовался прямой метод, при котором собранный прототип микродвигателя размещался на чаше весов, обеспечивающих точность измерений до единиц микроньютонов (рис. 1б).

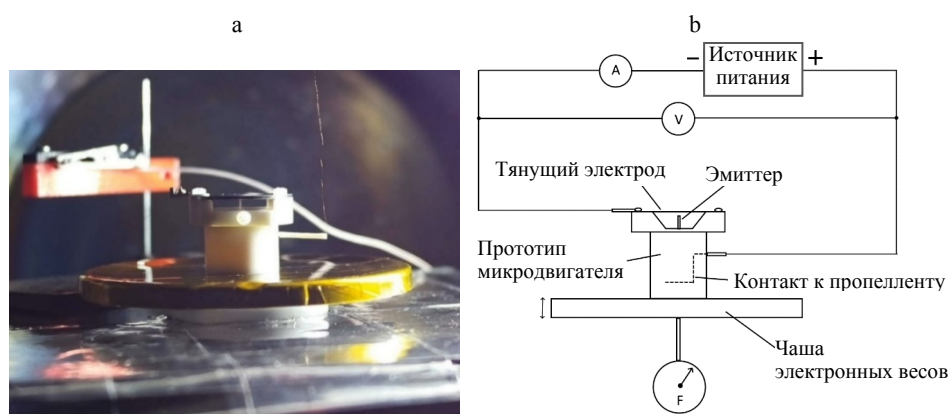


Рис. 1. Внешний вид прототипа электростатического коллоидного микродвигателя на чаше весов в вакуумной камере (а) и принципиальная схема экспериментальной установки для проведения измерений тяги (б)

Fig. 1. External view of the prototype of electrostatic colloidal microthruster on the scale in a vacuum chamber (a) and circuit diagram of experimental setup for performing thrust measurements (b)

Раз в секунду весы передавали информацию о результатах измерений в систему сбора данных на базе компьютера. Одновременно с этим системой сбора данных регистрировались значения тока и напряжения на выводах высоковольтного источника питания. Положительное смещение от источника питания было приложено к ионной жидкости, а отрицательное – к тянущему электроду. Используемый высоковольтный источник питания позволял отдельно установить ограничения по выходному току и напряжению. В установившемся режиме работы блок питания ограничивал ток, при этом напряжение на экспериментальном образце микродвигателя находилось в пределах от 2300 до 2400 В. Запуск прототипа микро-

двигателя происходил при большем напряжении, поэтому ограничение по напряжению на блоке питания было установлено 3600 В.

Зависимость тяги от подаваемой мощности (рис. 2) определялась в соответствии со следующим алгоритмом, который повторялся для каждой экспериментальной точки:

1. Установка ограничения по напряжению на блоке питания.
2. Установка ограничения по току на блоке питания.
3. Включение блока питания.
4. Ожидание около 600 с.
5. Отключение блока питания.
6. Ожидание стабилизации показаний весов (от 30 до 300 с).

Величину тяги определяли по двум показаниям весов – при включении и при выключении микродвигателя (рис. 3)

$$F = \frac{\Delta F_1 + \Delta F_2}{2}, \quad (3)$$

где $\Delta F_1 = F_{\text{откл}} - F_{\text{вкл}}$; $\Delta F_2 = F_{\text{вкл}} - F_{\text{откл}}$.

Мощность вычисляли как произведение измеренных значений тока и напряжения, подаваемых источником питания, усредненных за время включения:

$$P = IU, \quad (4)$$

где $I = \frac{\sum_{i=1}^T I_i}{T}$; $U = \frac{\sum_{i=1}^T U_i}{T}$; T – общее время работы (в секундах) прототипа микродвигателя в конкретном режиме.

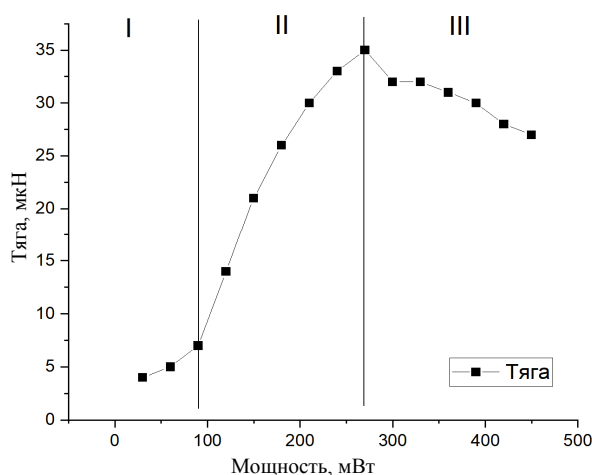


Рис. 2. Зависимость тяги прототипа микродвигателя от подаваемой источником питания мощности

Fig. 2. Thrust dependence of a microthruster prototype on the power supplied by the power supply

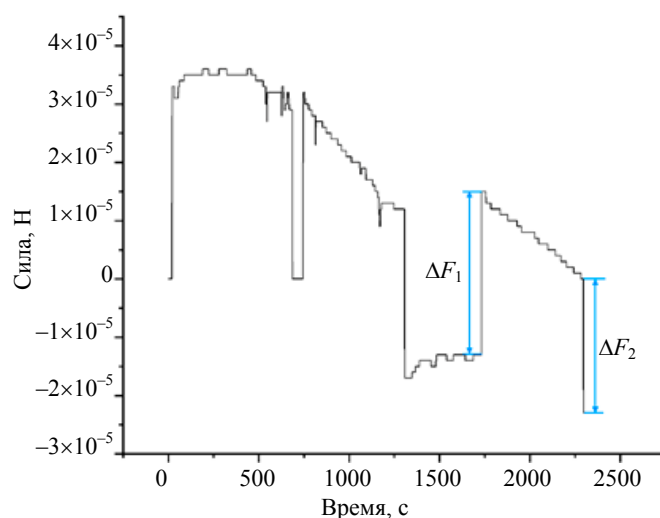


Рис. 3. Изменение показаний весов во времени в процессе работы прототипа микродвигателя с указанием метода определения тяги для одного рабочего режима, соответствующего одной точке на графике, представленном на рис. 2

Fig. 3. Changes in scale readings over time during operation of the microthruster prototype, indicating the method for determining thrust for one operating mode, corresponding to one point on the graph shown in Fig.2

Из полученной зависимости следует, что у прототипа микродвигателя с полым капилляром есть узкий диапазон, в котором развиваемая тяга пропорциональна подаваемой мощности (область II на рис. 2). За его пределами эффективность работы эмиттера с полым капилляром существенно ниже. Предположительно, в области I происходят лишь перемещение заряженных компонентов жидкости и соответствующее перераспределение заряда без какой-либо заметной ионизации. Так как в составе стенда отсутствует компенсатор заряда, можно наблюдать некое отличное от нуля значение тяги на грани погрешности измерений. В области III наступает ограничение по току и снижение тяги. При работе в этом режиме отмечалось яркое свечение в области между эмиттером и тянущим электродом, что могло быть обусловлено бомбардировкой тянущего электрода ионами пропеллента за счет настолько сильного искривления их траекторий движения, что они переставали в полном объеме покидать микродвигатель через пролетную щель тянущего электрода. Для более детального объяснения наблюдаемых феноменов разработана математическая модель работы коллоидного микродвигателя с цилиндрическим полым капилляром, выполняющим роль эмиттера, в котором роль пропеллента выполняет ионная жидкость.

Система определяющих уравнений

Ионная жидкость представляет собой совокупность ионов двух сортов с разной массой m^+ и m^- , имеющих равные заряды q^+ и q^- и образовавшихся-

ся в результате диссоциации сложных органических молекул. Ионные жидкости принципиально отличаются от жидких металлов массой ионов и соответственно величиной коэффициента диффузии. Если в металлах коэффициент диффузии имеет порядок $D \sim 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ [8], то в ионных жидкостях эта величина на три порядка меньше: $D \sim 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ [9]. Это означает, что и подвижность ионов в ионных жидкостях также на три порядка меньше. Поэтому можно предположить, что в процессе движения ионов к выходу из эмиттера (то есть к плоскости эмиссии) диффузионные процессы могут играть определяющую роль, так как из-за низкой подвижности ионов их концентрация на выходе из капилляра поддерживается именно за счет диффузии из внутреннего объема капилляра.

Подвижность ионов $b = u/F$, определяемая как отношение скорости иона к силе, действующей на него, связана с коэффициентом диффузии соотношением Эйнштейна $b = D/kT$. По аналогии с газами, для которых коэффициент диффузии практически обратно пропорционален молекулярной массе, предположим, что и для этих двух сортов ионов коэффициент диффузии также обратно пропорционален массе ионов. Тогда для коэффициентов диффузии положительных ионов D^+ и отрицательных ионов D^- должно выполняться соотношение:

$$D^+ m^+ = D^- m^- . \quad (5)$$

Пусть n^+ и n^- – количество положительных и отрицательных ионов в жидкости. С учетом соотношения (1) и конвективного переноса уравнения диффузии принимают вид:

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) n^+ = D^+ \Delta n^+ ; \quad (6)$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) n^- = D^- \Delta n^- . \quad (7)$$

При этом должно выполняться уравнение неразрывности, которое с учетом выражения для плотности $\rho = m^+ n^+ + m^- n^-$ принимает вид

$$\nabla \cdot \left[(m^+ n^+ + m^- n^-) \vec{u} \right] = 0. \quad (8)$$

Мы рассматриваем ионную жидкость как сплошную среду, движение которой описывается уравнением Навье – Стокса

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \eta \Delta \vec{u}. \quad (9)$$

В качестве модели капилляра, использованного в эксперименте, рассмотрим двумерную прямоугольную полость, заполненную ионной жидкостью и находящуюся в электрическом поле, имеющем только компоненту $E = E_x$ (рис. 4). Границы полости $y = 0$ и $y = H$ твердые, и на них выполня-

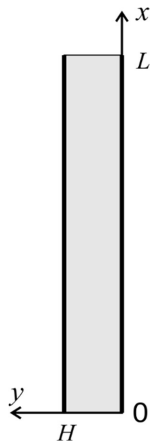


Рис. 4. Двумерная модель капиллярного эмиттера

Fig. 4. Two-dimensional model of a capillary emitter

ются условия прилипания для скорости и непроницаемости для обоих типов ионов. Количество ионов в единице объема на входе в капилляр $x = 0$ считаем равным и постоянным. На границе $x = L$ ионы одного типа эмитируются во внешнюю среду. Для определенности считаем, что эмитируются положительные ионы. Не вдаваясь в детали причин эмиссии ионов, структуру и размеры конуса Тейлора, предполагаем, что плотность потока эмитируемых ионов есть величина, пропорциональная концентрации ионов на выходе из канала.

Жидкость движется в канале под действием внешнего электрического поля. Можно предположить, что скорость жидкости на выходе из канала пропорциональна этому действию. Тогда граничное условие для скорости зададим в виде:

$$u_x = A; \quad x = L, \quad (10)$$

где параметр A отражает влияние внешнего электрического поля.

Более сложным является определение граничного условия для концентрации на выходе из канала. Плотность потока положительных ионов, движущихся вместе с потоком вдоль канала, определяется соотношением

$$-D^+ \frac{\partial n^+}{\partial x} + u_x n^+.$$

Поток эмитируемых ионов определяется их концентрацией на выходе из канала и скоростью ионов на выходе u_x^i . Тогда плотность потока эмитируемых ионов равна

$$\vec{j}_x = u_x^i n^+. \quad (11)$$

Очевидно, что при приближении к устью канала под воздействием внешнего поля скорость ионов u_x^i возрастает и превышает скорость потока u_x . Так как величина u_x^i зависит от внешнего поля, то есть от коэффициента A , предположим, что эта зависимость носит нелинейный характер, и степень ускорения ионов возрастает с ростом коэффициента A . Этому предположению удовлетворяет, например, выбранная нами зависимость

$$u_x^i = k(A)A, \quad (12)$$

где коэффициент $k(A)$ отражает степень нелинейности. Исследованный вид зависимости $k(A)$ будет представлен ниже.

Исходя из сделанных предположений, граничные условия для концентрации ионов и скорости движения жидкости в капилляре можно сформулировать следующим образом:

1. В начальный момент времени $t = 0$ ионная жидкость является электрически нейтральной, то есть количество положительных и отрицательных ионов одинаково, жидкость неподвижна:

$$n^+(x, y, 0) = n^-(x, y, 0) = n_0; \quad \vec{u}(x, y, 0) = 0. \quad (13)$$

2. На входе в канал поддерживается начальная концентрация ионов, задано свободное граничное условие для скорости, скорость направлена вдоль плоскости капилляра:

$$n^+(0, y, t) = n^-(0, y, t) = n_0; \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad u_y(0, y, t) = 0. \quad (14)$$

3. Твердые стенки канала являются непроницаемыми, то есть поток массы сквозь них равен нулю, на них выполняется условие прилипания:

$$\left. \frac{\partial n^+}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial n^-}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial n^+}{\partial y} \right|_{y=H} = \left. \frac{\partial n^-}{\partial y} \right|_{y=H} = 0; \quad (15)$$

$$u_x(x, 0, t) = u_y(x, 0, t) = u_x(x, H, t) = u_y(x, H, t) = 0. \quad (16)$$

4. На выходе из канала конвективно-диффузионный поток массы положительных ионов равен эмитируемому потоку, описываемому выражением (11), поток отрицательных ионов отсутствует, а скорость описывается уравнением (10):

$$\left(-D^+ \frac{\partial n^+}{\partial x} + An^+ \right)_{x=L} = k(A)An^+; \quad \left. \frac{\partial n^-}{\partial x} \right|_{x=L} = 0,$$

или

$$-D^+ \frac{\partial n^+}{\partial x} = [k(A) - 1]An^+; \quad \frac{\partial n^-}{\partial x} = 0, \quad x = L. \quad (17)$$

Используя в качестве масштабов для координат ширину канала H , для времени H^2/D , для скорости D/H , для давления $\rho D^2/H^2$, можно записать полученную выше систему уравнений и граничных условий в безразмерном виде (все переменные в уравнениях, приведенных ниже, безразмерные):

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \text{Sc} \Delta \vec{u}; \quad (18)$$

$$\nabla(\rho\vec{u}) = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)n^+ = \Delta n^+; \quad (20)$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)n^- = \Delta n^-, \quad (21)$$

где безразмерная плотность $\rho = \frac{m^+n^+ + m^-n^-}{\rho_0}$, $\rho_0 = m^+n_0^+ + m^-n_0^-$, $Sc = \nu/D$ – число Шмидта. Начальное и граничные условия имеют вид:

$$t = 0: \quad n^+(x, y, 0) = n^-(x, y, 0) = n_0, \quad \vec{u}(x, y, 0) = 0; \quad (22)$$

$$x = 0: \quad n^+(0, y, t) = n^-(0, y, t) = n_0, \quad \left. \frac{\partial u_x}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad u_y(0, y, t) = 0; \quad (23)$$

$$y = 0, y = H: \quad \left. \frac{\partial n^+}{\partial x} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial n^-}{\partial x} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial n^+}{\partial x} \right|_{y=H} = \left. \frac{\partial n^-}{\partial x} \right|_{y=H} = 0; \quad (24)$$

$$u_x(x, 0, t) = u_y(x, 0, t) = u_x(x, H, t) = u_y(x, H, t) = 0; \quad (25)$$

$$x = L: \quad \frac{\partial n^+}{\partial x} + u_x n^+ = k(N_E)N_E n^+, \quad \frac{\partial n^-}{\partial x} = 0; \quad (26)$$

$$u_x|_{x=L} = N_E, \quad (27)$$

где $N_E = AH/D$ – безразмерный комплекс, характеризующий отношение потока ионов, вызванного внешними силами (электрическое поле) к диффузионному потоку ионов. Далее для коэффициента $k(N_E)$, отражающего степень ускорения ионов на выходе из канала под действием внешнего поля, нами используется зависимость $k(N_E) = 1,5(1 + N_E^2/a)$. Величина коэффициента a определяет степень нелинейности.

Таким образом, на тягу коллоидного микродвигателя одновременно влияют два фактора. С одной стороны, скорость жидкости в канале с ростом внешнего поля увеличивается, что должно привести к росту тяги. С другой стороны, из-за ускорения ионов в устье канала их концентрация на выходе уменьшается, что может замедлить рост тяги или даже уменьшить ее. Анализ сформулированной системы уравнений с точки зрения баланса этих факторов и их влияния на тягу коллоидного микродвигателя является предметом численного моделирования.

Численное моделирование

Разностная схема. Для приближенного решения многомерных нестационарных задач математической физики широко используются различные классы схем расщепления. Для системы уравнений Навье – Стокса применение схем расщепления (наиболее известной из которых является схема Чорина [10]) обосновано в [11, 12]. Алгоритм метода состоит из последовательного повторения следующих операций на каждом временном шаге:

- на основе известного поля скорости, плотности и распределения концентрации делается шаг по времени для уравнений движения;
- с учетом найденной скорости делается шаг по времени для уравнений конвективной диффузии;
- производится пересчет поля плотности.

Особенности авторского кода и его верификация. Код, реализующий разностную схему, написан на языке C++ и использовал разнесенные («шахматные») сетки узлов [13]. Для выбора шага сетки и шага по времени были проведены тестовые вычисления для следующих параметров задачи (все величины безразмерные): $H = L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$. На выходе из канала рассчитывался безразмерный массовый расход эмитируемых ионов

$$J = \frac{m^+}{m^+ + m^-} \int_0^1 u_x(L) n^+(y, L) dy. \quad (28)$$

Множитель $\frac{m^+}{m^+ + m^-}$ учитывает тот факт, что тяга двигателя определяется не только количеством эмитируемых ионов, но и их массой.

Так как параметр N_E определяет также и концентрацию ионов на выходе из канала n_L^+ , эти две величины использовались в качестве критерия оценки достоверности созданного кода и определения шага по времени и дробности сетки, обеспечивающих приемлемую точность.

Шаг по времени выбирался из требования обеспечения устойчивости численного счета и уменьшался до тех пор, пока величина J на данной сетке не переставала изменяться. В зависимости от сетки величина шага по времени лежала в диапазоне от $5 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-6}$.

В табл. 1 представлены значения массового расхода эмитируемых положительных ионов J и их концентрация n_L^+ на выходе из канала на центральной линии симметрии для различных сеток и величин параметра N_E для различного числа шагов N_x прямоугольной сетки вдоль оси x и N_y вдоль оси y . Все расчеты выполнены для канала длиной $L = 1$ и шириной $H = 1$ и жидкости с числом Шмидта $Sc = 10$.

Видно, что наибольшее влияние на точность полученных результатов имеет количество шагов сетки вдоль оси x .

Таблица 1

**Значения массового расхода эмитируемых положительных ионов
 и их концентрация при различных параметрах моделирования**

**Mass flow rates of emitted positive ions and their concentration
 at various simulation parameters**

	$N_x = 120; N_y = 40$		$N_x = 120; N_y = 60$		$N_x = 180; N_y = 40$		$N_x = 240; N_y = 40$		$N_x = 240; N_y = 60$	
N_E	J	n_L^+	J	n_L^+	J	n_L^+	J	n_L^+	J	n_L^+
2	1,096	0,6450	1,079	0,6437	1,083	0,6896	1,079	0,6874	1,0811	0,6880
4	1,998	0,6979	1,992	0,6884	1,994	0,6430	2,003	0,6447	1,996	0,6428
8	3,711	0,6140	3,715	0,6147	3,727	0,6128	3,736	0,6125	3,739	0,6130
12	5,149	0,5793	5,160	0,5797	5,184	0,5773	5,203	0,5764	5,205	0,5767
16	6,204	0,5349	6,807	0,5353	6,270	0,5319	6,301	0,5301	6,306	0,5307
20	6,861	0,4855	6,866	0,4858	6,956	0,4807	7,004	0,4783	7,008	0,4786
25	7,188	0,4237	7,192	0,424	7,321	0,4164	7,390	0,4126	7,398	0,4130
30	7,111	0,3677	7,113	0,3678	7,274	0,3573	7,359	0,3520	7,365	0,3523
35	6,788	0,3204	6,791	0,3206	6,972	0,3069	7,069	0,3000	7,074	0,3002
40	6,351	0,2827	6,353	0,2828	6,545	0,2661	6,649	0,2574	6,652	0,2576
45	5,882	0,2537	5,884	0,2538	6,078	0,2340	6,184	0,2337	6,206	0,2241

Все результаты, представленные ниже, получены на сетке $N_x \times N_y = 240 \times 60$, так как дальнейшее увеличение количества шагов приводит к изменению значения полученных величин в четвертой значащей цифре и не имеет дальнейшего смысла.

Результаты. На рис. 5 показано, как изменяется концентрация положительных ионов на выходе из канала. Как видно, при включении внешнего воздействия концентрация быстро снижается до некоего установившегося значения. Как скорость снижения концентрации ионов на выходе, так и величина установившейся концентрации зависят от критерия N_E . С ростом N_E время установления концентрации и ее установившаяся величина n_{\min}^+ снижаются. На рис. 6 показано изменение установившейся концентрации в зависимости от критерия N_E . Как видно, с ростом критерия N_E снижение концентрации ионов оказывается весьма значительным, что может привести к снижению потока эмитируемых ионов, то есть и тяги ионного микродвигателя.

Интересным является представленное на рис. 7 распределение концентрации ионов в плоскости симметрии вдоль оси канала в зависимости от параметра N_E . При малых значениях N_E ускорение ионов в устье капилляра невелико и профиль концентрации близок к линейному, а степень обеднения потока ионами также мала, то есть минимальная концентрация незначительно меньше единицы. Соответственно градиент концентрации также невелик и вклад диффузионной подпитки в эмиссию ионов невелик. С ростом N_E в силу нелинейного характера зависимости $k(N_E)$ дефицит ионов на выходе из капиллярного эмиттера из-за резкого увеличения скорости эмиссии должен восполняться за счет диффузионных процессов. Последнее приводит к образованию узкой зоны пониженной концентрации положи-

тельных ионов вблизи устья эмиттера и значительному градиенту концентрации в этой зоне (кривая 3 на рис. 7). Отметим, что последнее требует использовать достаточно мелкую сетку вдоль капилляра.

Особый интерес вызывает зависимость массового расхода эмитируемых ионов от параметра N_E , характер зависимости которой можно сравнить с экспериментальными данными по развиваемой тяге. Эта зависимость показана на рис. 8.

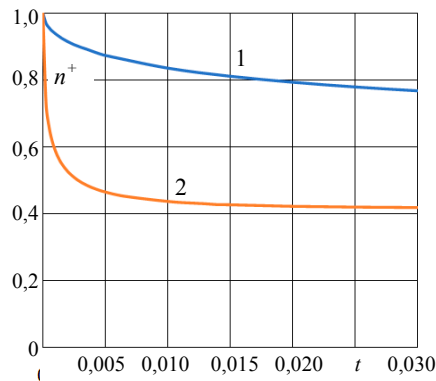


Рис. 5. Изменение концентрации положительных ионов на выходе из капилляра во времени:

1 – $N_E = 4$; 2 – 25; $L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

Fig. 5. Change in concentration of positive ions at the output from a capillary over time:

1 – $N_E = 4$; 2 – 25; $L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

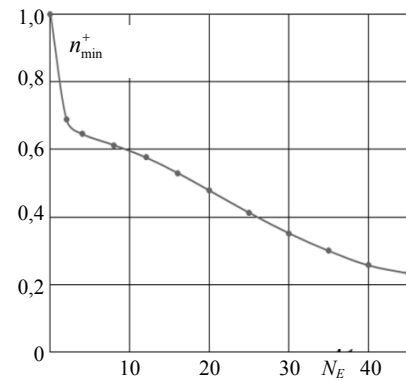


Рис. 6. Зависимость установившейся концентрации на выходе из капилляра от критерия N_E :

$L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

Fig. 6. Dependence of steady-state concentration at the outlet from a capillary on the criterion N_E :

$L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

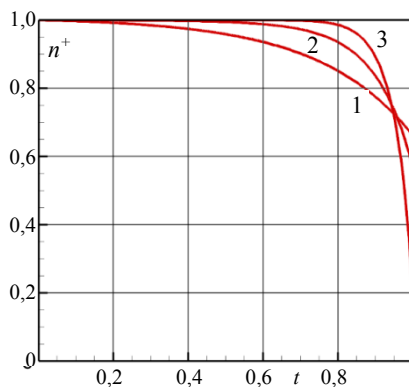


Рис. 7. Распределение концентрации положительных ионов вдоль оси капилляра:

1 – $N_E = 4$; 2 – 12; 3 – 45;
 $L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

Fig. 7. Distribution of the concentration of positive ions along the capillary axis:

1 – $N_E = 4$; 2 – 12; 3 – 45;
 $L = 1$; $Sc = 10$; $a = 1500$

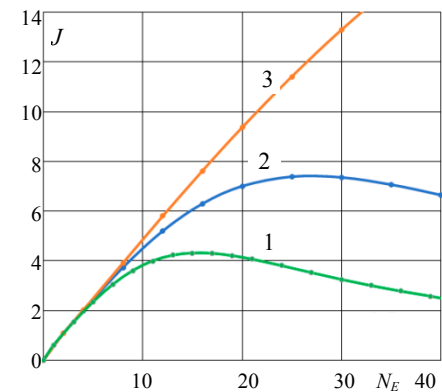


Рис. 8. Зависимость тяги капиллярного микродвигателя от параметра N_E (подаваемой электрической мощности):

1 – $a = 500$; 2 – 1500; 3 – 15000; $L = 1$; $Sc = 10$

Fig. 8. Dependence of capillary micromotor thrust on N_E parameter (supplied electrical power):

1 – $a = 500$; 2 – 1500; 3 – 15000;
 $L = 1$; $Sc = 10$

Видно, что при линейном характере зависимости $k(N_E)$ (кривая 3) тяга микродвигателя также почти линейно возрастает с увеличением подаваемой мощности. Повышение степени нелинейности приводит к повышенному ускорению ионов при приближении к устью капиллярного эмиттера и, как следствие, уменьшению их концентрации. В результате суммарный поток эмитируемых в единицу времени ионов также снижается. Кривая 2 на рис. 8 по характеру практически полностью соответствует экспериментальным данным, представленным на рис. 3. Увеличение степени нелинейности коэффициента $k(N_E)$ (кривая 1) приводит к уменьшению максимального значения тяги и сдвигает максимум влево.

Отметим, что также проводился анализ влияния на тягу свойств ионной жидкости, то есть числа Шмидта. Обнаружено, что при значениях числа Шмидта $Sc = 10, 100$ и 1000 величина J отличается в третьей значащей цифре, но время счета возрастает пропорционально величине Sc . Поэтому выше все данные представлены для значения числа Шмидта $Sc = 10$.

ВЫВОДЫ

1. Проведены эксперименты и построена математическая модель, описывающая работу капиллярного микродвигателя с ионной жидкостью в качестве рабочего тела.

2. Экспериментально обнаружено, что с ростом подаваемой на двигатель электрической мощности тяга микродвигателя возрастает только до определенной величины, а затем начинает снижаться.

3. В основе построенной математической модели лежит предположение, что поток эмитируемых ионов обеспечивается как течением ионной жидкости в капилляре, так и диффузионными процессами в нем. Приближаясь к выходу из эмиттера, ионы ускоряются под действием внешнего поля и быстро покидают капилляр, в результате их количество не успевает восполняться течением жидкости и концентрация на выходе снижается. Под действием возникшего градиента концентрации дефицит ионов восполняется за счет диффузионных процессов. Определяющим является нелинейный характер увеличения скорости ионов на выходе из эмиттера от внешних сил. Показано, что именно эта нелинейность может привести к немонотонному характеру зависимости тяги микродвигателя от подаваемой мощности.

Работа выполнена в рамках задания 4.1.2 ГПНИ Республики Беларусь «Многофункциональные и композиционные материалы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Konecny, G. Small Satellites-A Tool for Earth Observation [Electronic Resource] / G. Konecny // XXth ISPRS Congress Commission IV – Istanbul, Turkey-2004. Mode of access: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm4/papers/428.pdf>.
2. Гришин, С. Д. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов / С. Д. Гришин, Л. В. Лесков. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
3. Berg, S. Ignition Evaluation of Monopropellant Blends of HAN and Imidazole-Based Ionic Liquid fuels / S. Berg, J. Rovey // 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. AIAA, 2012. Art. No 974. <https://doi.org/10.2514/6.2012-974>.
4. Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques and Practice / eds. L. A. Giannuzzi, F. A. Stevie. NY: Springer, 2005. 358 p. <https://doi.org/10.1007/b101190>.

5. Experimental Results From the ST7 Mission on LISA Pathfinder / G. Anderson [et al.] // *Physical Review D*. 2018. Vol. 98, No 10. P. 102005. <https://doi.org/10.1103/physrevd.98.102005>.
6. Ionic Liquids. Physicochemical Properties / S. Zhang [et al.]. Amsterdam: Elsevier, 2009. 520 p.
7. Effects of Non-Uniform Operation of Emission Sites on Characteristics of a Porous Electropray Thruster / C. Chen [et al.] // *Acta Astronautica*. 2021. Vol. 178. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.09.002>.
8. Грабовский, Р. И. Курс физики / Р. И. Грабовский. 11-е изд., стер. СПб.: Лань, 2009. 608 с.
9. Диффузия в ионных жидкостях. Исследование методом классической молекулярной динамики [Электронный ресурс] / Г. Ивановскис [и др.] // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2013. Т. 14, вып. 2. С. 1–7. Режим доступа: www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-04-29-012.pdf.
10. Chorin, A. J. A numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems / A. J. Chorin // *Journal of Computational Physics*. 1967. Vol. 2, No 1. P. 12–26. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(67\)90037-x](https://doi.org/10.1016/0021-9991(67)90037-x).
11. Rannacher, R. On Chorin's Projection Method for the Incompressible Navier-Stokes Equations / R. Rannacher // *Navier-Stokes Equations II – Theory and Numerical Methods* / eds: J. G. Heywood [et al.]. Berlin: Springer, 1992. 1530. P. 167–183. (Lecture Notes in Mathematics, vol. 1530). <https://doi.org/10.1007/BFb0090341>.
12. Harlow, F. H. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with a Free Surface / F. H. Harlow, J. E. Welch // *Physics of Fluids*. 1965. Vol. 8. P. 2182–2189. <https://doi.org/10.1063/1.1761178>.

Поступила 09.01.2024 Подписана в печать 12.03.2024 Опубликовано онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Konecny G. (2004) Small Satellites-A Tool for Earth Observation. *XXth ISPRS Congress Commission IV – Istanbul, Turkey-2004*. Available at: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm4/papers/428.pdf>.
2. Grishin S. D., Leskov L. V. (1989) *Electric Rocket Engines for Spacecraft*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 216 (in Russian).
3. Berg S., Rovey J. (2012) Ignition evaluation of monopropellant blends of HAN and imidazole-based ionic liquid fuels. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. AIAA, 974. <https://doi.org/10.2514/6.2012-974>.
4. Giannuzzi L. A., Stevie F. A. (eds) *Introduction to Focused Ion Beams: Instrumentation, Theory, Techniques and Practice*. NY, Springer, 2005. 358. <https://doi.org/10.1007/b101190>.
5. Anderson G., Anderson J., Anderson M., Aveni G., Bame D., Barela P., Blackman K., Carmain A., Chen L., Cherng M., Clark S., Connally M., Connolly W., Conroy D., Cooper M., Cutler C., D'Agostino J., Demmons N., Dorantes E. (et al.) (2018) Experimental Results from the ST7 Mission on LISA Pathfinder. *Physical Review D*, 98 (10), 102005. <https://doi.org/10.1103/physrevd.98.102005>.
6. Lu X., Zhou Q., Li X., Zhang X., Liquids S. L. (2009) *Physicochemical Properties*. Amsterdam, Elsevier. 520.
7. Chen C., Chen M., Fan W., Zhou H. (2021) Effects of Non-Uniform Operation of Emission Sites on Characteristics of a Porous Electropray Thruster. *Acta Astronautica*, 178, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.09.002>.
8. Grabovsky R. I. (2009) *Physics course*. 11th ed. Saint Petersburg, Lan' Publ. 2009. 608 (in Russian).
9. Ivanovskis G., Norman G. E., Stegailov V. V., Usmanova D. R. (2013) Diffusion in Ionic Liquids. *Classical Molecular Dynamics Research. Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics*, 14 (2), 1–7. Available at: www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-04-29-012.pdf (in Russian).
10. Chorin A. J. (1967) A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems. *Journal of Computational Physics*, 2 (1), 12–26. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(67\)90037-x](https://doi.org/10.1016/0021-9991(67)90037-x).
11. Rannacher R. (1992). On Chorin's Projection Method for the Incompressible Navier-Stokes Equations. Heywood J. G., Masuda K., Rautmann R., Solonnikov V. A. (eds) *The Navier-Stokes Equations II – Theory and Numerical Methods. Lecture Notes in Mathematics, vol 1530*. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0090341>.
12. Harlow, F. H., Welch J. E. (1965) Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with a Free Surface. *Physics of Fluids*, 8, 2182–2189. <https://doi.org/10.1063/1.1761178>.

Received: 09 January 2024

Accepted: 12 March 2024

Published online: 31 May 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-209-227>

УДК 621.355:004.94

Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначеев²⁾, В. Л. Червинский¹⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова

Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В связи с развитием электротранспорта и ростом «зеленой» энергетики в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Рост рынка аккумуляторных батарей в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Одним из способов повышения эффективности работы накопителя электроэнергии является его гибридизация, т.е. использование разнородных аккумуляторных блоков. В работе исследуются особенности пассивного сопряжения свинцово-кислотных и литий-ионных батарей в гибридном накопителе. Представлена модель для расчета электрических характеристик указанных блоков в процессе работы. Показана возможность выбора структуры гибридного накопителя, обеспечивающей сопоставимый диапазон рабочего напряжения блоков (работы без преобразователей напряжения). Промоделированы режимы работы гибридной системы накопления электроэнергии (СНЭ) как при простом параллельном соединении, так и при коммутации блоков по пороговому алгоритму. Показано, что для выравнивания темпа разрядки основного и дополнительного блоков необходимо согласование емкости СНЭ, степени гибридизации, типа нагрузки и электрических параметров батарей, что невозможно без моделирования системы. При пороговой коммутации блоков появляются дополнительные параметры управления, позволяющие изменять темп разрядки дополнительного блока и повышать экономическую эффективность гибридной СНЭ. Сделаны оценки экономической эффективности работы гибридных СНЭ при различных значениях порогового напряжения коммутации литий-ионного блока, а также для трех характерных нагрузок: вилочного электропогрузчика, 30-квартирного жилого дома и 300-квартирного жилого комплекса. Результаты демонстрируют особенности и технико-экономический потенциал пассивной гибридизации, могут быть использованы при проектировании гибридных СНЭ для небольших энергосистем с солнечными и ветроэлектростанциями, расчете и проектировании систем «генератор – накопитель – потребитель».

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, литий-ионный аккумулятор, гибридный накопитель, система управления батареей (BMS), взаимодействие блоков, эквивалентная схема, моделирование

Для цитирования: Доброго, К. В. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев, В. Л. Червинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 209–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-209-227>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/13,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/13, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System

K. V. Dobrego¹⁾, I. A. Koznacheev²⁾, V. L. Charvinski¹⁾

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

²⁾Luikov's Heat and mass transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Due to the development of electric transport and the growth of “green” energy, electric energy storage systems (ESS) are increasingly being used in the world. The growth of the battery market in the last decade has been 20-30%. One of the ways to increase the efficiency of an electric power storage device is its hybridization, i.e. the use of heterogeneous battery units. The paper examines the features of passive coupling of lead-acid and lithium-ion batteries in a hybrid storage device. A model is presented for calculating the electrical characteristics of these units during operation. The possibility of choosing a hybrid drive structure that provides a comparable operating voltage range of the units (operation without voltage converters) is demonstrated. The modes of operation of a hybrid energy storage system are modeled both for simple parallel connection and for switching blocks according to a threshold algorithm. It is demonstrated that in order to equalize the discharge rate of the main and additional units, it is necessary to coordinate the capacity of the ESS, the degree of hybridization, the type of load and the electrical parameters of the batteries, which is impossible without modeling the system. When the threshold switching of the blocks takes place, additional control parameters, making it possible to change the discharge rate of the additional block and increase the economic efficiency of the hybrid ESS. Estimates of the economic efficiency of hybrid ESSs have been made for different values of the threshold switching voltage of the lithium-ion unit, as well as for three characteristic loads: an electric forklift truck, a 30-apartment apartment building and a 300-apartment residential complex. The results demonstrate the features and technical and economic potential of passive hybridization, can be used for the design of hybrid ESSs for small power systems with solar and wind power plants, in the calculation and design of generator – storage – consumer systems.

Keywords: electric power storage, battery, lead-acid battery, lithium-ion battery, hybrid storage, battery management system (BMS), block interaction, equivalent circuit, simulation

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A., Charvinski V. L. (2024) Modelling of Passive Coupling of Battery Units of Hybrid Energy Storage System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 209–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-209-227> (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Это связано с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, а также с необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем. Рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Согласно данным BloombergNEF [1], мощность и емкость систем накопления электроэнергии в мире выросла за 2022 г. на 16 ГВт / 35 ГВт·ч и приращение объемов накопителей продолжит расти в среднем на 23 % до конца 2030 г. При этом отмечается, что использование накопителей пока не стало экономически привлекательным в большинстве стран мира.

Одним из способов повышения эффективности работы накопителя электроэнергии является его гибридизация, т. е. использование разнородных аккумуляторных блоков, что позволяет выполнить требования технического задания по массе, мощности, запасаемой энергии, либо уменьшить стоимость буферизации электроэнергии по сравнению с накопителем, состоящим из однородных ячеек.

Формулировка задачи гибридизации системы накопления электроэнергии (СНЭ) дана в [2]. В целом она сводится к выбору параметров системы, обеспечивающих минимизацию стоимости буферизации электроэнергии при выполнении некоторых заданных конструкционных или иных ограничений.

Первым и наиболее простым параметром гибридной системы является степень гибридизации – доля емкости аккумуляторов дополнительного типа в общей энергоемкости системы. Однако на эффективность работы системы оказывают влияние технические и алгоритмические аспекты взаимодействия блоков гибридной СНЭ, специфика графика нагрузки [2, 3], факторы тарифной политики поставщика электроэнергии и др.

Технические аспекты гибридизации накопительных блоков рассматривались в литературе достаточно давно [4]. Задача гибридизации литий-ионных батарей и суперконденсаторов (СК) для применения в гибридных электрических автомобилях обсуждалась и моделировалась в 1997 г. в работе [5], где показано, что отдаваемая мощность и эксплуатационный ресурс АКБ гибридного автомобиля могут быть увеличены за счет пассивной параллельной интеграции с суперконденсаторами.

Одна из первых работ по моделированию параллельных гибридных СНЭ на литий-ионных АКБ и СК опубликована Р. Дугалом в 2002 г. [6]. Автор моделировал суперконденсатор RC цепочкой, а батарею – как идеальный источник напряжения с заданным внутренним сопротивлением. Моделирование пассивных гибридных систем проводилось в [7], где показано, что лучший эффект от гибридизации СНЭ достигается при коротких импульсах и длинных периодах отдыха нагрузки. В [8] показано, что пассивная гибридизация с использованием СК действует как фильтр низкочастотных составляющих нагрузки. Сравнение функциональности пассивных и активных гибридных СНЭ проведено в [9]. Однако общих методик оценки эффективности гибридизации не представлено.

В [9] проводится сравнительное исследование аккумуляторной батареи и гибридного источника энергии. Для нагрузок, имеющих импульсный характер, как пассивные, так и полуактивные и активные схемы гибридизации демонстрируют преимущество по сравнению с питанием только от аккумуляторов. Пассивная гибридная сборка, не требующая сложного управления, – проста и дешева, однако не позволяет использовать весь потенциал системы. Активные гибридные сборки могут быть оптимизированы под нагрузку, но имеют высокую стоимость из-за необходимости двух DC-DC конверторов. Полуактивные гибридные сборки, использующие один DC-DC конвертор, представляются разумным компромиссом. Пред-

ставлен математический анализ функционирования гибридных структур, даны рекомендации по их проектированию для случая импульсной нагрузки.

В последние годы большой интерес проявляется к гибридации СНЭ для конкретных приложений, типов нагрузки, с рассмотрением экономического эффекта. В [10] предложена методология определения оптимальной СНЭ для заданного применения. Метод использует усовершенствованные диаграммы Рагона (в осях удельная мощность – удельная энергия) для определения эффективности работы литий-ионных АКБ и СК в зависимости от токового режима и температуры. Рассматривалось применение алгоритма для электрических и гибридных автомобилей, в частности для Tesla Model S, тягача Tesla Semi и автомобиля повышенной проходимости.

Перечисленные и другие работы рассматривают, прежде всего, СК в качестве дополнительного накопителя, кроме того, они не затрагивают вопроса количественной оценки экономической эффективности гибридации для различных видов нагрузки. Последнее освещается в [2], где представлена модель количественной оценки эффективности гибридации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридации и степени внутренней буферизации электроэнергии, предложены методы расчета этих величин. Показано, что в общем случае гибридача СНЭ экономически эффективна, если стоимость буферизации электроэнергии дополнительным типом АКБ не превышает соответствующую стоимость для АКБ основного блока более чем в 1,5–2 раза. Так, дополнение литий-ионных блоков суперконденсаторами, как правило, экономически нецелесообразно, хотя может быть продиктовано требованиями высокой импульсной мощности СНЭ.

Несмотря на то что за счет ресурса циклирования стоимость буферизации электроэнергии литий-ионными АКБ ниже, чем свинцово-кислотными, более низкая стоимость свинцово-кислотных батарей приводит к их широкому использованию в системах солнечной и ветрогенерации. Очевидно, что в случае дорогих кредитных ресурсов использование дешевых типов АКБ в СНЭ становится более привлекательным. В работе [3] представлена модель расчета экономической эффективности гибридации, основанная на расчете отношения стоимости буферизации гибридной СНЭ и стоимости буферизации основным блоком. В данной работе эта модель использована для оценки эффективности гибридации свинцово-кислотных АКБ литий-ионным блоком.

Целью настоящей работы является продолжение разработки методов технико-экономического обоснования использования той или иной схемы гибридации для заданного применения СНЭ. Исследуются особенности пассивной гибридации свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов. Получены технические и экономические характеристики гибридных СНЭ для трех характерных типов нагрузок: вилочного электропогруз-

чика (ЭП), 30-квартирного жилого дома (ЖД), а также 300-квартирного жилого комплекса (ЖК). Полученные результаты могут быть использованы для проектирования гибридных СНЭ для небольших домашних энергосистем с солнечными и ветроэлектростанциями, демонстрируют особенности и технико-экономический потенциал пассивной гибридизации, могут найти непосредственное применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель».

Постановка задачи

При конструировании гибридных СНЭ встает вопрос о способе электрического сопряжения разнотипных модулей. Поскольку гибридизация СНЭ, как правило, имеет целью снижение инвестиционных и эксплуатационных затрат на накопление электроэнергии, использование наиболее экономичных и простых способов сопряжения становится принципиальным требованием. Простейшим способом сопряжения являются их постоянное параллельное соединение и силовая коммутация блоков накопителей согласно определенному алгоритму (рис. 1). При этом токи определяются ЭДС как функциями состояния зарядки $\varepsilon_1(SOC)$ и $\varepsilon_2(SOC)$, внутренними сопротивлениями, емкостями и индуктивностями модулей. Блоки должны иметь совпадающий или близкий диапазон рабочих напряжений.

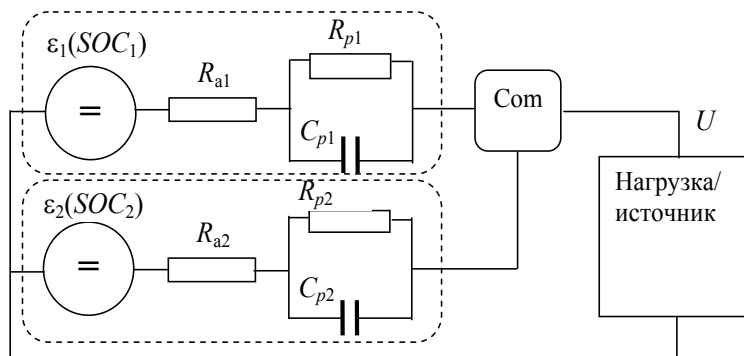


Рис. 1. Электрическая схема гибридной системы накопления электроэнергии:
 $\varepsilon(SOC)$ – ЭДС аккумулятора, функция SOC, Com – программируемый коммутатор

Fig. 1. Electrical diagram of a hybrid energy storage system: $\varepsilon(SOC)$ – battery electromotive force, SOC function, Com – programmable switch

Для моделирования совместной работы блоков СНЭ в рамках электрической схемы (рис. 1) необходимо с достаточной точностью определить электрические характеристики СНЭ различных типов: зависимость ЭДС (напряжения разомкнутой цепи) от состояния заряда батареи $V_{oc}(SOC)$, внутреннее активное сопротивление (R_{a1} , R_{a2}) и параметры поляризации – величины R_{p1} , R_{p2} , C_{p1} и C_{p2} в электрических схемах замещения. Для определения $V_{oc}(SOC)$ и параметров схемы замещения нами использованы ступенчатые разрядно-зарядные кривые в токовом режиме $0,5C$ и с трехчасовой паузой для релаксации параметров АКБ на каждой ступени.

Экспериментальные значения $V_{oc}(SOC)$ аппроксимировались функцией

$$V_{oc} = E_0 + A \cdot SOC + B \cdot \exp\left(\frac{SOC - 1}{D}\right) - F \cdot \exp(-G \cdot SOC), \quad (1)$$

где E_0, A, B, D, F и G – параметры.

Особенностью функции (1) по сравнению с функцией Шеперда [11] является то, что она состоит из трех относительно независимых функциональных частей, что обеспечивает высокую эффективность нахождения параметров аппроксимации.

Напряжение на ячейке представляется в виде суммы напряжения разомкнутой цепи, падения напряжения на активном сопротивлении и напряжения поляризации ячейки, равного напряжению на $R-C$ цепочке:

$$U = V_{oc} - IR_a - U_p. \quad (2)$$

Предполагаем, что параметры схемы замещения не зависят от направления тока (разрядка или зарядка). Незначительный гистерезис функции $V_{oc}(SOC)$, возникающий при смене направления тока, отдельно не моделируется. Значение SOC рассчитывается по величине протекшего заряда и номинальной емкости

$$SOC = 1 - \int_0^t Idt / C_N$$

при начальном значении $SOC(t=0) = 1$. Величина емкости в $R-C$ цепочке схемы замещения (рис. 1) рассчитывается по времени поляризации τ_p : $C_p = \tau_p / R_p$.

Параметры, использованные для расчетов совместной работы блоков гибридной СНЭ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели (1) и схемы замещения для некоторых видов аккумуляторов
Model (1) parameters and equivalent circuits for some types of batteries

АКБ	C , А·ч	U_{op} , В	E_0 , В	A , В/(А·ч)	B , В	D , А·ч	F , В	G , А·ч	Средне- квадрати- ческое отклоне- ние, %	R_a , мΩ	R_p , мΩ	τ_p , с
Pl ₁ AM 100/850	100	10,6–12,6	2,493	0,221	10,005	11,538	1,1677	18,222	~0,7	25	100	1,15
Pl ₂ 7 Ач, AGM DELTA	7	10,6–12,6	2,493	0,221	10,005	11,538	1,1677	18,222	~0,7	62	270	2,83
LiFePO разряд	210	3,1–3,4	3,220	0,1223	0,255	0,0117	0,39722	30,9828	<0,4	0,93	0,6	9,6
MNC разряд	50	3,3–4,3	3,2593	0	1,0781	0,577	0,1807	26,49	<0,4	3,7	0,89	9,4

В исследовании основной блок составлен свинцово-кислотными АКБ, а дополнительный – литий-ионными. Идея гибридизации предполагает, что степень гибридизации α (отношение емкости дополнительного блока к общей емкости) существенно меньше единицы [2]. Для стандартного варианта СНЭ полагаем $\alpha \sim 1/10$, общая энергетическая емкость $C \sim 10$ кВт·ч, номинальное напряжение $U_n = 12$ В. Структуры гибридных систем, отвечающие вышеуказанным условиям:

$$\alpha = 0,22; \begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p1s, \\ \text{LiFePO} \ 4s, \end{cases} C = 12,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p1s, \\ \text{MNC} \ 2p3s, \end{cases} C = 10,74 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,106.$$

Для номинального напряжения 48 В возможны структуры:

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{LiFePO} \ 14s, \end{cases} C = 47,96 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,2;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{LiFePO} \ 15s, \end{cases} C = 48,65 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,21;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{MNC} \ 12s, \end{cases} C = 40,68 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,056;$$

$$\begin{cases} \text{Pl}_1 \ 8p4s, \\ \text{MNC} \ 13s, \end{cases} C = 40,87 \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \alpha = 0,06.$$

Буквы “*p*” и “*s*” означают параллельное и последовательное соединения. Далее по тексту обозначения “*1s*” и “*1p*” опускаются. Параллельно-последовательные сборки, как и отдельные ячейки, моделируются схемами замещения (рис. 1). Функция $V_{oc}(SOC)$ сборки определяется с учетом числа последовательно соединенных базовых элементов, величины R_a и R_p определяются по правилам сложения сопротивлений, емкость C_p вычисляется исходя из допущения о том, что постоянная времени поляризации для сборки τ остается той же, что и у отдельной ячейки, т. е.

$$\begin{cases} C_{p, \text{сборки}} = \frac{\tau}{R_{p, \text{сборки}}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\begin{cases} R_{p, \text{сборки}} = \sum R_p \end{cases}$ – для последовательного и $R_{p, \text{сборки}} = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{R_p} \right)}$ –

для параллельного соединения. Параметры для блоков АКБ представлены в табл. 2.

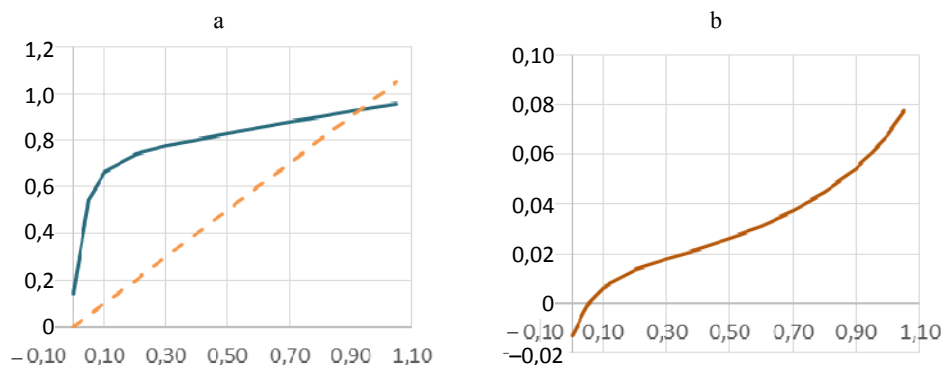
Таблица 2

Модельные параметры аккумуляторных блоков гибридных систем
Model parameters of battery units of hybrid systems

Структура и тип модуля	C_E , кВт·ч*	U_{op} , В	R_a , мΩ	R_p , мΩ	C_p , Ф
PI ₁ 8p	9,60	10,6–12,6	25/8 = 3,125	100/8 = 12,5	1,15/12,5 = 92
LiFePO 4s	2,73	12,4–13,6	3,72	2,4	9,6/2,4 = 4 · 10 ³
MNC 2p 3s	1,14	9,9–12,9	3,7·3/2 = 5,55	0,89·3/2 = 1,335	9,4/1,335 = 7,04·10 ³
MNC 16p 3s	9,12	9,9–12,9	3,7·3/16 = 0,69	0,89·3/16 = 0,17	9,4/0,17 = 55,3·10 ³
PI ₁ 8p 4s	38,4	42,4–50,4	50	200	1,5/0,2 = 7,5
MNC 12s	2,28	39,6–51,6	44,4	10,68	9,4/10,68 = 0,88
MNC 13s	2,47	42,9–55,9	48,1	11,57	9,4/11,57 = 0,812
LiFePO 14s	9,56	43,4–47,6	13,02	8,4	9,6/8,4 = 1,14
LiFePO 15s	10,25	46,5–51	13,95	9,0	9,6/9 = 1,07

*Энергетическая емкость рассчитана по номинальному напряжению.

Как видно из табл. 2, для достаточно высоких напряжений, можно создать структуру, в которой рабочее напряжение дополнительного блока лежит вблизи или сдвинуто относительно рабочего диапазона основного. Наглядное представление о соответствии рабочих диапазонов напряжений дает график $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$, получаемый как решение уравнения $V_{oc1}(SOC_1) = V_{oc2}(SOC_2)$ (рис. 2, 3).

Рис. 2. Зависимость $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ для систем $U_n = 12$ В:а – PI₁ 8p – MNC 2p 3s; б – PI₁ 8p – LiFePO 4s.Штриховая линия – $SOC_2 = SOC_1$ Fig. 2. Dependence $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ for $U_n = 12$ V systems:а – PI₁ 8p – MNC 2p 3s; б – PI₁ 8p – LiFePO 4s.Dashed line – $SOC_2 = SOC_1$

Из графиков рис. 2, 3 видно, что при структуре СНЭ PI₁ 8p – LiFePO 4s рабочий диапазон напряжений литиевого модуля лежит выше диапазона напряжений свинцового. В системе PI₁ 8p – MNC 2p3s рабочий диапазон напряжений литиевого блока близок к диапазону свинцового.

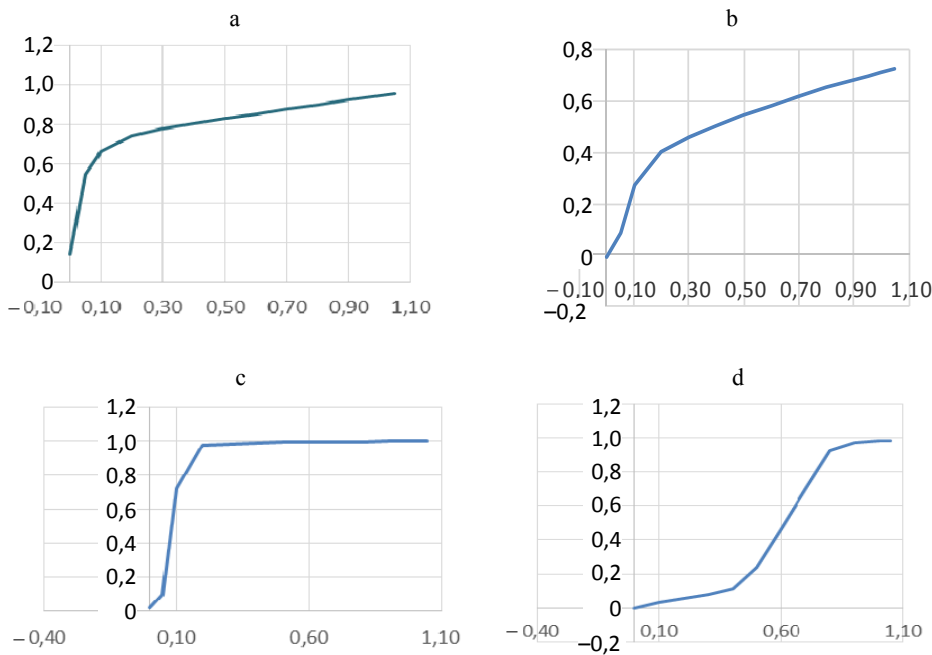


Рис. 3. Зависимость $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ для систем $U_n = 48$ В:

a – $Pl_1 8p4s - MNC 12s$; b – $Pl_1 8p4s - MNC 13s$;
 c – $Pl_1 8p4s - LiFePO 14s$; d – $Pl_1 8p4s - LiFePO 15s$

Fig. 3. Dependence $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ for $U_n = 48$ V systems:

a – $Pl_1 8p4s - MNC 12s$; b – $Pl_1 8p4s - MNC 13s$;
 c – $Pl_1 8p4s - LiFePO 14s$; d – $Pl_1 8p4s - LiFePO 15s$

Наклон графика $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$ определяется отношением производных функций $V_{oc,1}(SOC_1)$ и $V_{oc,2}(SOC_2)$. В области напряжений, характеризуемой большим наклоном $SOC_2 = \varphi(SOC_1)$, с большей интенсивностью работает дополнительный блок СНЭ.

Имитационное моделирование гибридной СНЭ

Для моделирования гибридной СНЭ использовались три типа модельных графиков электрической нагрузки: 1 – нагрузка вилочного электропогрузчика (ЭП) [2]; 2 – нагрузка 30-квартирного жилого дома; 3 – нагрузка 300-квартирного жилого комплекса [12]. График длительной работы вилочного электропогрузчика получаем повторением имеющегося короткого графика с ритмом: 10 мин нагрузки – 10 мин отдыха.

Расчеты проводились для случая постоянного параллельного соединения блоков и для случая коммутации дополнительного блока по пороговому алгоритму: подключение при превышении тока нагрузки выше порога I_{max} и при снижении тока – ниже I_{min} . Базовой величиной нагрузки примем среднее по времени значение тока нагрузки $\langle I \rangle$, а величины I_{min} и I_{max} будем определять амплитудой $\Delta I \equiv (I_{max} - \langle I \rangle)$.

Представление о характере взаимодействия блоков дают графики состояния зарядки блоков от времени $SOC_1(t)$ и $SOC_2(t)$ в рабочем цикле. Количественно работа гибридной системы характеризуется коэффициентом внутренней рекуперации ϵ и эффективностью гибридизации [3]

$$\varepsilon(\alpha) \equiv \int_0^T |i_2 - \alpha I| dt / \int_0^T |I| dt, \quad (4)$$

где i_2 – ток дополнительного блока; I – то же нагрузки; α – степень гибридизации.

Величина $\varepsilon(\alpha)$ зависит от графика нагрузки $I(t)$, поэтому не является собственной характеристикой СНЭ. В случае коммутации дополнительного блока по пороговому алгоритму рассчитывалось также относительное время его «простоя», складывающееся из времени нахождения в отключенном состоянии (τ_0), времени нахождения в предельно заряженном (τ_+) и предельно разряженном (τ_-) состоянии:

$$\theta_0 = \frac{\tau_0 + \tau_- + \tau_+}{\tau_{\text{общ}}}.$$

На рис. 4 приведены графики зависимости состояния зарядки блоков СНЭ P1 8p и MNC 2p3s от времени для различных видов нагрузки. Для нагрузок более высокой мощности рассматриваются варианты параллельной работы 2 и 13 идентичных гибридных СНЭ.

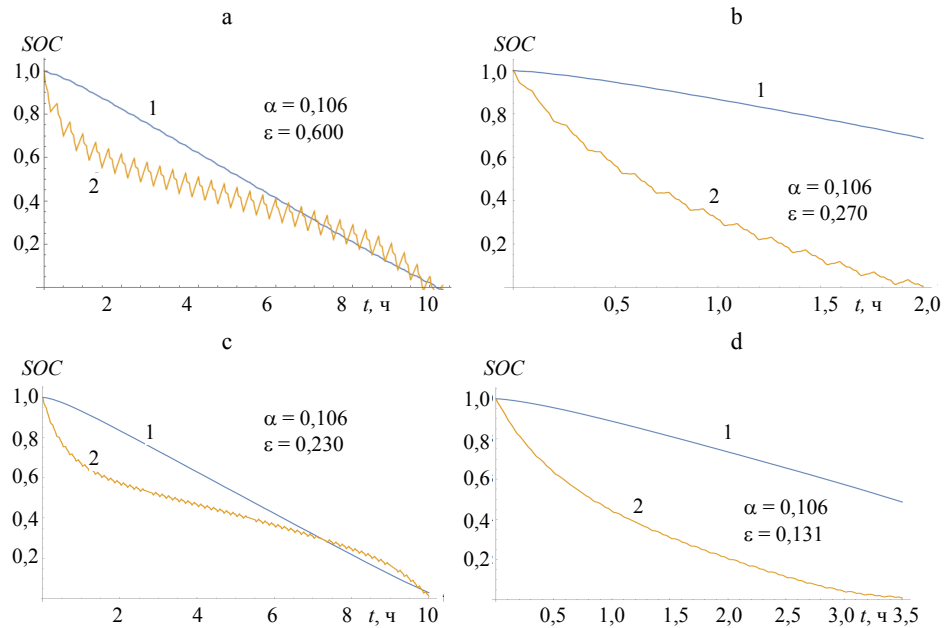


Рис. 4. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени. Параллельное соединение блоков: а – нагрузка электропогрузчика; б – то же жилого дома; с – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); д – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз); 1 – основной блок; 2 – дополнительный блок

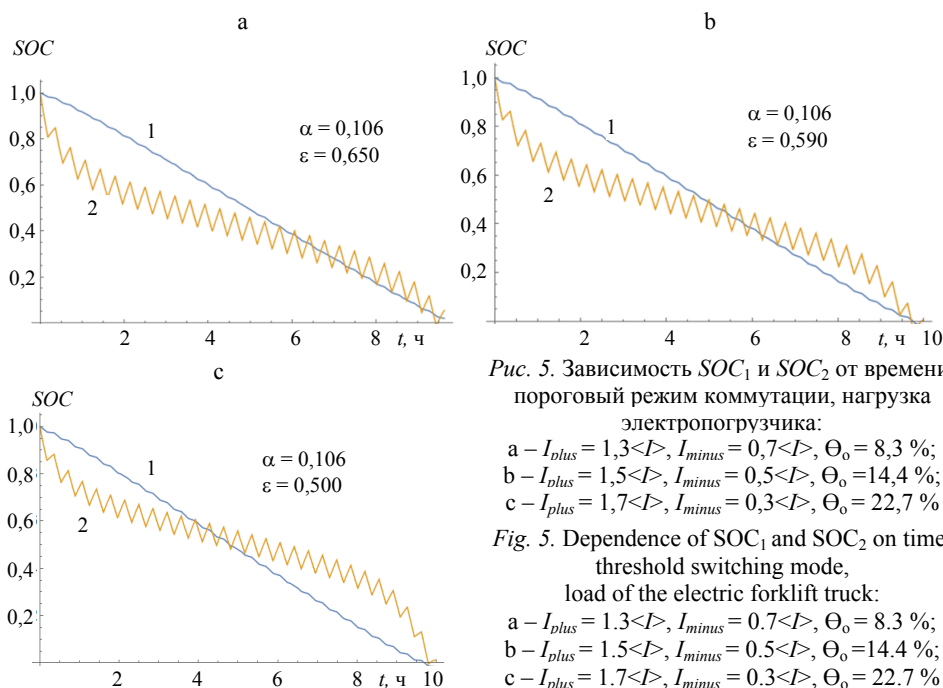
Fig. 4. The dependence of SOC_1 and SOC_2 on time. Parallel connection of the units: а – load of the electric forklift truck; б – the same for the residential building; с – the same for the residential building (doubled capacity of the electricity storage system); д – the same for the residential complex (the capacity of the power storage system has been increased by 13 times); 1 – main unit; 2 – additional unit

При анализе данных (рис. 2, 4) обращает на себя внимание кажущееся противоречие, заключающееся в том, что равновесная функция $SOC(V)$ литиевого блока почти везде лежит выше таковой свинцово-кислотного блока, в то время как при работе СНЭ имеет место обратное. Такое поведение системы обусловлено относительно малой емкостью дополнительного блока и недостаточной скоростью его подзарядки.

Расчеты показывают, что при параллельном соединении блоков для нагрузки ЭП достигается высокое значение коэффициента внутренней рекуперации электроэнергии $\varepsilon = 0,6$, соответствующее интенсивному взаимодействию блоков. Для более равномерных нагрузок ЖД и ЖК коэффициент внутренней рекуперации существенно ниже $\varepsilon \sim 0,1-0,3$, что снижает эффективность гибридизации.

Из графиков рис. 4 видно, что емкость СНЭ, степень гибридизации и тип нагрузки определяют согласованность темпа разрядки основного и дополнительного блоков. Согласно рис. 4b, d, недостаточная общая емкость СНЭ (высокие токовые режимы) приводит к преждевременной разрядке дополнительного блока. При 10-часовом режиме разрядки (рис. 4a, b) основной и дополнительный блоки разряжаются согласованно.

Рассмотрим режимы работы блоков гибридной СНЭ при пороговом режиме коммутации. Значения порогов включения/выключения корректируются в зависимости от типа нагрузки, ее равномерности. В противном случае дополнительный блок может быть практически исключен из работы. На рис. 5 приведены зависимости состояния зарядки основного и дополнительного блоков СНЭ от времени для трех типов нагрузки.

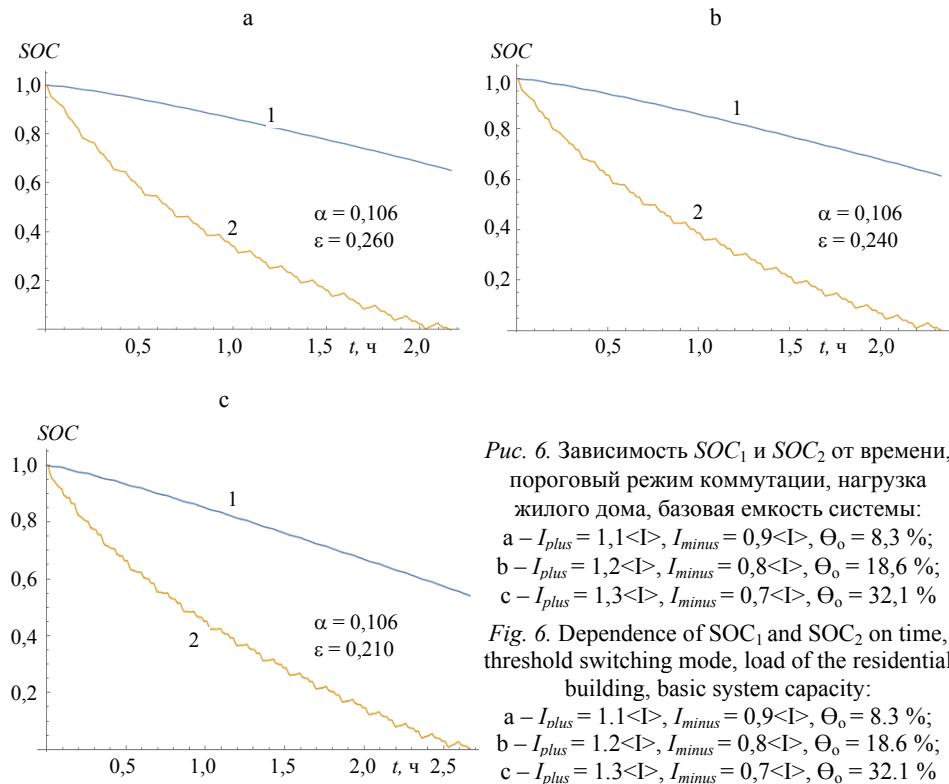


Режимы разрядки, представленные на рис. 5, отличаются временем простоя дополнительного блока. Из расчетов видно, что коэффициент внутренней рекуперации при пороговой коммутации может быть выше, чем при простом параллельном включении блоков. Однако простой дополнительного блока уменьшает его износ, что должно учитываться при оценке экономической эффективности гибридизации.

Приведем графики разрядки блоков для графиков нагрузки ЖД при базовой и увеличенной в два раза емкости СНЭ (две СНЭ подключаются параллельно).

Сравнение данных рис. 6 и 7 показывает, что величина емкости СНЭ оказывает сильное влияние на время работы гибридной пары, что связано с преждевременным разрядом и прекращением работы дополнительного блока. При этом относительное время простоя не зависит от емкости СНЭ. Значение порога включения/выключения также оказывает (но меньшее) влияние на длительность работы гибридной СНЭ.

На примере расчета разрядки блоков для нагрузки ЖК (рис. 8) видно, что изменением значения порогов включения/выключения можно добиться хорошего соответствия темпа разрядки блоков, при этом повышая значение коэффициента внутренней рекуперации и время отдыха дополнительного блока.



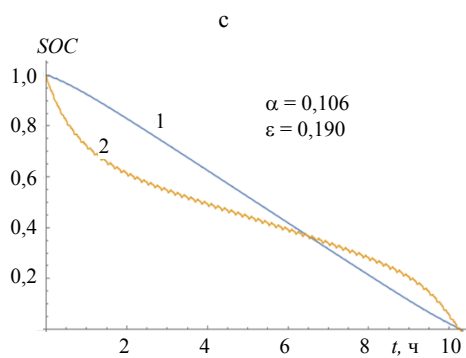
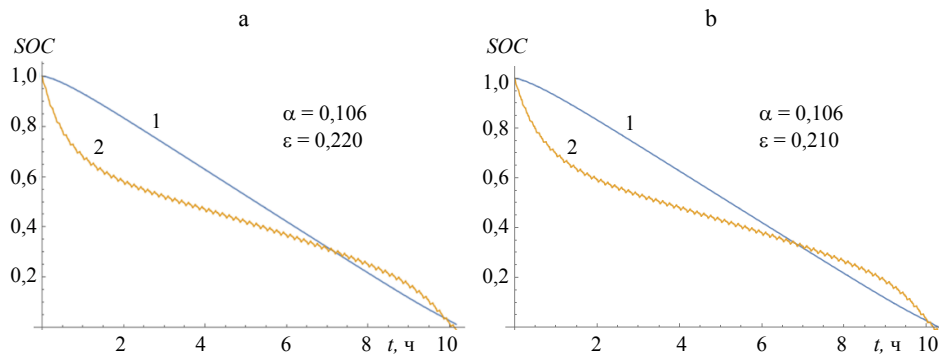


Рис. 7. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени, пороговый режим коммутации, нагрузка жилого дома, удвоенная емкость системы:
 a – $I_{plus} = 1,1 < I >$, $I_{minus} = 0,9 < I >$, $\Theta_0 = 8,3\%$;
 b – $I_{plus} = 1,2 < I >$, $I_{minus} = 0,8 < I >$, $\Theta_0 = 18,6\%$;
 c – $I_{plus} = 1,3 < I >$, $I_{minus} = 0,7 < I >$, $\Theta_0 = 32,1\%$

Fig. 7. Dependence of SOC_1 and SOC_2 on time, threshold switching mode, load of the residential building, doubled capacity of the electricity storage system:
 a – $I_{plus} = 1.1 < I >$, $I_{minus} = 0.9 < I >$, $\Theta_0 = 8.3\%$;
 b – $I_{plus} = 1.2 < I >$, $I_{minus} = 0.8 < I >$, $\Theta_0 = 18.6\%$;
 c – $I_{plus} = 1.3 < I >$, $I_{minus} = 0.7 < I >$, $\Theta_0 = 32.1\%$

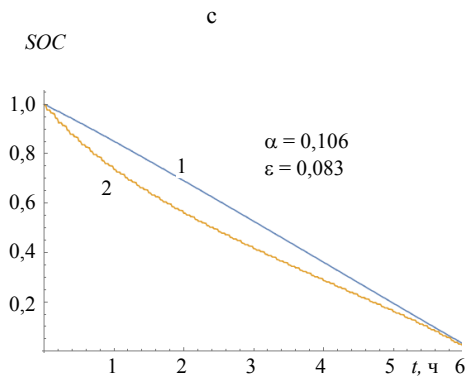
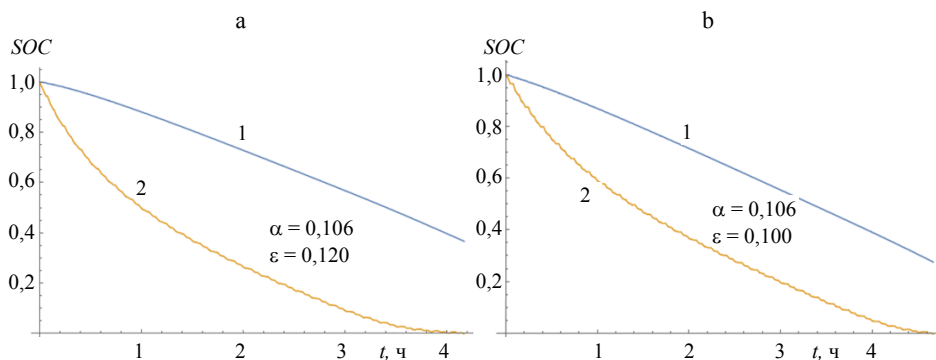


Рис. 8. Зависимость SOC_1 и SOC_2 от времени, пороговый режим коммутации, нагрузка жилого комплекса:

a – $I_{plus} = 1,05 < I >$, $I_{minus} = 0,95 < I >$, $\Theta_0 = 20,5\%$;
 b – $I_{plus} = 1,1 < I >$, $I_{minus} = 0,9 < I >$, $\Theta_0 = 45,4\%$;
 c – $I_{plus} = 1,15 < I >$, $I_{minus} = 0,85 < I >$, $\Theta_0 = 72,4\%$

Fig. 8. Dependence of SOC_1 and SOC_2 on time, threshold switching mode, load of the residential building complex:
 a – $I_{plus} = 1.05 < I >$, $I_{minus} = 0.95 < I >$, $\Theta_0 = 20.5\%$;
 b – $I_{plus} = 1.1 < I >$, $I_{minus} = 0.9 < I >$, $\Theta_0 = 45.4\%$;
 c – $I_{plus} = 1.15 < I >$, $I_{minus} = 0.85 < I >$, $\Theta_0 = 72.4\%$

Поскольку при пороговой коммутации часть времени дополнительный блок исключен из работы (рис. 9), коэффициент ε рассчитывается только во время совместной работы блоков. При этом ε незначительно падает с увеличением амплитуды порога (рис. 10), а коэффициент эффективности η возрастает.

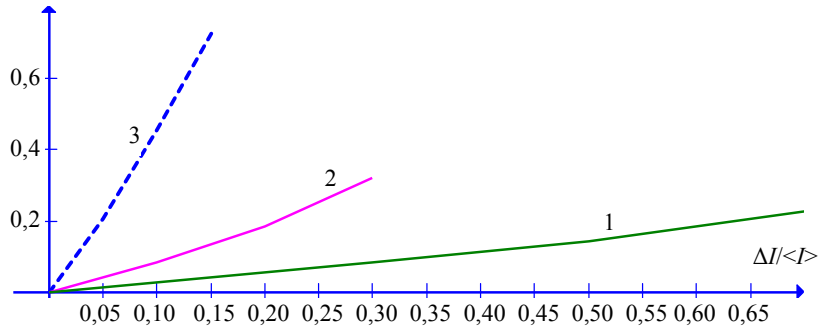


Рис. 9. Зависимость времени простоя дополнительного блока Θ_0 от относительной амплитуды ΔI отклонения пороговых значений тока от среднего: 1 – нагрузка электропогрузчика; 2 – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); 3 – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз)

Fig. 9. Dependence of the downtime of the additional block Θ_0 on the relative amplitude ΔI of the deviation of the threshold current values from the average: 1 – load of electric forklift; 2 – the same of residential building (double capacity of electric power storage system); 3 – the same of residential complex (capacity of electric power storage system increased by 13 times)

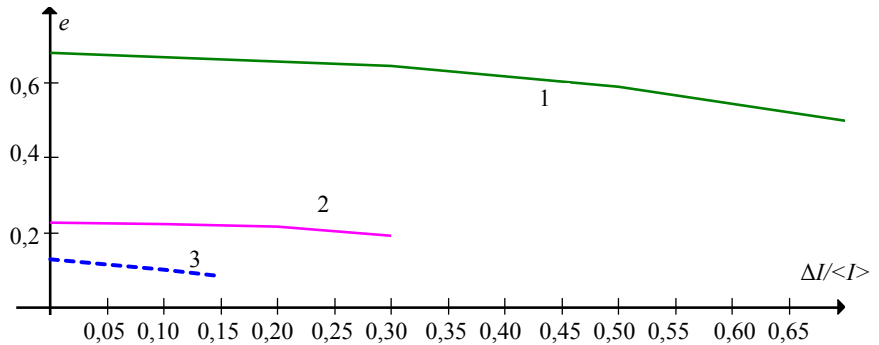


Рис. 10. Зависимость величины внутренней рекуперации гибридной системы накопления электроэнергии ε от относительной амплитуды $\Delta I/<I>$ отклонения пороговых значений тока от среднего: 1 – нагрузка электропогрузчика; 2 – то же жилого дома (удвоенная емкость системы накопления электроэнергии); 3 – то же жилого комплекса (емкость системы накопления электроэнергии увеличена в 13 раз)

Fig. 10. The dependence of the internal recovery value of the hybrid energy storage system ε on the relative amplitude $\Delta I/<I>$ of the deviation of the threshold values of the current from the average: 1 – load of the electric forklift truck; 2 – the same of the residential building (doubled capacity of the electric power storage system); 3 – the same of the residential complex (capacity of the electric power storage system increased by 13 times)

В [2] предложена модель оценки экономической эффективности гибри- дизации СНЭ. Введен коэффициент эффективности η , имеющий смысл от- носительного изменения стоимости буферизации электроэнергии при ги- бридизации СНЭ. Величина η положительная, если при гибридизации сто- имость буферизации электроэнергии падает, и отрицательная – если возрастает. Учитывая, что простой блока исключается из времени его из- носа, модернизируем формулу для оценки коэффициента экономической эффективности

$$\eta(\alpha) = \frac{1}{\frac{1 - \alpha}{1 + \sigma(\alpha + \varepsilon(\alpha))} + \frac{\delta_2}{\delta_{10}} \alpha (1 + \varepsilon)(1 - \theta)} - 1, \quad (5)$$

где δ_{10} – стоимость буферизации электроэнергии основным блоком АКБ в отсутствие дополнительного; δ_2 – то же буферизации электроэнергии до- полнительным блоком; σ – коэффициент, характеризующий эффект допол- нительного блока АКБ на ресурс работы основного.

Специфика рассматриваемой в статье задачи заключается в том, что схема гибридной СНЭ (свинцово-кислотный АКБ, дополненный литий- ионным блоком) в общем случае экономически не обоснована ввиду отно- сительно более низкой стоимости буферизации электроэнергии литий- ионными АКБ [2]. Однако если на приобретение литий-ионных АКБ ис- пользуются дорогие кредитные ресурсы, стоимость литий-ионных бата- рей на протяжении срока эксплуатации может существенно увеличиться. Учитывая сказанное, проведем оценку экономической эффективности гибридизации, согласно (5), для варианта равной стоимости буфериза- ции свинцово-кислотным и литий-ионным блоками $\delta_{10} = \delta_2 = 0,4$ \$/(кВт·ч) и вариантом более дешевой буферизации литий-ионным блоком $\delta_{10} = 0,4$ \$/(кВт·ч), $\delta_2 = 0,2$ \$/(кВт·ч), $\sigma = 1$. Соответствующие оценки для раз- личных нагрузок и режимов коммутации блоков приведены в табл. 3.

Оценки показывают, что эффект гибридизации СНЭ положительный для всех типов нагрузки как при низкой, так и при высокой стоимости литий- ионной компоненты. Данный результат объясняется использованием посто- янного значения синергетического коэффициента $\sigma = 1$, который в силу свое- го физического смысла должен зависеть от характера нагрузки. Действитель- но, при «жестком» режиме нагрузки его смягчение дополнительным блоком заметно увеличивает ресурс базового блока, а при изначально мягком режиме его дополнительное смягчение мало отразится на ресурсе АКБ. Соответ- ственно синергетический коэффициент должен учитывать жесткость режима нагрузки. Физически обоснованным будет нормировка синергетического ко- эффициента на величину относительной дисперсии токовой нагрузки. Тогда для нагрузки ЭП $\sigma = 1$, для ЖД – 0,405, для ЖК – 0,125. Соответствующие данные (табл. 3) показывают, что учет коррекции значения σ приводит к снижению эффективности гибридизации.

Анализ данных показывает, что управление коммутацией блоков по пороговому значению нагрузки предпочтительнее схемы посто- янного параллельного соединения для всех видов нагрузки.

Таблица 3

Эффективность гибридизации для рассмотренных систем,
схем взаимодействия блоков и видов нагрузки (степень гибридизации $\alpha = 0,106$)
Hybridization efficiency for the considered systems, units interaction schemes and load types
(degree of hybridization $\alpha = 0.106$)

Нагрузка	Емкость	Амплитуда $\Delta I / \langle I \rangle$	Коэффициент ε	Время простоя Θ_0	Эффективность η , $\delta_{10} = \delta_2$	Эффективность η , $\delta_{10} = \delta_2$ Коррек. σ	Эффективность η при $\delta_{10} = 2\delta_2$	
Электропогрузчика	1С	0,0	0,677	0,0	0,472	0,472	0,694	
Электропогрузчика	1С	0,3	0,645	0,083	0,491	0,491	0,693	
Электропогрузчика	1С	0,5	0,587	0,144	0,488	0,488	0,667	
Электропогрузчика	1С	0,7	0,496	0,227	0,469	0,469	0,615	
Жилого дома	1С	0,0	0,270	0,0	0,275	0,098	0,395	Б2*
Жилого дома	1С	0,1	0,257	0,083	0,285	0,109	0,395	Б2*
Жилого дома	1С	0,2	0,239	0,186	0,296	0,122	0,392	Б2*
Жилого дома	1С	0,3	0,210	0,321	0,305	0,137	0,383	Б2*
Жилого дома	2С	0,0	0,227	0,0	0,249	0,090	0,359	
Жилого дома	2С	0,1	0,222	0,083	0,262	0,101	0,365	
Жилого дома	2С	0,2	0,215	0,186	0,279	0,116	0,371	
Жилого дома	2С	0,3	0,193	0,321	0,292	0,132	0,368	
Жилого комплекса	13С	0,0	0,131	0,0	0,187	0,012	0,278	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,05	0,116	0,205	0,211	0,037	0,284	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,1	0,101	0,454	0,243	0,069	0,294	Б2*
Жилого комплекса	13С	0,15	0,083	0,724	0,276	0,105	0,303	
* Преждевременный разряд.								

Наибольшая эффективность достигается для существенно переменного графика нагрузки ЭП. При этом функция зависимости эффективности от амплитуды порога демонстрирует максимум. Для более равномерных графиков ЖД и ЖК параметр эффективности существенно меньше, что связано с уменьшением коэффициента внутренней рекуперации (перетоков энергии между блоками) и синергетического коэффициента, при этом увеличение времени простоя оказывает противоположное влияние на эффективность гибридации, в результате чего она повышается с ростом амплитуды порога включения дополнительного блока.

ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрен вопрос взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии на основе свинцово-кислотных и литий-ионных аккумуляторов при пассивном сопряжении блоков: простом параллельном соединении и коммутации по пороговому алгоритму. Представлена модель моделирования работы данной гибридной системы на основе схемы замещения первого порядка при разнообразных нагрузках, задаваемых графиками потребляемой мощности или силы тока. Показано, что выбором электрохимической системы литий-ионных элементов можно добиться удовлетворительного соответствия рабочих напряжений разнородных модулей и реализовать гибридный СНЭ без активных преобразователей напряжения. Проведено моделирование гибридной СНЭ, составленной из свинцово-кислотных и литий-ионных NMC элементов и степенью гибридации $\alpha = 0,106$.

2. Показано, что величина емкости СНЭ при постоянной степени гибридации оказывает принципиальное влияние на время работы гибридной пары, поскольку при недостаточной емкости СНЭ имеют место преждевременный разряд и прекращение работы дополнительного блока.

3. Наибольшая степень внутренней рекуперации и экономическая эффективность гибридной СНЭ достигаются при сильно переменных нагрузках, характерных для электропогрузчиков и некоторых других промышленных потребителей. Для более ровных графиков нагрузок величина коэффициента внутренней рекуперации уменьшается. Схема коммутации блоков по пороговому значению нагрузки предпочтительнее схемы постоянного параллельного соединения для всех видов нагрузки. При этом для случая резкопеременных нагрузок достаточно эффективной может оказаться простейшая схема параллельного соединения блоков АКБ.

4. Схема коммутации блоков по пороговому принципу (при технической простоте) позволяет управлять работой гибридной системы, эффективно использовать емкость дополнительного блока на длительных рабочих периодах и оптимизировать коэффициент внутренней рекуперации электроэнергии. Таким образом, системы с пороговым алгоритмом сопряжения блоков могут использоваться для потребителей, изменяю-

щих свой график электрической нагрузки. В то же время, при равномерном графике нагрузки, примером которого может служить график потребления жилого многоквартирного комплекса, вопрос об экономической эффективности гибридной системы должен рассматриваться более детально с учетом уменьшения влияния дополнительного блока на режим работы основного ($\sigma < 1$).

5. Полученные результаты могут служить основой для проектирования и технико-экономического обоснования применения гибридных систем накопления электроэнергии для промышленных и жилищно-коммунальных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook>. Дата доступа: 07.04.2023.
2. Доброго, К. В. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии / К. В. Доброго, И. А. Козначеев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.
3. Доброго, К. В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии / К. В. Доброго // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232>.
4. Ragone, D. V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / D. V. Ragone // SAE Technical Paper. 1968. 680453. <https://doi.org/10.4271/680453>.
5. Application of Ultracapacitors as Traction Energy Sources / I. N. Varkin [et al.] // Proceedings of the 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices 1997 Dec 8. Florida Educational Seminars, Boca Raton, 1997. P. 742–749.
6. Dougal, R. A. Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids / R. A. Dougal, S. Liu, R. E. White // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2002. Vol. 25, No 1. P. 120–131. <https://doi.org/10.1109/6144.991184>.
7. Cericola, D. Hybridization of rechargeable batteries and electrochemical capacitors: principles and limits / D. Cericola, R. Koz'tz // Electrochim Acta. 2012. Vol. 72. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
8. A Frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery-Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads / A. Kuperman [et al.] // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52, Is. 12. P. 3433–3438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013>.
9. Kuperman, A. Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review / A. Kuperman, I. Aharon // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. Vol. 15, No 2. P. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
10. Catenaro, E. Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles / E. Catenaro, D. M. Rizzo, S. Onori // Energy. 2021. Vol. 231. P. 120695. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695>.
11. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge // Journal of the Electrochemical Society. 1965. Vol. 112, No 7. P. 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
12. Доброго, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Доброго // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170>.

REFERENCES

1. *IH 2023 Energy Storage Market Outlook*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook> (accessed 07 April 2023) (in Russian).
2. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2023) Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422> (in Russian).
3. Dobrego K. V. (2023) On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 215–232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> (in Russian).
4. Ragone D. V. (1968) Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. *SAE Technical Paper*, 680453. <https://doi.org/10.4271/680453>.
5. Varkin I. N., Klementov A. D., Litvinenko S. V., Starodubtsev N. F., Stepanov A. B. Application of Ultracapacitors as Traction Energy Sources. *Proceedings of the 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices 1997 Dec 8*. Florida Educational Seminars, Boca Raton, 742–749.
6. Dougal R. A., Liu S., White R. E. (2002) Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (1), 120–131. <https://doi.org/10.1109/6144.991184>.
7. Cericola D., Kötz R. (2012) Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits. *Electrochim. Acta*, 72, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.
8. Kuperman A., Aharon I., Kara A., Malki S. (2011) A Frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery-Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads. *Energy Conversion and Management*, 52 (12), 3433–3438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013>.
9. Kuperman A., Aharon I. (2011) Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2), 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>.
10. Catenaro E., Rizzo D. M., Onori S. (2021) Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles. *Energy*, 231, 120695. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695>.
11. Shepherd C. M. (1965) (1965). Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664. <https://doi.org/10.1149/1.2423659>.
12. Dobrego K. V. (2017) Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate “Generator – Accumulator – Consumer” System while Using Monte-Carlo Method. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 16 (2), 160–170. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-228-240>

УДК 697.8:62-347

Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы

В. И. Емельянчиков¹⁾, Е. Э. Лойкуц¹⁾, О. Ф. Опейко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Для организации надежного контроля за выбросами дымовых труб энергетических объектов необходимы системы автоматического мониторинга. Известно оборудование для мониторинга выбросов труб малого диаметра, однако для труб большого диаметра (15 м и более), имеющихся в Республике Беларусь, соответствующие технические решения отсутствуют. В работе рассматривается задача автоматизации отбора пробы дымовых газов на основе электропривода в трубах большого диаметра. Для обеспечения оптимальной траектории движения пробоотборника в сечении трубы необходимо использовать асинхронный электродвигатель с преобразователем частоты и датчиком положения. Предложены функциональная схема системы управления, которая содержит программируемый логический контроллер для формирования режима движения, а также метод расчета параметров и выражения для формирования сигнала задания для режима непрерывного отбора пробы. Поскольку диапазон регулирования скорости возрастает по мере увеличения диаметра дымовой трубы, в зависимости от него может быть применено скалярное либо векторное частотное управление. Предложено выражение для расчета оптимального значения параметра N инкрементального датчика положения и скорости (энкодера), что способствует обоснованному выбору датчика. Представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность предложенного метода расчета параметров привода пробоотборника.

Ключевые слова: электропривод, частотное управление, мониторинг выбросов дымовой трубы, энкодер, имитационное моделирование

Для цитирования: Емельянчиков, В. И. Электропривод и автоматизация пробоотборной системы газоанализатора дымовой трубы / В. И. Емельянчиков, Е. Э. Лойкуц, О. Ф. Опейко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 228–240. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-228-240>

Electric Drive and Automation of Sampling System for Chimney Gas Analyzer

V. I. Emeliantchikov¹⁾, E. E. Loikuts¹⁾, O. F. Opeiko¹⁾

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

Abstract. To organize reliable control over emissions from chimneys of energy facilities, automatic monitoring systems are needed. Equipment is known for monitoring emissions from small-diameter

Адрес для переписки

Опейко Ольга Федоровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
oopeiko@bntu.by

Address for correspondence

Opeiko Olga F.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
oopeiko@bntu.by

chimneys, but for large-diameter pipes (15 m or more) available in our Republic, there are no corresponding technical solutions. The paper examines the problem of automating the sampling of flue gases based on an electric drive in large-diameter chimneys. To ensure the optimal trajectory of the sampler in the chimney section, it is necessary to use an asynchronous electric motor with a frequency converter and a position sensor. A functional diagram of the control system is proposed, which contains a programmable logic controller for generating the motion mode, as well as a method for calculating parameters and expressions for generating a task signal for continuous sampling mode. Since the range of speed control increases as the diameter of the chimney increases, depending on it, scalar or vector frequency control can be applied. An expression is proposed for calculating the optimal value of the parameter N of an incremental position and speed sensor (encoder), which contributes to a reasonable choice of sensor. The results of simulation modeling are presented, confirming the effectiveness of the proposed method for calculating the parameters of the sampler drive.

Keywords: electric drive, frequency control, chimney emission monitoring, encoder, simulation

For citation: Emeliantchikov V. I., Loikuts E. E., Opeiko O. F. (2024) Electric Drive and Automation of Sampling System for Chimney Gas Analyzer. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 228–240. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-228-240> (in Russian)

Введение

Мониторинг вредных выбросов дымовых труб в атмосферу, включая автоматическую обработку данных, и их экспериментальное исследование остаются актуальной проблемой [1–13] в связи с большим вниманием к проблеме экологической безопасности в республике. В работе [9] выполнено численное моделирование течения газов в стволе дымовой трубы, показаны сложность динамики и неоднородность дымовых газов в сечении. В [6–8, 10] определены требования к отбору пробы и предложены соответствующие методы с учетом особенностей течения дымовых газов.

Известны различные методы анализа дымовых выбросов – со статическим [10, 16] и мобильным расположением приборов в дымовой трубе, оптические [6], электрохимические и др. Применение мобильных газоанализаторов MRU MGA 5 plus [14], Gasmeter 4000 (Финляндия) [15] и подобных позволяет разделять процессы отбора пробы и ее анализа. Особенностью дымовых труб в Республике Беларусь является большой диаметр поперечного сечения (до 15 м и 35 м) по сравнению с диаметром труб в мировой практике (до 2,4 м) [7]. Кроме того, через дымовую трубу выходят выбросы от нескольких котельных агрегатов. Поэтому отбор пробы требуется производить по всему сечению дымовой трубы [16], либо в точках отбора пробы, либо непрерывно в режиме движения по измерительным линиям. Применение регулируемого электропривода позволяет решить задачу отбора пробы. Дистанционное управление процессом отбора пробы сокращает объем работы на высоте, ограничиваясь плановым обслуживанием электрооборудования [17].

Целью данной работы является построение системы автоматизации отбора пробы в дымовых трубах на базе электропривода. Решаются задачи формулировки требований к системе, формирования схемы автоматизации и вывода выражений для расчета параметров управления. С целью анализа

динамических свойств системы проводится имитационное моделирование электропривода.

Требования к автоматизации отбора пробы

Устройство отбора пробы состоит из подвижной каретки с закрепленной на ней трубкой, отборный конец которой должен перемещаться по измерительной линии в горизонтальном сечении дымовой трубы. Для репрезентативности пробы время ее отбора должно быть не менее 10–30 мин в зависимости от площади сечения трубы [1–8] в режимах дискретного и непрерывного отбора пробы. Схема расположения измерительных линий $A1$ – $A8$ и $B1$ – $B8$ в поперечных сечениях трубы [6–8] показана на рис. 1.

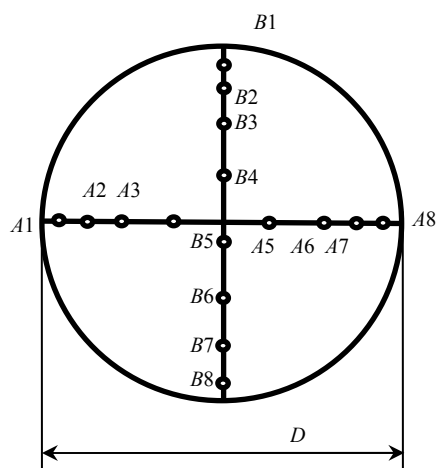


Рис. 1. Точки отбора пробы
Fig. 1. Sampling points

Для режима дискретного отбора пробы установлены точки отбора $A1, A2, \dots, A8$ и $B1, B2, \dots, B8$, которые лежат на двух измерительных линиях, взаимно перпендикулярных и проходящих через ось трубы в ее сечениях, разнесенных по высоте на небольшое расстояние (здесь D – диаметр трубы). Точки рекомендуется располагать по условию равенства площадей колец, формируемых радиусами соседних точек. В режиме непрерывного отбора пробы площадь кольца, пересекаемого в единицу времени, должна оставаться постоянной.

Это означает увеличение скорости при подходе к оси трубы и далее снижение скорости при удалении к краю сечения. Применение регулируемого электропривода для автоматизации отбора пробы позволит обеспечить как дискретный, так и непрерывный режимы. По газосборной трубе газ должен поступать в газоанализатор, который размещен вне дымовой трубы, например в мобильной лаборатории. По результатам отбора пробы в непрерывном режиме возможно определение точки, в которой результат измерения равен среднему по сечению трубы. После этого отбор пробы может выполняться в этой одной точке.

Схема автоматизации отбора пробы

Регулируемый электропривод через редуктор 2 (рис. 2) приводит в движение канатоведущий шкив (КВШ), соединенный канатом со вторым, опорным, шкивом на противоположной стороне трубы для перемещения устройства отбора пробы. Предпочтительно расположение всего оборудо-

вания на рабочей площадке вне трубы (рис. 2). Внутри трубы находится трос с устройством отбора пробы. Для движения по двум взаимно перпендикулярным измерительным линиям применяются два электродвигателя $M1$ и $M2$. Для обеспечения постоянства температуры отобранной пробы газа используется термостатированный ящик 4, клапан 5 позволяет управлять режимом отбора пробы.

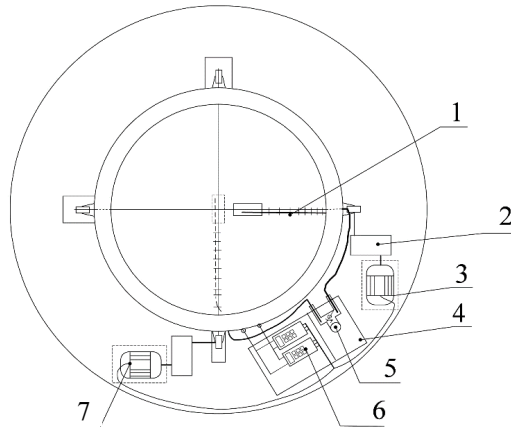


Рис. 2. Расположение оборудования на рабочей площадке трубы: 1 – пробоотборная трубка, 2 – редуктор; 3 – электродвигатель $M1$; 4 – термостатированный ящик; 5 – трехходовой клапан; 6 – преобразователи частоты; 7 – электродвигатель $M2$

Fig. 2. Equipment location on the chimney work site:
1 – sampling tube; 2 – reducer; 3 – electric motor $M1$; 4 – thermostated box;
5 – three-way valve; 6 – frequency converters; 7 – electric motor $M2$

Функциональная схема автоматизации представлена на рис. 3. Регулируемые электроприводы с двигателями $M1$ и $M2$ для движения по взаимно перпендикулярным измерительным линиям идентичны. Двигатели получают питание от преобразователей частоты $UZ1$ и $UZ2$, имеют датчики положения $BQ1$, $BQ2$ и приводят в движение идентичные рабочие органы $L1$ и $L2$. Радиус приведения $r = v_m/\omega_n$, где $v_m = 0,2-0,3$ м/с – требуемая наибольшая скорость рабочего органа, обеспечивается радиусом r_s канатоведущего шкива и передаточным отношением i_r редуктора по выражению $r = r_s/i_r$.

Датчики положения $BQ1$, $BQ2$ необходимы для управления точным позиционированием измерительной каретки в измерительные точки в режиме дискретных измерений. В режиме непрерывных измерений $BQ1$, $BQ2$ позволяют получить информацию о положении и скорости, необходимую для формирования заданного закона движения.

Программируемый логический контроллер (ПЛК, PLC) позволяет выполнить выбор ручного либо автоматического режима отбора пробы, а также координацию движения механизмов по измерительным линиям и отбора пробы.

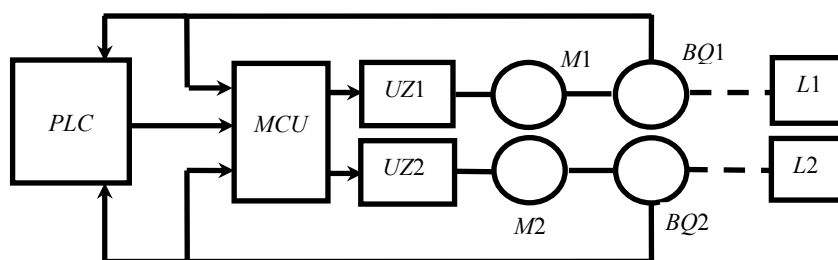


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации

Fig. 3. Functional diagram of automation

Микроконтроллер *MCU* выполняет формирование сигналов управления в каждом из режимов функционирования. Возможен вариант системы без *PLC*, в котором *MCU* выполняет и функции *PLC*, а также вариант системы без *MCU*, где *PLC* выполняет все функции. Структура, представленная на рис. 3, допускает при необходимости развитие автоматизации путем совершенствования программного обеспечения.

Расчет параметров управления

Дискретный отбор пробы выполняется в режиме позиционирования электропривода с остановками на заданных точках в заданное время. Движение между точками может выполняться с наибольшей скоростью $v = v_m$ от периферии трубы к оси, проходя путь $S = R$ за время $t_m/2$, как показано на рис. 4а. После пересечения оси трубы в момент $t_m/2$ диаграмма скорости повторяется симметрично до противоположного края сечения трубы.

В непрерывном режиме площадь F , проходимая за заданный интервал времени T_s , должна быть постоянной, что является критерием репрезентативности отбора пробы. Площадь F определяется как площадь кольца с внешним радиусом R и внутренним радиусом $R - vT_s$ по выражению

$$F = \pi |R^2 - (R - vT_s)^2| = \pi T_s |v| |2R - vT_s|. \quad (1)$$

Здесь v , R – текущие значения скорости движения и радиуса.

Площадь круга с центром на оси трубы и с радиусом $R_0 = v_m T_s$, проходимым с наибольшей скоростью v_m за время T_s , определяется как $F_0 = \pi R_0^2$. Из условия постоянства площадей, проходимых за время T_s , следует равенство $F_0 = F$. При делении (1) на $F_0 = (v_m T_s)^2$ выражение $1 = V(2R_R - V)$ для пошагового расчета, допустимого при малых T_s , принимает вид

$$V_k = 1 / (2R_{R,k} - V_{k-1}). \quad (2)$$

Здесь использованы относительные единицы скорости $V = v/v_m$ и радиуса $R_R = R/R_0$. Следовательно, при $R_R = 1$ выполняется $V = 1$, а при $R_R < 1$

скорость V не определена в области действительных чисел. Однако в круге радиуса R_0 с центром на оси трубы необходимо стабилизировать скорость на уровне максимального значения v_m . В режиме непрерывного движения сигнал задания V для скорости может формироваться, как представлено на рис. 4б. Диапазон регулирования скорости определяется выражением

$$D_v = v_m / v_{\min} \approx R_m / R_0 \quad (3)$$

и повышается с увеличением радиуса трубы. На рис. 4б показан отрезок зависимости (2), когда $-20R_0 \leq R \leq 0$.

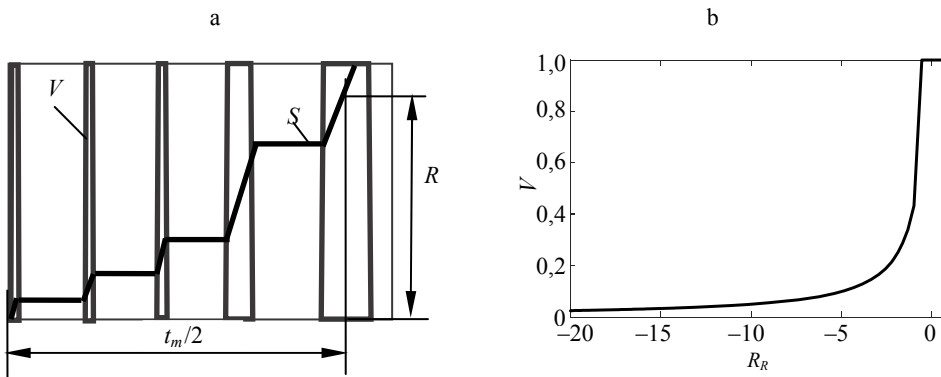


Рис. 4. Диаграмма движения в режиме дискретного (а) и непрерывного (б) отбора пробы

Fig. 4. Motion diagram for the discrete (a) and continuous (b) sampling mode

Если пренебречь электромагнитным процессом, электропривод с асинхронным электродвигателем (АД) и частотным управлением имеет динамику, описываемую системой уравнений:

$$\begin{aligned} dS / dt &= v, \\ T_M dv / dt &= -v + Bu, \\ y &= (S; F)^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь y – выходной вектор, состоящий из значения проходимого пути S , и величины $F(v, S)$ площади, проходимой за время T_s :

$$\begin{aligned} F(v, S) &= \text{abs}(\pi T_s \cdot v)(R - S) = \\ &= \pi |R^2 - (R - vT_s)^2| = \pi T_s |v| |2R - vT_s|. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнениях (4) приняты обозначения: $T_M = R_e J / (k_e k_M \Psi_2)$ – электро-механическая постоянная времени, зависящая от $R_e = R_1 + k_2^2 R_2$, где R_1, R_2 – сопротивления фазы статора и ротора; $k_2 = L_{12} / L_2$ – отношение индуктивностей L_{12}, L_2 – взаимной и ротора соответственно; J – приведенный к валу электродвигателя суммарный момент инерции; $k_e = p_p k_2$; $k_M = 3p_p k_2 / 2$;

p_p – число пар полюсов; Ψ_2 – потокосцепление ротора, постоянный коэффициент B определяется выражением $B = r\omega_n/u_m$.

Для управления объектом (4) по выходу y применимы пропорциональный (П) либо пропорционально-интегрирующий (ПИ) регулятор [18] в зависимости от требования к точности.

Малость интервала времени T_T , формируемого в ПЛК и в микроконтроллерах, позволяет обеспечить допустимую погрешность δ_F измерения площади F . Чем меньше интервал времени T_S формирования задания скорости, тем точнее диаграмма скорости. Так, в окрестности оси трубы по причине ограничения скорости $v = v_m = \text{const}$ имеет место погрешность Δ площади, проходимой за единицу времени, определяемая выражением $\Delta = F_0/2 = \pi R_0^2/2 = T_S^2 \pi v_m^2/2$. Эта погрешность снижает репрезентативность пробы, что в относительном выражении, учитывая радиус трубы R_m , составит $\delta_1 = \Delta/(\pi R_m^2) = T_S^2 v_m^2/(\pi R_m^2)$, и определяется величиной интервала времени T_S

$$T_S \leq \frac{\sqrt{2\delta_1} R_m}{v_m}. \quad (6)$$

Однако рекомендуемое время отбора пробы t_m при движении по диаметру сечения трубы задается условием $t_m = T_S R_m^2/R_0^2 = R_m^2/(T_S v_m^2)$. Отсюда получаем выражение для расчета интервала T_S , скоординированное с требуемым временем отбора пробы t_m :

$$T_S = \frac{R_m^2}{v_m^2 t_m}. \quad (7)$$

Далее следует выбрать минимальное из двух значений (6) и (7)

$$T_S = \min\left(\frac{\sqrt{2\delta_1} R_m}{v_m}, \frac{R_m^2}{v_m^2 t_m}\right). \quad (8)$$

Однако следует учитывать и погрешность выходной величины $F(R)$, в процессе движения вдоль остальной части диаметра трубы. Погрешность $F(R)$ складывается из погрешностей скорости v и положения R . Абсолютная погрешность для F определяется на основании выражения (1) следующим образом:

$$\Delta F(v, S) = 2\pi T_S (|v\Delta R| + |\Delta v R|).$$

Относительная погрешность $\delta_F = \Delta F/F$ определяется на основании относительных погрешностей $\delta_v = \Delta v/v$; $\delta_R = \Delta R/R$ скорости и положения. Если абсолютную погрешность разделить на $\pi v \cdot T_S \cdot R$ и учесть $Rv \approx R_0 v_m$, относительная погрешность величины F примет вид

$$\delta_F = 2(\delta_v + \delta_R). \quad (9)$$

Абсолютная погрешность $\Delta R = 2\pi r/N$ измерения положения инкрементальным датчиком, с учетом (3) и с радиусом приведения $r = v/\omega_N$, где ω_N – скорость вращения датчика, позволяет представить относительную погрешность в виде

$$\delta_R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{2\pi r}{NR}. \quad (10)$$

Погрешности измерения положения и скорости в (9) зависят от датчика положения. Частота f_N событий от датчика пропорциональна скорости $f_N = Nv/2\pi r$. Погрешность измерения скорости [19, 20] зависит от частоты f_T измерения интервала времени $T_N = f_N^{-1}$ между событиями от датчика. Расчет скорости по сигналам датчика выполняется в устройстве управления (в ПЛК или микроконтроллере). Относительная погрешность измерения скорости представима в виде

$$\delta_v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{f_N}{f_T} = \frac{Nv}{2\pi r f_T}. \quad (11)$$

С учетом (10), (11) относительная погрешность для F после преобразований примет вид

$$\delta_F = 2 \left(\frac{NvT_T}{2\pi r} + \frac{2\pi r}{NR} \right).$$

Приравнявая нулю производную по N , учитывая $vR \approx v_m R_0$ и обозначив $\omega_m = v_m/(2\pi r)$, оптимальное $N = N^*$, при котором имеет место минимум δ_a , можно представить в виде

$$N^* = \frac{2\pi r}{R_0} \sqrt{\frac{T_S}{T_T}} = \frac{1}{\omega_m \sqrt{T_S T_T}}. \quad (12)$$

Минимум погрешности определяется выражением

$$\delta_F^* = 4D_v^{-1} \sqrt{T_T / T_S}. \quad (13)$$

Таким образом, выражения (12), (13) позволяют рассчитать параметр N^* инкрементального датчика положения и оценить относительную погрешность величины F .

Методика расчета основных параметров для синтеза системы управления электроприводом основана на расчетных выражениях (7), (8) и (12), (13) и позволяет по исходным данным R , v_m , δ и t_m рассчитать величины T_s и R_0 , а затем построить сигнал задания скорости в соответствии с (2).

Далее, в зависимости от T_s и R_0 , определяется требуемый диапазон D регулирования скорости по выражению (3). Если диапазон не превосходит 50, возможно применение скалярного частотного управления АД. Для диапазона более 50 рекомендуется векторное управление [21, 22]. Как при векторном, так и при скалярном управлении необходим датчик скорости и положения, как правило, инкрементальный. Выражение (13) позволяет определить оптимальное значение количества событий на оборот и параметра N инкрементального датчика.

Пример. Для обеспечения $\delta_1 \leq 0,05$ при $R_m = 5$ м и $v_m = 0,2$ м/с интервал времени в соответствии с (6) должен быть $T_S < 7,9$ с. При $r = 0,05$ м и $t_m \geq 625$ с в соответствии с (7) требуется интервал времени $T_S \leq 1,0$ с, при котором условие (6) обеспечения точности заведомо выполнено. Требуемый диапазон регулирования скорости по выражению (3): $D_v = v_m / v_{\min} \approx R / R_0 = R_m / R_0 = 5/0,2 = 25$. При таком диапазоне возможно применение скалярного частотного управления. В соответствии с выражением (12) при $T_T = 0,01$ с количество событий от энкодера на один оборот должно быть $N^* = 2\pi r / R_0 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,05 / 0,2 \cdot 10 \approx 31$. Относительная погрешность (13) не превысит значения 0,02.

Имитационное моделирование

Целью имитационного моделирования является анализ динамики системы в процессе выполнения задаваемых при отборе пробы программ движения. Имитационное моделирование выполнено в соответствии с уравнениями (4) объекта и структурой системы одного из электроприводов, показанной на рис. 3. При непрерывном отборе пробы движение системы в соответствии с зависимостью (2) и рис. 4б показано на рис. 5 для дымовой трубы диаметром 10 м при наибольшей скорости 0,2 м/с с интервалом времени $T_S = 1$ с.

На рис. 5а представлены графики скорости и положения, на рис. 5б – погрешность отработки постоянства площади за единицу времени.

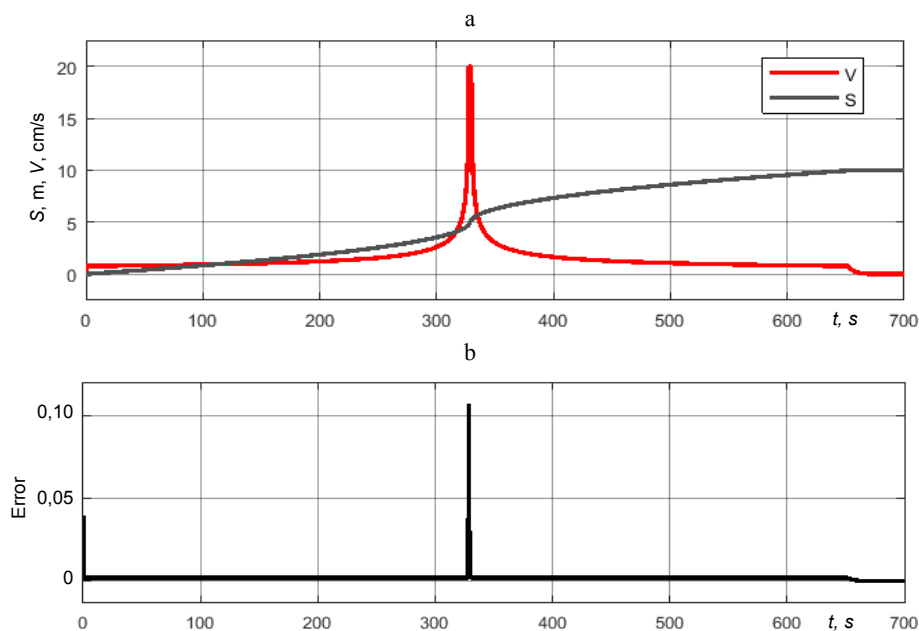


Рис. 5. Процесс движения по измерительной линии в режиме непрерывного отбора пробы, графики скорости v и пути S (а), график ошибки площади, проходимой за время T_S , (б)

Fig. 5. Process of movement along the measuring line in continuous sampling mode, graphs of speed v and position S (а), graph of the error of the area covered during the time T_S (б)

Как видно из рис. 5а, процесс является устойчивым и сигнал скорости соответствует сигналу задания с незначительным отличием. Погрешность закона постоянства площади показана на рис. 5b и не превосходит допустимого значения. Имитационное моделирование системы электропривода со скалярным частотным управлением и обратной связью по положению выполнено для анализа режима дискретного отбора пробы.

В системе применен пропорциональный регулятор положения. На рис. 6а, б представлены соответственно скорость электродвигателя и положение рабочего органа в процессе движения вдоль измерительной линии с остановкой в точке измерения и реверсом. Динамика системы является удовлетворительной, а погрешность положения (рис. 6b) в режиме постоянства скорости составляет не более 0,025 м, что допустимо.

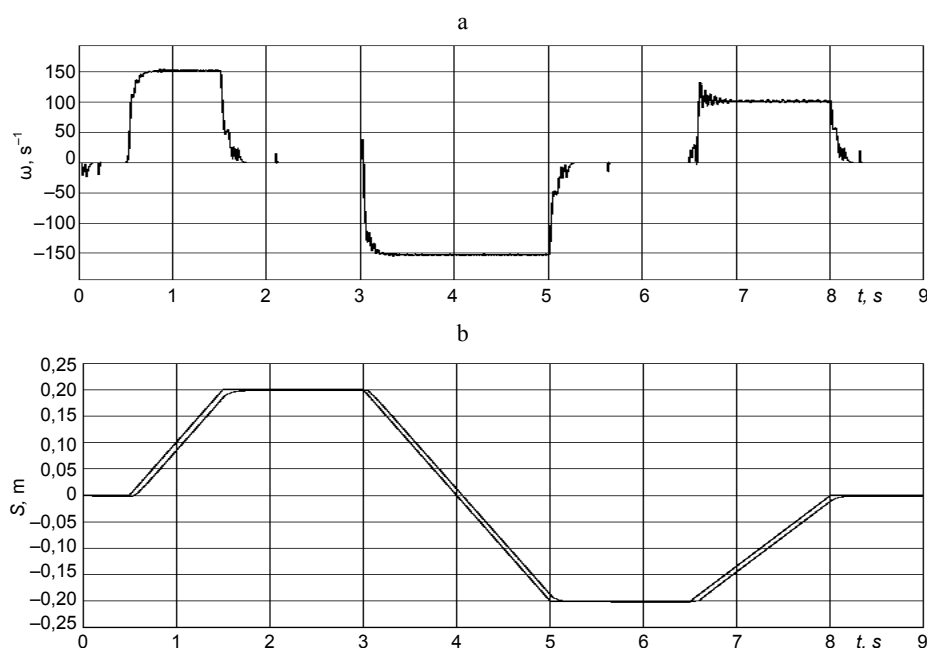


Рис. 6. Скорость вращения ротора двигателя (а),
сравнение заданного положения каретки и фактического (б)

Fig. 6. Motor speed (а), comparison of the specified position
of the carriage and the actual one (б)

Результаты моделирования подтверждают возможность улучшить репрезентативность отбора пробы, применяя автоматизацию на основе электропривода, в том числе для труб большого диаметра.

По сравнению с данными, представленными в [10], где репрезентативность пробы может иметь погрешность от 10 до 40 %, автоматизированный электропривод пробоотборного устройства позволит обеспечить репрезентативность с погрешностью менее 10 % за счет рекомендуемого режима изменения скорости в соответствии с (2).

ВЫВОДЫ

1. Автоматизация системы отбора пробы в сечении дымовой трубы на основе электропривода обеспечивает высокую точность отбора как в дискретном, так и в непрерывном режимах и позволяет улучшить репрезентативность отбора пробы за счет точного выполнения траектории движением устройства отбора.

2. Автоматизированная система позволяет набрать надежный массив данных для исследования процессов тепло- и массообмена внутри дымовых труб.

3. Предложенная методика расчета параметров на основании выражений (8), (15), (16) позволяет рассчитать основные параметры и построить сигнал задания скорости в соответствии с (2) для трубы заданного радиуса R_m и для заданного времени отбора пробы t_m , что улучшит репрезентативность пробы в режиме непрерывного отбора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы автоматического контроля и учета выбросов загрязняющих веществ тепловых электростанций в атмосферу. Основные требования: ГОСТ Р 113.38.03–2021. Введен 01.05.2022. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 36 с.
2. Качество воздуха. Выбросы стационарных источников. Требования к выбору измерительных секций и мест измерений, цели и плану измерений, и составлению отчета: ГОСТ Р ЕН 15259–2015. Введен 15.11.2015. Москва: Стандартинформ, 2015. 61 с.
3. Air Quality – Measurement of Stationary Source Emissions – Requirements for Measurement Sections and for the Measurement Objective, Plan and Report: EN 15259:2007.
4. Правила проектирования и эксплуатации автоматизированных систем контроля за выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух: ТКП 17.13-01–2008 (02120). Минск: Минприроды Республики Беларусь, 2008. 26 с.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух (в том числе озоновый слой). Требования экологической безопасности в области охраны атмосферного воздуха [Электронный ресурс]: ЭкоНиП 17.08.06-001–2022: утв. постановлением М-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 29.12.2022, № 32-Т. Режим доступа: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/04/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.08.06-001-2022-%D0%B7%D0%B0%D1%89-2.pdf>.
6. Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems [Electronic Resource]: 1st Revised Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems August 2018 / Central pollution control board Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi-110032. Mode of access: [https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20\(2\)_compressed.pdf](https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20(2)_compressed.pdf)
7. TCEQ Sampling Procedures Manual Rev. July 19, 2016 // United States Environmental Protection Agency (USEPA) Title 40 Code of Federal Regulations Part 60, Appendix A Method 1 (USEPA Method 1). www.tceq.texas.gov.
8. Liu, D. H. F. Analyzer Sampling / D. H. F. Liu, B. G. Lipták // Analysis and Analyzers. CRC Press, 2016. P. 79–90. <https://doi.org/10.1201/9781315370323-4>.
9. Новожилова, Л. Л. Численные исследования аэродинамики дымовых труб с целью обеспечения достоверного контроля вредных выбросов ТЭС в атмосферу: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.14 / Л. Л. Новожилова. М., 2009. 181 с.
10. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу / П. В. Росляков [и др.] // Теплоэнергетика. 2022. № 2. С. 68–77. <https://doi.org/10.1134/s0040363621110047>.
11. Sednin, A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

12. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 1 / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354>.
13. Сорока, Б. С. Экологические характеристики современных систем бытового использования топлива. Ч. 2: Образование вредных веществ при сжигании природного газа в атмосферных горелках: экспериментальные исследования / Б. С. Сорока, В. В. Горупа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461>.
14. https://mru-instruments.com/wp-content/uploads/2015/04/MGA-5-plus_Brochure-2015.pdf. date of 10.07.2023, 19–26.
15. GT5000 Terra FTIR Gas Analyzer [Electronic Resource] / Gasmeter. Mode of access: <https://www.gasmet.com/wp-content/uploads/2019/09/Gasmeter-GT5000-Terra-Technical-Datasheet-ID-10233-1.pdf>. Date of access: 10.07.2023.
16. Емельяничков, В. И. Автоматические гибкие зонды и системы непрерывного контроля и учета выбросов вредных веществ дымовых труб тепловых электростанций / В. И. Емельяничков, Ю. Ю. Елисеенко // Экологические системы и приборы. 2020. № 6. С. 3–11.
17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: ТКП 181–2009. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2009. 332 с.
18. Анхимюк, В. Л. Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. 2-е изд., испр. Минск: Дизайн ПРО, 2002. 343 с.
19. Опейко, О. Ф. Выбор параметров устройства управления электроприводов с импульсным датчиком / О. Ф. Опейко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2007. № 2. С. 11–17.
20. Brock, S. The problem of measurement and control of speed in a drive with an inaccurate measuring position transducer / S. Brock, J. Deskur // 2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Trento, Italy, 2008. P. 132–136. <https://doi.org/10.1109/AMC.2008.4516054>.
21. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. 2-е изд. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
22. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. Минск: Вышэйш. шк., 2016. 160 с.

Поступила 09.01.2024 Подписана в печать 14.03.2024 Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. State Standard R 113.38.03–2021. *Systems for Automatic Control and Accounting of Pollutant Emissions from Thermal Power Plants Into the Atmosphere. Primary Requirements*. Moscow, Russian Standardization Institute, 2021. 36 (in Russian).
2. State Standard R EN 15259–2015. *Air Quality. Emissions from Stationary Sources. Requirements for the Selection of Measuring Sections and Measurement Locations, the Purpose and Plan of Measurements, and Reporting*. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 61 (in Russian).
3. EN 15259:2007. Air quality – measurement of Stationary Source Emissions – Requirements for Measurement Sections and for the Measurement Objective, Plan and Report. MKC [MKS = ICS – International Classification for Standards] 13.040.40. M. [Moscow]: Publishing House “Standartinform”, 2007.
4. ТКР [Technical Code of Common Practice] 17.13-01–2008 (02120). *Rules for the Design and Operation of Automated Systems for Monitoring Emissions of Pollutants and Greenhouse Gases Into Atmospheric Air*. Minsk, Publishing House of Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2008. 26 (in Russian).
5. EkoNiP [Environmental Standards and Regulations] 17.08.06-001–2022. *Environmental Protection and Nature Management. Atmospheric Air (Including the Ozone Layer). Environmental Safety Requirements in the Field of Atmospheric Air Protection” (Approved by the Resolution of Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 29.12.2022 No 32-T*. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2023/04/%D0%AD%D0%BA%D0%BE%D0%9D%D0%B8%D0%9F-17.08.06-001-2022-%D0%B7%D0%B0%D1%89-2.pdf> (in Russian).

6. *Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems: 1st Revised Guidelines for Continuous Emission Monitoring Systems August 2018*. Central Pollution Control Board Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi-110032. Available at: [https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20\(2\)_compressed.pdf](https://jspcb.nic.in/upload/uploadfiles/files/revised-ocems-guidelines%20(2)_compressed.pdf).
7. TCEQ Sampling Procedures Manual Rev. July 19, 2016 // United States Environmental Protection Agency (USEPA) Title 40 Code of Federal Regulations Part 60, Appendix A Method 1 (USEPA Method 1). www.tceq.texas.gov.
8. Liu D. H. F., Lipták B. G. (2016) Analyzer Sampling. *Analysis and Analyzers*. CRC Press, 79–90. <https://doi.org/10.1201/9781315370323-4>.
9. Novozhilova L. L. (2009) *Numerical Studies of the Aerodynamics of Chimneys in Order to Ensure Reliable Control of Harmful Emissions from Thermal Power Plants Into Atmosphere* [Dissertation]. Moscow. 181 (in Russian).
10. Roslyakov P. V., Kondrat'eva O. E., Ionkin I. L., Egorova L. E. (2022) Ensuring Reliable Continuous Instrumental Emission Control of Marker Pollutants from Thermal Power Plants Into the Atmosphere. *Thermal Engineering*, 69, 57–65. <https://doi.org/10.1134/s0040601521110045>.
11. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
12. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 340–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-340-354> (in Russian).
13. Soroka B. S., Horupa V. V. (2020) Environmental Characteristics of Modern Systems of Domestic Use of Fuel. Part 2. Pollutants Formation by Natural Gas Combustion in Atmospheric Burners: Experimental Studies. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (5), 450–461. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-450-461> (in Russian).
14. <https://mru-instruments.com/wp-content/uploads/2015/04/MGA-5-plus>. Brochure-2015.pdf. date of 10.07.2023, 19–26.
15. *GT5000 Terra FTIR Gas Analyzer*. Gasmeter. Available at: <https://www.gasmet.com/wp-content/uploads/2019/09/Gasmet-GT5000-Terra-Technical-Datasheet-ID-10233-1.pdf> (accessed 10 July 2023).
16. Emelyanchikov V. I. Eliseenko Yu. Yu. (2020) Automatic Flexible Probes and Systems for Continuous Monitoring and Accounting of Emissions of Harmful Substances from Chimneys of Thermal Power Plants. *Ekologicheskie Sistemy i Pribory = Ecological Systems and Devices*, (6), 3–11 (in Russian).
17. ТКР [Technical Code of Common Practice] 181–2009. *Rules for Technical Operation of Consumer Electrical Installations*. Minsk, Publishing House of Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2009. 332 (in Russian).
18. Ankhimiyuk V. L., Opeyko O. F., Mikheev N. N. (2002) *Automatic Control Theory*. 2nd ed. Minsk, Dizain PRO Publ. 343 (in Russian).
19. Opeyko O. F. (2007) Selection of Control Device Parameters for Electric Drive with Pulse Transducer. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 11–17 (in Russian).
20. Brock S., Deskur J. (2008) The problem of Measurement and Control of Speed in a Drive with an Inaccurate Measuring Position Transducer. *2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*. Trento, Italy, 132–136. <https://doi.org/10.1109/AMC.2008.4516054>.
21. Firago B. I., Pavlyachik L. B. (2007) *Electric Drive Theory*. 2nd ed. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ. 585 (in Russian).
22. Firago B. I., Vasilyev D. S. (2016) *Vector Control Systems for Electric Drives*. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ. 160 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-241-256>

УДК 620.97

Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси

Часть 1

Р. С. Игнатович¹⁾, В. А. Седнин¹⁾, Е. С. Зуева²⁾

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

²⁾Филиал «Витебские тепловые сети» РУП «Витебскэнерго»
(Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье представлены результаты исследования по определению рациональной структуры мини-ТЭЦ на местных видах топлива (МВТ) для функционирования в Объединенной энергетической системе (ОЭС) Беларуси с профицитом электрогенерирующих мощностей и доминированием в топливном балансе импортируемых видов энергоресурсов (природного газа и ядерного топлива). При оптимизации режимов эксплуатации мини-ТЭЦ на МВТ, работающих параллельно с ОЭС, имеющей значительный профицит электрогенерирующих мощностей, следует разделять варианты для существующих станций и для вновь строящихся. В первом случае, ввиду того что мощность оборудования известна, целесообразно рассматривать два крайних варианта, т. е. работу теплофикационного блока по электрическому или тепловому графику нагрузки, когда для выдерживания суточного трафика потребления надо предусматривать аккумулирование соответственно тепловой или электрической энергии. При новом строительстве оптимизируемым параметром выступает мощность генерирующего оборудования, поэтому предпочтение необходимо отдавать варианту с максимальным числом часов использования номинальной мощности. Для повышения экономической привлекательности рассмотрены варианты развития структуры мини-ТЭЦ на МВТ с переходом на полигенерационные технологии и адаптацией к сформировавшимся условиям работы ОЭС Беларуси. Представлены результаты анализа коммерчески доступных технологий накопления избыточной электрической энергии в соответствии с текущими и прогнозируемыми (до 2030 г.) стоимостными и эксплуатационными показателями. Для адаптации мини-ТЭЦ к работе в ОЭС в условиях профицита электроэнергетических мощностей наибольший интерес представляет система аккумулирования электрической энергии с использованием водорода в качестве промежуточного энергоносителя. Для утилизации избыточной в часы суточных провалов потребления электрической энергии от мини-ТЭЦ с теплофикационной ОРС-установкой предложена конфигурация структурной схемы с использованием модуля щелочного электролиза для производства водорода.

Адрес для переписки

Игнатович Роман Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 308-26-25
ignarovich.roma@gmail.com

Address for correspondence

Ignatovich Roman S.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavistimosti Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 308-26-25
ignarovich.roma@gmail.com

Рассмотрена эффективность технологии накопления и использования энергии в зависимости от удельной энергоёмкости для различных технологий хранения электрической энергии. Предложено применение двух наиболее энергоёмких технологий накопления энергии: аккумулятирование на базе электрохимических батарей и типа «электроэнергия – водород». В ходе исследования осуществлен анализ функционирования ОРС-установки Turboden 14 СНР, работающей в составе мини-ТЭЦ на МВТ. Выявлено, что на сегодняшний день установка работает в широком диапазоне изменения нагрузки (от 17 до 87 % от номинальной электрической мощности), при этом выработка электрической энергии на тепловом потреблении изменялась в диапазоне от 0,20 до 0,26 МВт/МВт. В связи с тем, что исследуемая ОРС-установка является составляющей энергоисточника с высокой установленной пиковой тепловой мощностью, в текущем состоянии не прослеживается прямая корреляция между температурой наружного воздуха и мощностью генерации ОРС-установки. Данное обстоятельство указывает на необходимость продолжения исследования трендов тепловых нагрузок для построения функциональных моделей для кратко- и среднесрочного прогнозирования тепловой нагрузки от времени суток и среднечасовой температуры наружного воздуха, что было реализовано во второй части работы.

Ключевые слова: водород, блок ОРЦ, генерация, мини-ТЭЦ, местные виды топлива, теплотребление, тепловая энергия, хранение энергии, электроэнергия

Для цитирования: Игнатович, Р. С. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 1 / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин, Е. С. Зуева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 241–256. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-241-256>

Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus

Part 1

R. S. Ignatovich¹⁾, V. A. Sednin¹⁾, Ye. S. Zuyeva¹⁾

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

²⁾“Vitebsk Heat Networks” Branch of RUE “Vitebskenergo”

Abstract. The paper presents the results of a study to determine the rational structure of mini-CHP (Cogeneration Heat and Power Plant) using local fuels types (LFT) for operation as part of the United Energy System (UES) of Belarus with a surplus of electricity generating capacity and dominance of imported types of energy resources (natural gas and nuclear fuel) in the fuel balance. When optimizing the operating modes of mini-CHPs using LFT and operating in parallel with the UES, which has a significant surplus of electricity generating capacity, it is necessary to separate options for existing stations and options for newly built ones. In the first case, due to the fact that the power of the equipment is known, it is advisable to consider two extreme options, i.e., the operation of the heating unit according to an electrical or thermal load schedule. In this case, in order to maintain the daily consumption traffic it is necessary to provide for the accumulation of thermal or electrical energy, respectively. In the case of new construction, the optimized parameter is the power of the generating equipment, so it is advisable to give preference to the option with the maximum number of hours of use of the rated power. In order to increase the economic attractiveness of mini-CHP, options for developing the structure of mini-CHP using LFT with the transition to multi-generation technologies and adaptation to the existing operating conditions of the UES of Belarus have been considered. The results of an analysis of commercially available tech-

nologies for storing excess electrical energy are presented in accordance with current and projected (until 2030) cost and operational indicators. For adapting mini-CHP to operate in the UES in conditions of a surplus of electrical power capacity, an electrical energy storage system using hydrogen as an intermediate energy carrier is of greatest interest. To utilize the excess electrical energy consumption from a mini-CHP with a heating ORC unit during the daily dips, a structural diagram configuration using an alkaline electrolysis module for hydrogen production is proposed. The efficiency of energy storage and use technology is considered depending on the specific energy intensity for various electrical energy storage technologies. The use of the two most energy-intensive energy storage technologies is proposed: accumulation based on electrochemical batteries and the “electricity-hydrogen” type. During the study, an analysis of the functioning of the ORC-installation Turboden 14 CHP ORC-installation operating as part of a mini-CHP using LFT was carried out. It was revealed that today the installation operates in a wide range of load changes (from 17 to 87 % of the rated electrical power), while the generation of electrical energy from thermal consumption varied in the range from 0.20 to 0.026 MW/MW. Due to the fact that the ORC installation under study is a component of the energy source with a high installed peak thermal power, in the current state there is no direct correlation between the outside air temperature and the generation power of the ORC installation. This circumstance indicates the need to continue the study of heat load trends to build functional models for short- and medium-term forecasting of heat load depending on the time of day and average hourly outside air temperature, which was implemented in the second part of the work.

Key words: hydrogen, ORC block, generation, mini-CHP, local fuel types, heat consumption, thermal energy, energy storage, electricity

For citation: Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. (2024) Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 241–256. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-241-256> (in Russian)

Введение

Эффективность систем энергоснабжения определяется уровнем многоукладности и гибкости энергетической системы, и в первую очередь разнообразием используемых топливно-энергетических ресурсов (диверсификацией) и степени взаимодействия генерирующих мощностей в рамках покрытия графика потребления энергии. Особенности современного состояния энергетики Республики Беларусь [1–3] определяются тем, что ввод в эксплуатацию двух блоков Белорусской АЭС суммарной мощностью 2400 МВт дал прирост установленной электрогенерирующей мощности Объединенной энергетической системе (ОЭС) Беларуси более чем на 20 %. Без соответствующего увеличения электропотребления это привело к образованию профицита электрогенерирующих мощностей и потребовало применения мероприятий по повышению маневренности электростанций ОЭС с расширением их регулировочного диапазона [4]. При этом одним из нежелательных последствий может стать вытеснение из графика генерации электроэнергии наиболее эффективной комбинированной выработки [5]. Вместе с тем для достижения поставленных целей в области энергетической безопасности страны [6] и максимального использования собственных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) ввод

новых мощностей, использующих местные виды топлива (МВТ), по-прежнему важен. При этом в вышеуказанных условиях несомненный интерес для исследования представляет анализ эффективности применения комбинированных энергоисточников малой мощности (мини-ТЭЦ) при их работе на МВТ.

При всей очевидности преимущества использования собственных ТЭР в структуре энергетического баланса страны в условиях применения теплофикации, оно ограничивается стоимостью капитальных вложений в такие энергоисточники. В зависимости от выбранной технологии и номинальной мощности энергоблока удельная стоимость электрической мощности лежит в диапазоне от 1500 до 3000 евро/кВт [2], что свидетельствует о мини-ТЭЦ на МВТ как об относительно дорогостоящем варианте генерирующего оборудования. И как следствие, актуальным является вопрос определения условий экономической эффективности эксплуатации существующих электростанций и установления технико-экономических требований для строительства новых мини-ТЭЦ на МВТ. Эксплуатация данного вида электростанций в сложившейся ситуации также требует решения проблемы оптимизации режимов работы электрогенерирующего оборудования в рамках суточной и сезонной неравномерности графика потребления энергии в ОЭС. В данной работе представлены результаты исследований в области повышения экономической привлекательности мини-ТЭЦ на МВТ при их структурном развитии с переходом на полигенерационные технологии и адаптацией к сформировавшимся условиям работы ОЭС Беларуси [7, 8].

Обоснование выбора варианта развития структуры мини-ТЭЦ на местных видах топлива

Для исследования эффективности эксплуатации мини-ТЭЦ на МВТ необходимо рассмотреть два граничных варианта допустимой области режимов их работы с учетом суточной неравномерности графика энергосистемы: по графику тепловой нагрузки подключенной тепловой сети и по графику электрической нагрузки энергосистемы. С целью получения максимума комбинированной выработки энергии в первом варианте требуется применение аккумулирования электрической энергии в разрезе суток, а во втором – аккумулирование тепловой энергии в рамках суточной и сезонной неравномерности ее потребления. Во втором варианте для компенсации сезонной неравномерности обычно применяют пиковые водогрейные мощности, а для компенсации суточной традиционной и наиболее доступной сегодня технологии накопления тепловой энергии – водяные тепловые аккумуляторы (АТ). Технологическая схема с их включением в достаточной мере изучена и апробирована [9], хотя в каждом конкретном случае может потребоваться оптимизация размещения АТ в структуре системы теплоснабжения (СТ). Для аккумулирования электрической энергии применяют химические электрические накопители, газокompрессорные

станции с накопителями сжатого воздуха, гидроаккумулирующие гидроэлектростанции, а в последние годы – регенеративные системы с генерацией промежуточных энергоносителей в виде водорода, аммиака, синтетического метана и ряда других энергоносителей [10, 11]. На рис. 1 приведена оценка экономической эффективности накопления и использования энергии в зависимости от удельной энергоёмкости для различных технологий хранения электрической энергии [10].

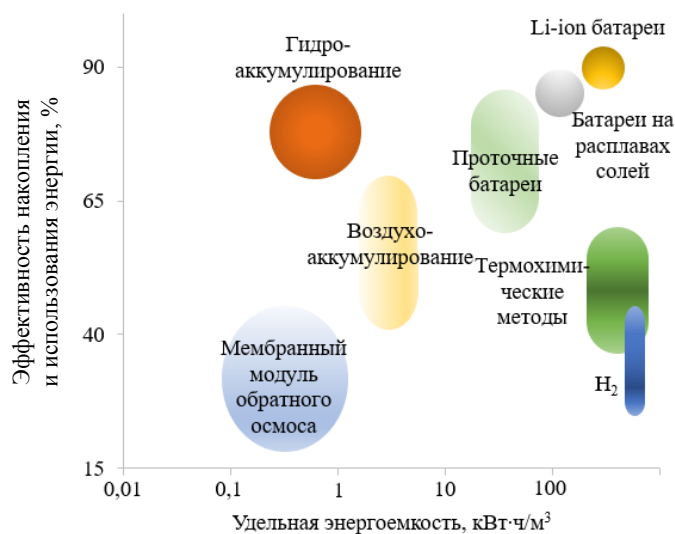


Рис. 1. Зависимость эффективности накопления и использования энергии от удельной энергоёмкости для различных технологий хранения электрической энергии

Fig. 1. Relationship between the efficiency of energy storage and its use on specific energy intensity for various electrical energy storage technologies

С целью адаптации мини-ТЭЦ на МВт к условиям работы по электрическому графику ОЭС выбраны две наиболее энергоёмкие технологии накопления энергии: на базе электрохимических батарей; «электроэнергия – водород».

Согласно [11], наиболее широкое коммерческое применение среди различных электрохимических накопителей на сегодняшний день имеют литий-ионные (Li-ion) батареи, которые признаются самыми недорогими и конкурентоспособными до 2030 г. В табл. 1 приведены основные технические данные литий-ионных батарей с установленной мощностью 1 МВт за 2021 г., а также прогнозируемые технические данные на 2030 г.

Традиционная схема аккумуляции электрической энергии с применением водорода в качестве промежуточного энергоносителя состоит из систем:

- зарядки (электролизер, оборудование для подготовки воды, системы управления, вспомогательное оборудование и компрессор);

- разрядки (топливный элемент либо устройство для сжигания, модули химического связывания водорода, системы управления, вспомогательное оборудование);
- хранения (ресиверы, естественные и искусственные резервуары).

Таблица 1

Основные технические данные литий-ионных батарей [11]

Basic technical data of lithium-ion energy batteries [11]

Параметр	Литий-железо-фосфатная батарея (LFP)		Литий-никель-марганцево-кобальтовые батареи (NMC)	
	2021	2030	2021	2030
Эффективность зарядки и разрядки, %	83	85	83	85
Количество циклов зарядки-разрядки, шт.	2400	2640	1520	1672
Общее время работы, лет	Более 6	Более 7	Более 4	Более 4
Глубина разряда, в % от номинальной емкости батареи	80	80	80	80
Капитальные затраты при установленной мощности 1 МВт*, \$/кВт	1037/4023/9128	798/3024/6831	1151/4566/10405	882/3423/7769
* – капитальные затраты варьируются в зависимости от требуемого времени хранения энергии. Значение соответствует времени хранения, равному 2/10/24 ч.				

К преимуществам варианта с генерацией водорода [11, 12] следует отнести высокую энергоемкость, относительно низкую скорость саморазрядки, которая определяется количеством утечек водорода, а также отсутствием ограничений по циклам зарядки и разрядки.

Энергетическая эффективность хранения водорода от генерации до потребления определяется типом электролизера и видом компрессора, количеством утечек водорода при его хранении, а также эффективностью системы разрядки. Перспективными методами аккумуляции водорода [13] являются хранение его при высоком давлении после криогенного охлаждения ниже температуры насыщения или сорбцией в пористых материалах, с производством синтетических топлив (метанол, аммиак, синтетический природный газ), химическом гидрировании и металлгидрировании, использовании жидких органических носителей водорода (жидкости, образующие с водородом связи, что упрощает процесс транспортировки). В качестве методов использования накопленного водорода следует выделить получение электрической и тепловой энергии в топливном элементе, прямое сжигание H_2 для получения тепловой энергии, производства и внешнего использования в виде метанола, аммиака или синтетического природного газа, а также добавление водорода в сеть природного газа (ПГ). Многие исследователи [14, 15] сходятся во мнении, что существует ряд сфер, где развитие электрификации по каким-то причинам в ближайшей перспективе будет невозможным и планируемое сокращение использова-

ния ископаемых видов топлива в рамках стратегии декарбонизации экономики потребует использования чистого водорода либо метанола. Это открывает дополнительную возможность для продажи накопленного водорода без использования систем разрядки. Основные технические данные, указывающие на эффективность коммерчески используемых электролизеров, приведены в табл. 2 [16–18].

Анализ представленных в табл. 2 данных позволяют констатировать, что при применении методов точного прогнозирования графика суточного потребления электрической энергии с целью накопления избыточной энергии с использованием водорода (электролиз) допускается использование наиболее дешевых щелочных электролизеров, показатели эффективности которых идентичны их более дорогим конкурентам – электролизерам с протонообменной мембраной (PEM электролизерам). Повышенный интерес европейских стран к последним связан с главным преимуществом PEM электролизеров – быстрым включением в работу, что крайне актуально при наличии в ОЭС генерации электроэнергии на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и не так актуально в нашем случае. Общие капитальные затраты на хранение избыточной энергии в виде водорода также зависят от выбранных методов хранения и разрядки. Стоимость топливного элемента [11] в случае его применения в системе разрядки сопоставима со стоимостью электролизера и увеличивает капитальные затраты при использовании данной системы хранения энергии в два раза.

Таблица 2

Основные технические данные коммерчески используемых электролизеров**Basic technical data of commercially used electrolysers**

Параметр	Щелочной электролиз (AEC)	Электролиз на протонообменной мембране (PEM)	Электролиз на анионообменной мембране (AEM)	Электролиз на твердых оксидах (SOEC)
Номинальная плотность тока, А/см ²	0,2–0,8	1–2	0,2–2,0	0,3–1,0
Рабочая температура, °С	70–90	50–80	40–60	700–850
Рабочее давление, бар	Менее 30	Менее 30	Менее 35	1
Диапазон загрузки, %	15–100	5–120	5–100	30–125
Энергетическая эффективность (по Q_p^H), %	50–68	50–68	52–67	75–85
Удельные затраты электроэнергии на 1 кг H ₂ , кВт·ч/кг	47–66	47–66	51,5–66	35–50
Срок эксплуатации, ч	60000	50000–80000	Более 5000	Менее 20000
Время пуска из холодного состояния до номинальной мощности, мин	30–60	Менее 20	Менее 20	Более 600
Капитальные затраты при установленной мощности от 1 МВт*, \$/кВт	270	400	–	Более 2000
* – капитальные затраты справедливы на 2022 г. и в условиях Республики Беларусь могут отличаться.				

Из вышесказанного следует, что для достижения обозначенных целей адаптации мини-ТЭЦ к условиям энергосистемы с максимальным вовлечением комбинированных мощностей в структуру выработки энергии из рассмотренных систем наибольший интерес представляет система аккумулирования с промежуточным энергоносителем в виде водорода. Несмотря на существенно более низкую энергетическую эффективность накопления и разрядки водородных систем хранения по сравнению с литий-ионными батареями, ряд конфигураций системы без использования топливных элементов оказывается значительно дешевле батарей. При этом электролизеры практически не имеют ограничения по циклам зарядки и разрядки, а также имеют низкую скорость саморазрядки. Вместе с тем следует отметить, что при накоплении электрической энергии непосредственно из ОЭС при участии в балансировке графика энергопотребления в часы суточных пиков и провалов потребления электрической энергии, ввиду того что периоды пиков потребления электрической энергии во времени короче периодов снижения мощности ее потребления, целесообразно использовать комбинацию батарей для краткосрочного накопления энергии с максимальной энергетической эффективностью и электролизеров для долгосрочного хранения энергии либо комбинацию батарей для краткосрочного накопления энергии с оборудованием для производства промежуточного энергоносителя для внутристанционного или внешнего потребления.

Анализ текущих режимов работы генерирующего оборудования мини-ТЭЦ

Для выявления требований и условий адаптации мини-ТЭЦ на МВТ путем интеграции в ее тепловую схему дополнительной электролизной установкой для производства водорода в часы минимума потребления электрической нагрузки ОЭС был выполнен анализ режимов работы действующей мини-ТЭЦ с теплофикационной ОРС-установкой в качестве генерирующего оборудования. Для определения реальных условий эксплуатации мини-ТЭЦ на МВТ исследованы режимы работы действующей ОРС-установки (графики генерации электрической и тепловой энергии). В качестве прототипа рассматривалась ОРС-установка Turboden 14 СНР мини-ТЭЦ на МВТ по ул. Павловского, 66, входящей в состав РТС-6 ГП «Минсккоммуна-теплосеть». Ее установленная электрическая мощность составляет 1280 кВт, тепловая – 5,3 МВт, электрический абсолютный КПД на номинальной мощности 19 %, тепловой КПД 79 %. Основным видом топлива – древесная щепа. Помимо мини-ТЭЦ на МВТ на рассматриваемом энергоисточнике работает пиковая газомазутная котельная с установленной мощностью 42 МВт, использующая природный газ в качестве основного топлива. В 2022 г. в состав пиковой котельной был включен водогрейный котел ETS-3700, использующий в качестве топлива древесную щепу. Мини-ТЭЦ и котельная служат для теплоснабжения микрорайона «Сосны», жилых и общественных зданий воинского городка «Сосны» и производственных зданий ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны». Для анализа текущих режимов эксплуатации ОРС-установки использованы данные от автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) за отопительный пе-

риод с 01.10.2022 по 31.03.2023. На рис. 2а, б приведена структура выработки тепловой и электрической энергии на ORC-установке в указанный период времени.

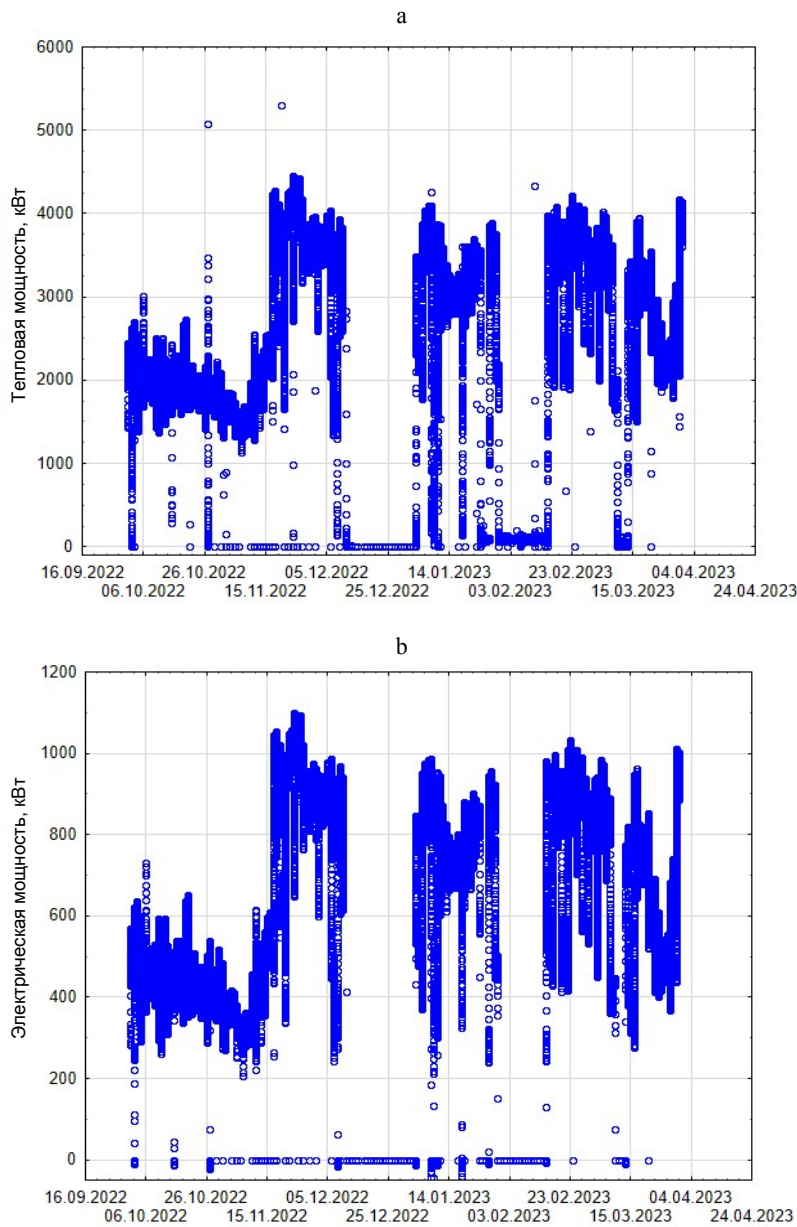


Рис. 2. Структура выработки энергии на ORC-установке в период с 01.10.2022 по 31.03.2023: а – тепловая энергия; б – электрическая энергия

Fig. 2. Structure of energy production at ORC-installation in the period from 01.10.2022 until 31.03.2023: a – thermal energy; b – electric energy

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что ORC-установка в рассматриваемый период времени работала в переменных режимах по мощно-

сти, а в определенные периоды полностью останавливалась. Максимальная нагрузка установки по электрической энергии в указанный период составляла 87 % от номинальной электрической мощности, а минимальная без учета переходных режимов включения и выключения опускалась ниже 20 %. Очевидно, что режим работы ОРС-установки и соответственно суточный график производства тепловой и электрической энергии напрямую зависят от температуры наружного воздуха. В связи с этим интерес вызывает вид характерных в рассматриваемый период времени суточных графиков производства энергии, когда установка находилась в работе. Рассматривались режимы работы с минимальной, максимальной и наиболее характерной для отопительного периода температурой наружного воздуха (рис. 3).

Как следует из рис. 3, минимальная температура наружного воздуха в рассматриваемый период находится в интервале -20 – -15 °С (характерный график для температуры -18 °С от 07.01.2023), максимальная в интервале 15 – 20 °С (характерный график для температуры 17 °С от 08.10.2022), а наибольшее количество раз наблюдалась температура $-0,2$ °С (характерный график от 21.01.2023). На рис. 4 соответственно приведены суточные графики производства тепловой и электрической энергии в течение вышеуказанных характерных суток.

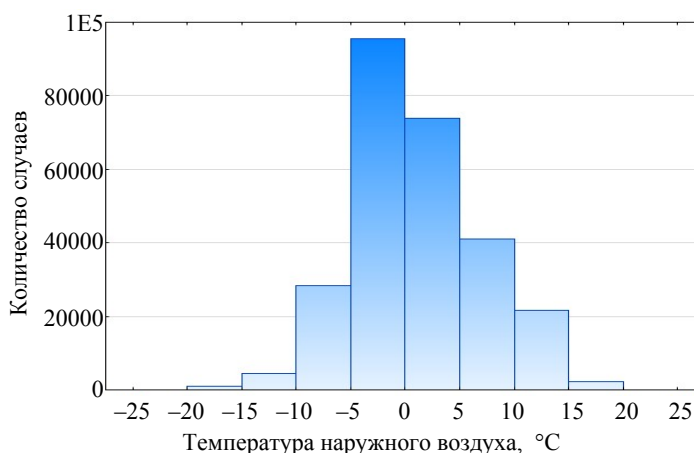


Рис. 3. Гистограмма температуры наружного воздуха в различных диапазонах исследуемого набора данных

Fig. 3. Histogram of the number of outdoor temperatures in different ranges of the studied data set

Из графиков мощности на рис. 4 следует, что распределение нагрузки в течение выбранных суток изменяется незначительно. Помимо этого, можно проследить корреляцию изменений суточных графиков выработки тепловой и электрической энергии в зависимости от температуры окружающей среды. Так, при максимальной температуре воздуха генерация минимальная, а при минимальной температуре воздуха максимальная.

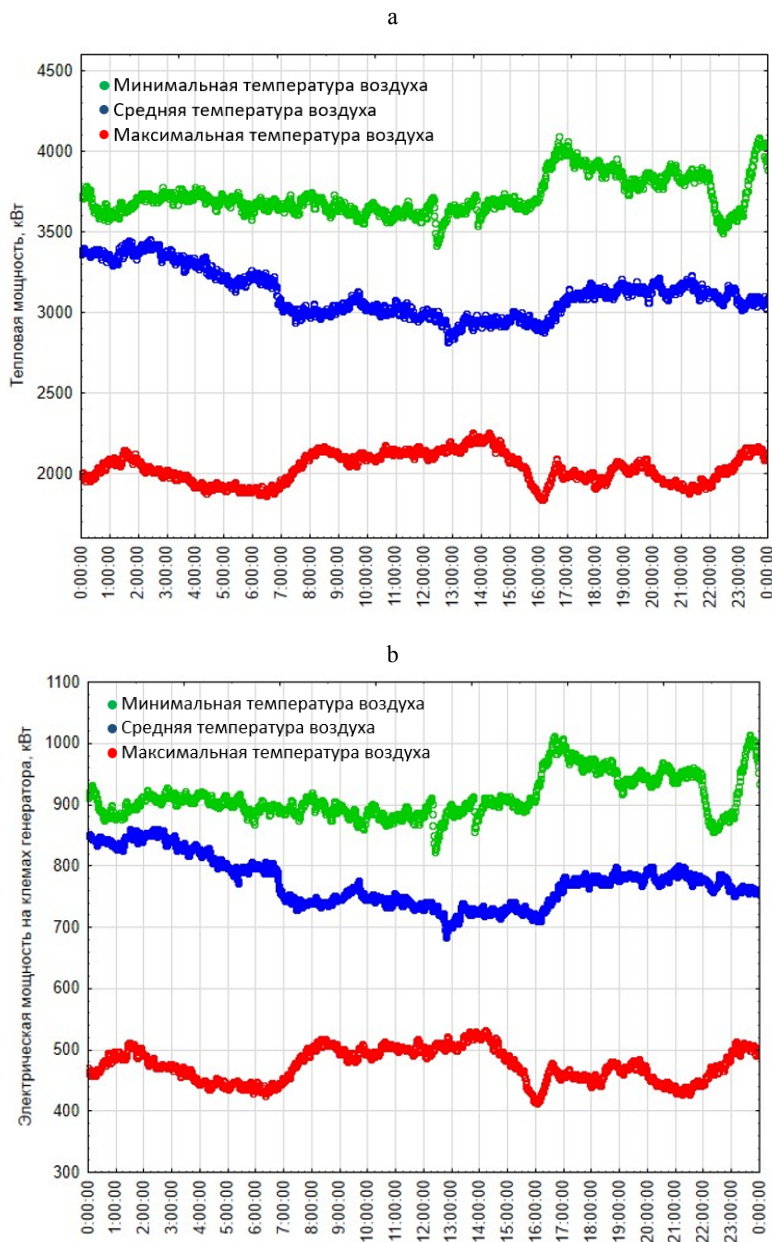


Рис. 4. Суточный график выработки энергии на ORC-установке:
 а – тепловой; б – электрической

Fig. 4. Daily schedule of energy production at the ORC-installation:
 a – thermal; b – electric

Однако данная корреляция не всегда проявляется так. Например, для 26.11.2022 со среднесуточной температурой, близкой к 0 °С, температурный график будет выше, чем при минимальной температуре наружного воздуха. На рис. 5а и 5б соответственно показана зависимость вырабатываемой тепловой и электрической мощности ORC-установки от температуры

наружного воздуха без учета переходных режимов пуска и остановки модуля и выбраковки данных.

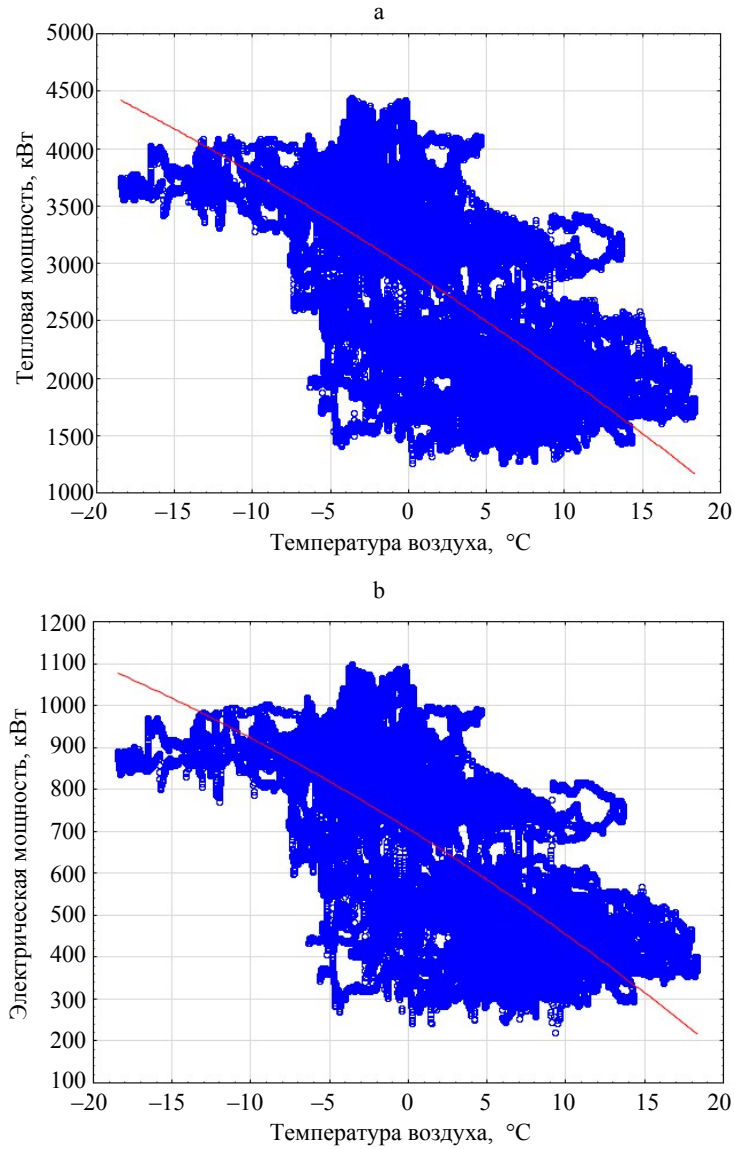


Рис. 5. Зависимость мощности ORC от температуры наружного воздуха:
а – тепловой; б – электрической

Fig. 5. Dependence of ORC power on outside air temperature:
a – thermal; b – electric

Из рис. 5 следует, что даже после исключения выпадающих показателей и периодов переходных режимов работы установки разброс имеющихся данных слишком велик для проведения прогнозирования режимов работы установки в зависимости от температуры наружного воздуха. Помимо этого, интерес вызывает зависимость величины генерации электрической

энергии на тепловом потреблении от температуры наружного воздуха, приведенная для рассматриваемого периода времени на рис. 6.

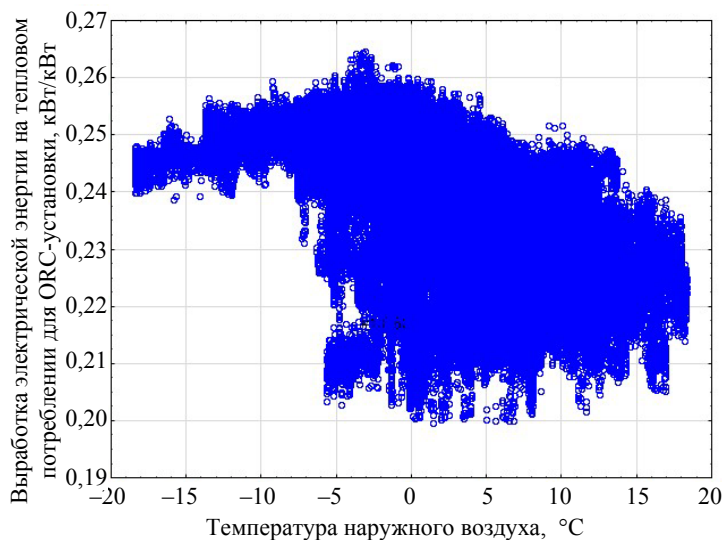


Рис. 6. Зависимость величины генерации электрической энергии на тепловом потреблении от температуры наружного воздуха

Fig. 6. Dependence of the amount of electrical energy generation based on heat consumption on outside air temperature

Из представленных данных, следует, что ОРС-установка в отопительный период эксплуатировалась в широком диапазоне генерации электрической мощности (от 17 до 87 % от номинальной электрической мощности). Выработка электрической энергии на тепловом потреблении при этом изменялась в диапазоне от 0,20 до 0,026 МВт/МВт.

ВЫВОДЫ

1. При оптимизации режимов эксплуатации мини-ТЭЦ на местных видах топлива, работающих параллельно с ОЭС, имеющей значительный профицит электрогенерирующих мощностей, следует разделять варианты для существующих станций и для вновь строящихся. В первом случае, ввиду того что мощность оборудования известна, целесообразно рассматривать два крайних варианта, т. е. работу теплофикационного блока по электрическому или тепловому графику нагрузки, когда для выдерживания суточного трафика потребления надо предусматривать аккумуляцию соответственно тепловой или электрической энергии. При новом строительстве оптимизируемым параметром выступает мощность генерирующего оборудования, поэтому целесообразно предпочтение отдать варианту с максимальным числом часов использования номинальной мощности.

2. Для повышения экономической привлекательности рассмотрены варианты развития структуры мини-ТЭЦ на МВТ с переходом на полигене-

рациональные технологии и адаптацией к сформировавшимся условиям работы ОЭС Беларуси. Представлены результаты анализа коммерчески доступных технологий накопления избыточной электрической энергии. Установлено, что в соответствии с текущими и прогнозируемыми (до 2030 г.) стоимостными и эксплуатационными показателями для адаптации мини-ТЭЦ к работе в ОЭС в условиях профицита электроэнергетических мощностей наибольший интерес представляет система аккумулирования электрической энергии с использованием водорода в качестве промежуточного энергоносителя. Для утилизации избыточной в часы суточных провалов потребления электрической энергии от мини-ТЭЦ с теплофикационной ОРС-установкой предложена конфигурация структурной схемы с использованием модуля щелочного электролиза для производства водорода.

3. Осуществлен анализ функционирования ОРС-установки Turboden 14 СНР мини-ТЭЦ на местных видах топлива по ул. Павловского, 66, входящей в состав РТС-6 ГП «Минсккоммунтеплосеть». Выявлено, что на сегодняшний день установка работает в широком диапазоне изменения нагрузки (от 17 до 87 % от номинальной электрической мощности), при этом выработка электрической энергии на тепловом потреблении изменялась в диапазоне от 0,20 до 0,026 МВт/МВт. В связи с тем, что исследуемая ОРС-установка является составляющей энергоисточника с высокой установленной пиковой тепловой мощностью, в текущем состоянии не прослеживается прямая корреляция между температурой наружного воздуха и мощностью генерации ОРС-установки. Данное обстоятельство указывает на необходимость продолжения исследования трендов тепловых нагрузок для построения функциональных моделей для кратко- и среднесрочного прогнозирования тепловой нагрузки от времени суток и средне-часовой температуры наружного воздуха.

Исследования выполнены в Белорусском национальном техническом университете при поддержке БФФИ (проект № T22УЗБ-052 от 04.05.2022).

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович. Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>.
2. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 6. С. 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>.
3. Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, No. 1. Р. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>.
4. Безлепкин, В. П. Регулировочный диапазон тепловых электростанций / В. П. Безлепкин. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1980. 168 с.

5. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 2 / В. Н. Романюк [и др.] Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 2. С. 141–157. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-141-157>.
 6. Об утверждении концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084 // Pravo.by. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084>.
 7. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
 8. Rong, A. Role of Polygeneration in Sustainable Energy System Development Challenges and Opportunities from Optimization Viewpoints / A. Rong, R. Lahdelma // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Т. 53. P. 363–372. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.060>.
 9. Volkova, A. Heat Storage Combined with Biomass CHP under the National Support Policy. A Case Study of Estonia / A. Volkova, E. Latosov, A. Siirde // Rigas Tehniskas Universitates Zinatiskie Raksti. 2020. Т. 24. №. 1. P. 171–184.
 10. Salinity gradient energy is not a competitive source of renewable energy / S. Lin [et al.] // Joule. 2024. Vol. 8, Iss. 2. P. 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.015>
 11. 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment [Electronic Resource]: Technical Report Publication No. PNNL-33283 August 2022 / V. Viswanathan [et al.]. Mode of access: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf>.
 12. Hydrogen or Batteries for Grid Storage? A Net Energy Analysis / M. A. Pellow [et al.] // Energy & Environmental Science. 2015. Vol. 8. №. 7. C. 1938–1952. <https://doi.org/10.1039/C4EE04041D>.
 13. Patonia, A. Hydrogen Storage for a Net-Zero Carbon Future [Electronic Resource]: OIES Paper: ET No. 23. / A. Patonia, R. Poudineh. 2023. Mode of access: <https://www.econstor.eu/handle/10419/280114>.
 14. Седнин, В. А. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 2: Водород в интегрированной энергосистеме / В. А. Седнин, А. А. Абразовский // Энергоэффективность. 2020. № 11. С. 16–22.
 15. Место водорода в современных энерготехнологических метасистемах. Ч. 3: Водород в качестве топлива для энергетических систем / В. А. Седнин [и др.] // Энергоэффективность. 2021. № 5. С. 16–21.
 16. Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal [Electronic Resource]. 2020. Mode of access: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
 17. Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments / M. Chatenet [et al.] // Chemical Society Reviews. 2022. Vol. 51, № 11. P. 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
 18. Powerto-Gas: Technology and Business Models / M. Lehner [et al]. SpringerBriefs in Energy, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03995-4>.
- Поступила 14.02.2024 Подписана в печать 23.04.2024 Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1. State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian).
2. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2. Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Bela-

- rus. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (6), 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518> (in Russian).
3. Mikhalevic A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking Into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian).
 4. Bezlepkin V. P. (1980) *Regulating Range of Thermal Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 168 (in Russian).
 5. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. V., Bubyr T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (2), 41–157. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-41-157> (in Russian).
 6. *On Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No. 1084*. Pravo.by. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084> (in Russian).
 7. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538> (in Russian).
 8. Rong A., Lahdelma R. (2016) Role of Polygeneration in Sustainable Energy System Development Challenges and Opportunities from Optimization Viewpoints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 363–372. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.060>.
 9. Volkova A., Latosov E., Siirde A. (2020) Heat Storage Combined with Biomass CHP under the National Support Policy. a Case Study of Estonia. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 2020, 24 (1), 171–184.
 10. Lin S., Wang Z., Wang L., Elimelech M. (2024) Salinity Gradient Energy is Not a Competitive Source of Renewable Energy. *Joule*, 8 (2), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.015>.
 11. Viswanathan V., Mongird K., Franks R., Li X., Sprenkle V. 2022 *Grid Energy Storage Technology cost and Performance Assessment*. Technical Report Publication No. PNNL-33283 August 2022. Available at: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf>.
 12. Pellow M. A., Emmott C. J. M., Barnhart C. J., Benson S. M. (2015) Hydrogen or Batteries for Grid Storage? A Net Energy Analysis. *Energy & Environmental Science*, 8 (7), 1938–1952. <https://doi.org/10.1039/C4EE04041D>.
 13. Patonia A., Poudineh R. (2023) *Hydrogen Storage for a Net-Zero Carbon Future*. OIES Paper: ET No 23. Available at: <https://www.econstor.eu/handle/10419/280114>.
 14. Sednin, V. A., Abrazovsky A. A. (2020) The Place of Hydrogen in Modern Energy Technology Metasystems. Part 2. Hydrogen in an Integrated Energy System. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (11), 16–22 (in Russian).
 15. Sednin V. A., Abrazovskii A. A., Kuz'mich K. A., Ivanchikov E. O. (2021) The Role of Hydrogen in Modern Energy Technological Metasystems. Part 3. Hydrogen as a Fuel for Energy Systems. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (5), 16–21 (in Russian).
 16. *Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal* (2020). Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
 17. Chatenet M., Pollet B. G., Dekel D. R., Dionigi F., Deseure J., Millet P. (2022) Water Electrolysis: From Textbook Knowledge to the Latest Scientific Strategies and Industrial Developments. *Chemical Society Reviews*, 51 (11), 4583–4762. <https://doi.org/10.1039/D0CS01079K>.
 18. Lehner M., Tichler R., Steinmüller H., Koppe M. (2014) *Power-to-Gas: Technology and Business Models*. SpringerBriefs in Energy. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03995-4>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>

УДК 66.042.945: 620.197.5

Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь

Н. В. Струцкий¹⁾, В. Н. Романюк²⁾

¹⁾ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Стальные подземные газопроводы занимают значительную долю в общей протяженности распределительных газопроводов, в связи с чем поддержание их в надлежащем состоянии представляет собой постоянную и весьма актуальную задачу. В силу своего глобального характера основным влияющим фактором, воздействующим на техническое состояние любых стальных подземных трубопроводов, включая газопроводы, является коррозия, в первую очередь почвенная. Для защиты от нее на трубопроводных сетях наряду с изоляционными покрытиями применяется электрохимическая защита (ЭХЗ), то есть, следуя определению СТО 17330282.27.060.001–2008, защита металла от коррозии в электролитической среде, осуществляемая установлением на нем защитного потенциала или устранением анодного смещения потенциала от стационарного. В газораспределительной отрасли страны методы и средства электрохимической защиты применяются с начала газификации и строительства первых газопроводов. Во всех газоснабжающих организациях Государственного производственного объединения по топливу и газификации (ГПО) «Белтопгаз» (шести областных и г. Минска), осуществляющих эксплуатацию объектов газораспределения, функционируют специализированные службы по защите от коррозии. Они обеспечивают обслуживание наличных средств ЭХЗ, проведение электрофизических измерений на газопроводах и коррозионных исследований грунтов, располагают аттестованными лабораториями. Настоящая статья посвящена вопросам анализа отечественного опыта организации электрохимической защиты стальных подземных распределительных газопроводов, поиска перспективных направлений ее совершенствования и повышения эффективности за счет проведения единой отраслевой технической политики, автоматизации и телемеханизации средств ЭХЗ в общем контексте цифровой трансформации, оптимизации сроков и объемов технического обслуживания.

Ключевые слова: стальной подземный газопровод, коррозия, катодная поляризация, электрохимическая защита, эксплуатация, автоматизация технологических процессов, телемеханизация

Для цитирования: Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>

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

Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus

N. V. Strutsky¹⁾, V. N. Romaniuk²⁾

¹⁾Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

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

Abstract. Steel underground gas pipelines occupy a significant share of the total length of gas distribution pipelines, and therefore their maintenance in proper condition is a constant and very urgent task. Due to its global nature, the main influencing factor affecting the technical condition of any steel underground pipelines, including gas pipelines, is corrosion, primarily soil corrosion. To protect against it on pipeline networks, along with insulating coatings, electrochemical protection (ECP) is applied, that is, following the definition of STO [Standard of Organization] 17330282.27.060.001–2008, protection of metal against corrosion in an electrolytic environment, carried out by establishing a protective potential on it or eliminating the anodic potential shift from the stationary potential. In the gas distribution industry of the country, methods and means of electrochemical protection have been applied since the beginning of gasification and the construction of the first gas pipelines. All gas supplying organizations of the State Production Association for Fuel and Gasification “Beltopgaz” (six regional and Minsk city), which operate gas distribution facilities, have specialized corrosion protection services. These services provide maintenance of available ECP equipment, conduct electrical measurements on gas pipelines and corrosion studies of soils, and have certified laboratories. This paper is devoted to the analysis of domestic experience in organizing electrochemical protection of steel underground gas distribution pipelines, searching for promising directions for its improvement and increasing efficiency through the implementation of a unified industry technical policy, automation and telemechanization of ECP equipment in the general context of digital transformation, optimization of the timing and volume of maintenance.

Keywords: steel underground gas pipeline, corrosion, cathodic polarization, electrochemical protection, operation, automation of technological processes, telemechanization

For citation: Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267> (in Russian)

Введение

Подземный стальной трубопровод эксплуатируется в почве (грунте), то есть чрезвычайно сложной и динамически изменчивой вмещающей среде [1], оказывающей на металл сооружения целый комплекс воздействий, в том числе коррозионных. Коррозия представляет опасность повреждения и разгерметизации трубопроводов и, как следствие, образования утечек транспортируемой среды, что создает риски возникновения различных нештатных и аварийных ситуаций. Наружная коррозия является основной причиной отказов для большинства стальных подземных коммуникаций, на тепловых сетях, например, доля коррозионных отказов доходит до 70–90 % от общего количества [2, 3].

Так как коррозия стали представляет собой электрохимический процесс, его затормаживание может быть достигнуто исключительно противо-

положно направленным внешним электрическим (или электромагнитным) воздействием, формируемым электрохимической защитой (ЭХЗ) [4, 5]. Из всех распределительных (коммунальных) трубопроводных систем наиболее широкое применение средства ЭХЗ нашли для защиты стальных подземных трубопроводов газораспределительной системы.

Основная часть

Межгосударственным стандартом ГОСТ 9.602–2016 [6] средства ЭХЗ предусматриваются для металлических сооружений в высоко- и среднеагрессивных грунтах (табл. 1), в зонах опасного действия блуждающих постоянных и переменных токов, на участках, подверженных биокоррозии. Коррозионная агрессивность грунта по отношению к стали оценивается по удельному электрическому сопротивлению, измеренному в полевых или лабораторных условиях, и средней плотности катодного тока при смещении потенциала на 100 мВ отрицательней стационарного потенциала стали в грунте. Если при определении удельного электрического сопротивления грунта установлена его высокая коррозионная агрессивность, другой показатель не определяют. При удельном электрическом сопротивлении грунта, равном или превышающем 130 Ом·м, коррозионную агрессивность грунта считают низкой и по средней плотности катодного тока не оценивают [6]. Критерии коррозионной агрессивности грунта при необходимости можно также представить в виде его удельной электропроводности или удельного катодного поляризационного сопротивления (удельной катодной поляризации).

Таблица 1

Критерии коррозионной агрессивности грунта

Criteria for soil corrosiveness

Коррозионная агрессивность грунта	Удельное электрическое сопротивление грунта ρ_r , Ом·м	Удельная электропроводность грунта G_r , См/м	Средняя плотность катодного тока $j_{\text{пол}}$, А/м ²	Удельное катодное поляризационное сопротивление R_k , Ом·м ²
Низкая	Свыше 50	До 0,02	До 0,05	Свыше 2
Средняя	Свыше 20 до 50	Свыше 0,02 до 0,05	Свыше 0,05 до 0,2	Свыше 0,5 до 2
Высокая	До 20	Свыше 0,05	Свыше 0,20	До 0,5

Всего насчитывается четыре вида электрохимической (активной) защиты: катодная, протекторная, электродренажная и анодная. Наиболее распространенным является метод катодной поляризации, который заключается в наложении на металлическое сооружение отрицательного электрического (защитного) потенциала. Таким образом, трубопровод на протяжении защищаемого участка как бы обращается в катод [7] и скорость коррозионного процесса становится минимально возможной для данных условий.

По состоянию на 01.01.2024, общая протяженность наружных распределительных газопроводов, находящихся на балансе газоснабжающих организаций

ГПО «Белтопгаз», составляет около 67,5 тыс. км. Протяженность стальных газопроводов 30,0 тыс. км, 28,2 тыс. км из них подземные (рис. 1).

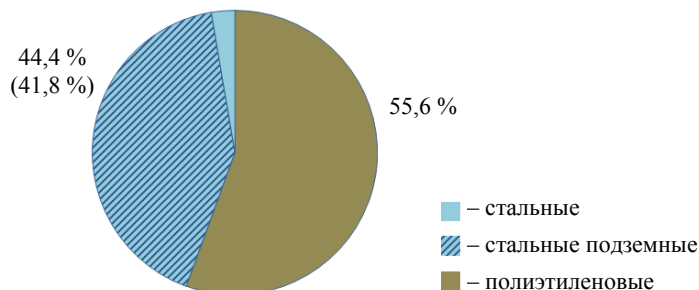


Рис. 1. Место стальных подземных газопроводов в структуре газораспределительной сети республики

Fig. 1. Place of steel underground gas pipelines in the structure of the gas distribution network of the Republic

Активной защитой обеспечено 26,7 из 28,2 тыс. км стальных подземных распределительных газопроводов, или 94,7 %. Эксплуатируемый парк установок ЭХЗ на 96,2 % состоит из станций катодной защиты (СКЗ), также в работе находится небольшое количество протекторных (для защиты подземных резервуаров сжиженного углеводородного газа) и электродренажных установок (для защиты от блуждающих токов). На объектах газораспределительной системы Республики Беларусь применяются, как правило, автоматические катодные станции (рис. 2), имеющие специальные блоки, обеспечивающие автоматическое регулирование выходных защитных параметров. Автоматическое регулирование позволяет поддерживать величину защитного тока и разность потенциалов между подземным сооружением и землей в заданных пределах. Катодные станции и электродренажи, как правило, обеспечены средствами телемеханики (ТМ).

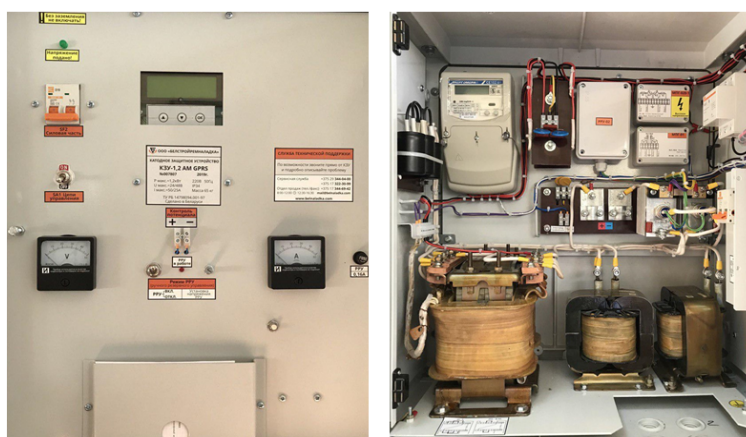


Рис. 2. Катодное защитное устройство КЗУ-1.2 AM GPRS

Fig. 2. Cathodic protective device KZU-1.2 AM GPRS

Для эффективного использования вырабатываемого установками ЭХЗ электрического тока на выходах газопроводов из земли устанавливаются электроизолирующие соединения (ЭИС) – фланцы и муфты. ЭИС предотвращают попадание защитного тока на внутренние газопроводы зданий, а тока от неисправной электрической части установленного в зданиях газопроводов – на наружные газопроводы.

Количественные данные о средствах электрохимической защиты, установленных на объектах газораспределительной системы, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Средства электрохимической защиты газопроводов

Means of electrochemical protection of gas pipelines

Установки ЭХЗ						Протекторные установки	Электроизолирующие соединения
Катодные станции			Электродренажи				
всего	с ТМ	резерв	всего	с ТМ	резерв	всего	всего
5287	4808	392	70	70	6	139	291314

Как видно из таблицы, в резерве находится 398 катодных станций и дренажей, что составляет 9,4 % от общего парка. Доля телемеханизированных установок достигает 91,1 %, что значительно превышает обычный для газовых хозяйств стран ЕАЭС уровень (10–15 %).

Ведомственной координационной группой (ВКГ) по защите от коррозии ГПО «Белтопгаз» (коллегиальным совещательным органом, объединяющим руководителей и специалистов профильных служб газоснабжающих организаций республики) в начале 2000-х гг. была выработана наиболее рациональная стратегия внедрения телемеханизации средств ЭХЗ – установка уже оснащенных системой телемеханики в заводских условиях современных катодных преобразователей, в первую очередь:

- взамен морально и физически устаревших;
- в местах, значительно удаленных от баз обслуживания;
- при укрупнении зон защиты, где работа станций осуществлялась в режимах, пониженных относительно номинального, с низким КПД (из-за избыточного запаса мощности, принятого на стадии проектирования);
- при новом строительстве объектов газораспределительной системы.

Принятый подход, наряду с известными преимуществами дистанционного управления и контроля установок ЭХЗ, одновременно позволил получить максимальный эффект от снижения объемов работ по их эксплуатации.

Так, в соответствии с [8], техническое обслуживание установок ЭХЗ должно проводиться не реже:

- одного раза в месяц – для СКЗ, расположенных в сельской местности;
- двух раз в месяц – для СКЗ, расположенных в городской местности;
- четырех раз в месяц – для установок дренажной защиты.

Периодичность проведения технического обслуживания установок ЭХЗ, оснащенных системами телемеханики, назначается эксплуатирующей организацией самостоятельно [8]. В системе ГПО «Белтопгаз» установлена единая периодичность обслуживания для всех телемеханизированных установок ЭХЗ – не реже двух раз в год. Таким образом, плотность технического обслуживания для СКЗ на селе может быть снижена в шесть раз, в городе – в 12 раз, для электродренажей – в 24 раза, без ухудшения качества обслуживания и уровня технического состояния средств ЭХЗ.

Отталкиваясь от уровня телемеханизации, зафиксированного по состоянию на 01.01.2024, и распределения СКЗ между городской и сельской местностями, совокупное снижение объемов технического обслуживания установок ЭХЗ за счет их телемеханизации в масштабах отрасли в текущем году составит 82,5 % (рис. 3), или 91,7 тыс. работ в абсолютных цифрах.

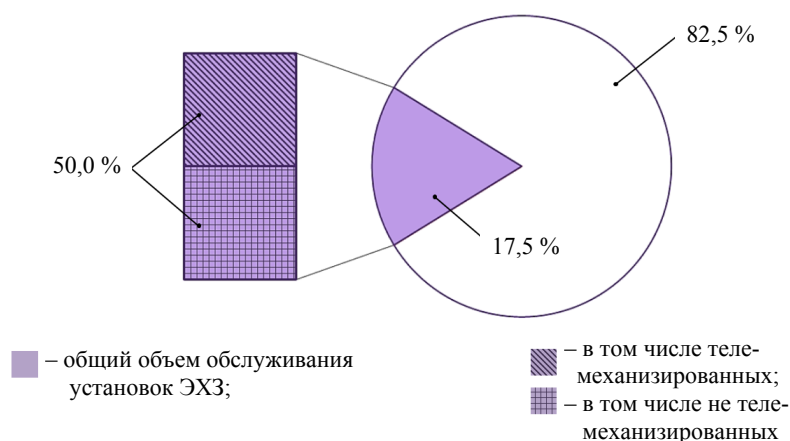


Рис. 3. Эффект телемеханизации на объемы обслуживания установок ЭХЗ

Fig. 3. Effect of telemechanization on the volume of maintenance of ECP installations

То есть вместо 111,2 тыс. работ по техническому обслуживанию установок ЭХЗ необходимо будет выполнить всего 19,5 тыс. работ. При этом, как видно из рис. 3, несмотря на несопоставимые количества телемеханизированных и нетелемеханизированных установок (4878 ед. и 479 ед. соответственно), их объемы обслуживания будут одинаковыми.

Основным контролируемым параметром электрохимической защиты стальных трубопроводов является защитный потенциал, определяемый в контрольных (опорных) точках вдоль трассы коммуникации не реже чем два раза в год, с интервалом между проверками не менее четырех месяцев [8]. Именно по данному параметру оценивается эффективность работы ЭХЗ и принимается решение (при необходимости) об изменении режима работы защитных установок.

Соответственно одним из перспективных решений, направленных на совершенствование электрохимической защиты (в особенности в условиях протяженных трубопроводных систем), является использование интел-

лектуальных контрольно-измерительных пунктов (КИП), позволяющих осуществлять дистанционный контроль защитного потенциала по трассе коммуникации. На рис. 4 изображен комплекс мониторинга защитного потенциала металлических трубопроводов КМЗП, который может использоваться в составе подобных КИП. Комплекс предоставляет возможность автоматического измерения защитного потенциала в соответствии с гостированными методиками, обеспечивая сохранение и передачу накопленной информации в сети Narrow Band Internet of Things (NBloT) [9].



Рис. 4. Комплекс мониторинга защитного потенциала КМЗП [9]

Fig. 4. Complex for monitoring the protective potential of KMZP [9]

В настоящее время интеллектуальные КИП активно внедряются в системе ГПО «Белтопгаз». Так, Программа комплексной модернизации производств газовой сферы на 2021–2025 гг. среди прочих мероприятий предполагает установку на распределительных газопроводах 2,2 тыс. подобных устройств, что должно повысить оперативность получения информации о защищенности газопроводов и ее достоверность, одновременно снизив трудозатраты на проведение контроля и изменив его режим с периодического на постоянный.

Вместе с тем, учитывая порядок материальных затрат на создание системы дистанционного контроля (мониторинга) электрохимической защиты стальных подземных распределительных газопроводов и сопутствующей инфраструктуры связи, целесообразно не ограничиваться одним контролируемым параметром, а двигаться в направлении многопараметрического контроля.

Так, можно обратиться к опыту газотранспортной отрасли, где, например, нормативным документом [10] в перечень контролируемых при коррозионном мониторинге магистральных газопроводов параметров включена скорость коррозии. Действительно, данный параметр можно рассматривать в качестве прямого критерия оценки коррозионной опасности, при этом для его измерения существует разнообразный набор технических

средств – датчиков и индикаторов. На рис. 5 показано одно из таких устройств – блок пластин-индикаторов БПИ-2-2. Оценка скорости коррозии в данном случае основана на измерении изменения электрического сопротивления при разрушении пластин-индикаторов различной фиксированной толщины [11].

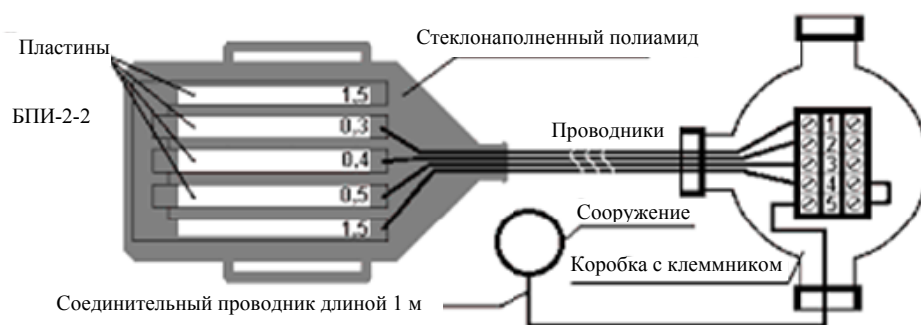


Рис. 5. Эскиз блока-индикатора коррозии БПИ-2-2 [11]

Fig. 5. Sketch of BPI-2-2 corrosion indicator unit [11]

В настоящее время уже накоплен некоторый опыт применения подобных устройств на объектах газораспределения. На данном этапе представляется, что в первую очередь контроль скорости коррозии актуален для оперативной фиксации ухудшения коррозионной ситуации на участках стальных распределительных газопроводов, не обеспеченных активной защитой. При этом также следует учитывать сложность сопоставления таких разномасштабных физических систем, как «датчик–грунт» и «трубопровод–грунт», в связи с чем для корректной интерпретации показаний датчиков (индикаторов) скорости коррозии, по всей видимости, необходим подбор соответствующего критерия подобия [5]. Вообще, вопрос расширения дистанционного перечня контролируемых параметров электрохимической защиты и коррозионной агрессивности среды весьма актуален и требует тщательной проработки.

Организация электрохимической защиты распределительных газопроводов в масштабах республики, тем более в условиях ускоренного внедрения современных технических средств, обладающих качественно новыми, расширенными функциональными возможностями, невозможна без цифровой поддержки данной сферы. Стратегия цифровизации газораспределительной отрасли предполагает отказ от «лоскутной» автоматизации отдельных технологических и бизнес-процессов в пользу создания единой отраслевой автоматизированной системы, основу которой составляют три взаимосвязанных мультипрограммных комплекса (МПК):

- «Мириада» (набор мобильных приложений для цифрового сопровождения непосредственно производства работ);
- «Панорама» (центральный комплекс, включающий в себя набор программных модулей (ПМ) под основные виды производственной деятельно-

сти, а также общую интерактивную электронную карту газораспределительной системы);

– «Вершина» (аналитическая надстройка верхнего уровня) [12].

Соответственно во всех профильных службах газоснабжающих организаций и аппарате управления ГПО «Белтопгаз» внедрен единый софт – программный модуль «Электрохимическая защита газопроводов», входящий в состав МПК «Панорама» и связанный с соответствующими разделами МПК «Мириада» и «Вершина» (рис. 6).

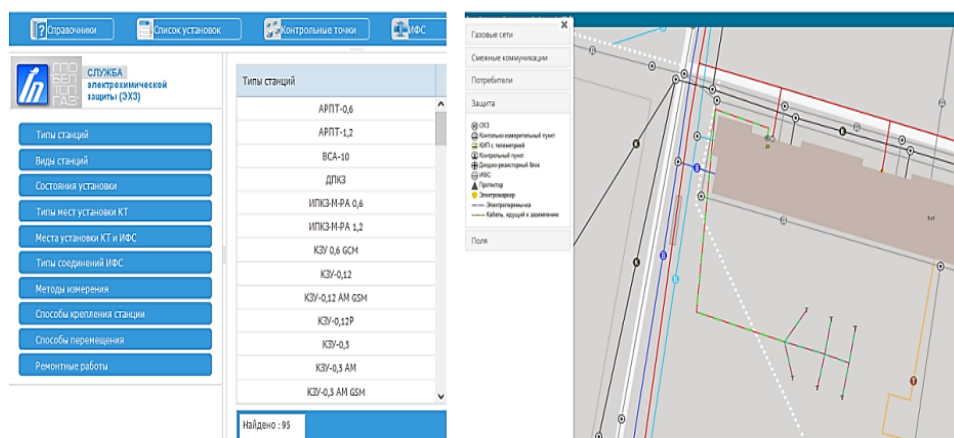


Рис. 6. Примеры рабочих окон ПМ «Электрохимическая защита газопроводов» и электронной карты МПК «Панорама»

Fig. 6. Examples of working windows of “Electrochemical protection of gas pipelines” software module and electronic map of “Panorama” software package

ПМ «Электрохимическая защита газопроводов» включает в себя функции базы данных, планировщика графиков и заданий, журнала событий, содержит каталогизированные справочники оборудования, работ и затрат, обеспечивает представление информации и ее вывод в соответствующем установленном отраслевым формам эксплуатационной документации виде. Параллельно развивается одноименный раздел МПК «Вершина», в рамках которого планируется реализация алгоритмов комплексного анализа уровня защищенности газопроводов, параметров активной защиты и технического состояния средств ЭХЗ.

ВЫВОДЫ

1. В работе освещен практический опыт организации электрохимической защиты стальных подземных распределительных газопроводов в газоснабжающих организациях ГПО «Белтопгаз». Дана характеристика общей структуры существующей системы электрохимической защиты, состава применяемых средств ЭХЗ, организации технического обслуживания, уровня автоматизации технологических процессов.

2. Проанализирован эффект от внедрения телемеханизации установок ЭХЗ на их техническое обслуживание. К настоящему моменту за счет телемеханизации 94,7 % установок объем обслуживания снижен на 82,5 %, полная телемеханизация установок ЭХЗ позволит сократить оставшийся объем сервисных работ еще в два раза.

3. Показаны преимущества дистанционного контроля защитного электрического потенциала по трассе газопровода, а также целесообразность расширения перечня дистанционно контролируемых параметров электрохимической защиты и коррозионной агрессивности среды. Предлагается использовать параметр скорости коррозии для дополнительного контроля коррозионной ситуации на участках стальных распределительных газопроводов, не обеспеченных активной защитой. Однако для корректной интерпретации измеренных значений скорости коррозии необходим критерий подобия физических систем «датчик–грунт» и «трубопровод–грунт».

4. Показано, что электрохимическая защита распределительных газопроводов в газовой отрасли Республики Беларусь полностью удовлетворяет нормативным требованиям, обеспечивая коррозионную безопасность защищаемых сооружений. Достигнутый уровень технического развития производства создает предпосылки для построения интеллектуальной, удаленно управляемой системы электрохимической защиты нового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розанов, Б. Г. Живой покров Земли / Б. Г. Розанов. М.: Педагогика, 1989. 128 с.
2. Майоров, В. В. Повышение ресурса эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов ОАО «Белтрансгаз» / В.В. Майоров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 5. С. 76–81.
3. Пантелей, Н. В. Оценка состояния и анализ повреждаемости трубопроводов тепловых сетей / Н. В. Пантелей // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. № 2. С. 179–188. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-179-188.
4. Романюк, В. Н. Место изоляционных покрытий в обеспечении надежности стальных подземных газопроводов / В. Н. Романюк, Н.В. Струцкий // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 3 (35). С. 11–20. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-35-3-11-20>.
5. Притула, В. В. Современные проблемы защиты от подземной коррозии / В. В. Притула // Коррозия территории «Нефтегаз». 2012. № 3 (23). С. 18–21.
6. ГОСТ 9.602–2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016. 87 с.
7. Федорченко, В. И. Коррозия металлов / В. И. Федорченко. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. 127 с.
8. Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Минск: ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», 2023. 185 с.
9. Комплекс мониторинга защитного потенциала металлических трубопроводов КМЗП [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belgastechніка.by/catalog/pribory-i-ustroystva/ustroystva-kontrolya-obektov-gazovogo-khozyaystva/kompleks-monitoringa-zashchitno-go-potentsiala-metallicheskikh-truboprovodov-kmzp/> (дата доступа: 02.04.2024).

10. СТО Газпром 9.4-023–2013: Мониторинг и прогноз коррозионного состояния объектов и оборудования. Система сбора, обработки и анализа данных. М., 2014. 68 с.
11. РЭ 42 1549-001-51996521–01. Блок пластин-индикаторов скорости коррозии БПИ-2. Паспорт и руководство по эксплуатации. Ставрополь, 2018. 13 с.
12. Струцкий, Н. В. Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>.

Поступила 15.02.2024 Подписана в печать 24.04.2024 Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. Rozanov B. G. (1989) *Living Cover of the Earth*. Moscow, Pedagogika Publ. 128 (in Russian).
2. Mayorov V. (2013) Improvement of Operational Reliability Resource for JSC “Beltransgaz” Main Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* (5), 76–81.
3. Panteley N. V. (2018) Assessment of the State and Analysis of Damageability of Heating Grids Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (2) 179–188. DOI: 10.21122/1029-7448-2018-61-2-179-188 (in Russian).
4. Romaniuk V. N., Strutsky N. V. (2023) The Place of Insulating Coatings in Ensuring the Reliability of Steel Underground Gas Pipelines. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye Nauki = Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*, (3), 11–20. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2023-35-3-11-20> (in Russian).
5. Pritula V. V. (2012) Modern Problems of Protection Against Underground Corrosion. *Korroziya Territorii “Neftegaz”* [Corrosion of the Neftegaz Territory], (3), 18–21 (in Russian).
6. State Standard 9.602–2016. *Unified System of Protection Against Corrosion and Aging. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
7. Fedorchenko V. I. (2009) *Metal Corrosion*. Orenburg, Public Educational Institution Orenburg State University. 127 (in Russian).
8. *Rules for Ensuring Industrial Safety in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus*. Minsk, State Institute for Advanced Training and Retraining of Personnel in the Field of Gas Supply “CAZ-INSTITUTE”, 2023. 185 (in Russian).
9. *Complex for Monitoring the Protective Potential of Metal Pipelines KMZP*. Available at: <https://belgastehnika.by/catalog/pribory-i-ustroystva/ustroystva-kontrolya-obektov-gazovogo-khozyaystva/kompleks-monitoringa-zashchitnogo-potentsiala-metallicheskich-truboprovodov-kmzp/> (accessed 02 April 2024) (in Russian).
10. СТО [Company Standard] Gazprom 9.4-023–2013. *Monitoring and Forecasting the Corrosion State of Objects and Equipment. Data Collection, Processing and Analysis System*. Moscow, 2014. 68 (in Russian).
11. RE [Instruction Handbook] 42 1549-001-51996521–01. *Block of Indicator Plates for BPI-2 Corrosion Rate. Manufacturer's Certificate and Instruction Manual*. Stavropol, 2018. 13 (in Russian).
12. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (1), 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66> (in Russian).

Received: 15 February 2024

Accepted: 24 April 2024

Published online: 31 May 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>

УДК 628.112

Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами

В. В. Верременюк¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, В. И. Крицкая¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Для хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и крупных промышленных предприятий широко используются групповые скважинные водозаборы, в которых для транспортировки воды от скважин к сборным узлам проектируют сборные водоводы. Выбор оптимальной схемы размещения сборных водоводов определяется после технико-экономических и гидравлических расчетов всего водозабора с учетом характеристик скважин и установленных в них глубинных насосов, параметров всех напорных трубопроводов. Гидравлические расчеты базируются на разработанной математической модели водозабора, которая должна обеспечивать получение достоверных данных о подачах насосов, понижениях уровней воды в скважинах, расходах и напорах в системе сборных водоводов при любом количестве и сочетании работающих скважин. Это позволяет осуществить правильный подбор насосов и снизить энергозатраты на подъем и транспортировку воды. Статья посвящена разработке методики гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами, которые применяются на водозаборах большой производительности в системах водоснабжения с высокой степенью обеспеченности подачи воды. Сложность расчета таких водозаборов заключается в том, что здесь каждая скважина одновременно подает воду в две нитки сборных водоводов, что отличает эту схему подачи воды в сборный узел от других типовых схем. В статье представлены расчетные схемы и алгоритм гидравлического расчета группового водозабора, который рассмотрен как система с нефиксированными подачами воды. Алгоритм расчета базируется на учете баланса напоров в водоводах с включенными в них насосами и баланса расходов в узлах по всем участкам сборных водоводов. Разработана программа на ЭВМ, и представлены результаты численного расчета водозабора подземных вод, оборудованного парными сборными водоводами и состоящего из 15 скважин.

Ключевые слова: водозабор подземных вод, водоснабжение, парные сборные водоводы, алгоритм расчета, удельный дебит скважин, баланс напоров

Для цитирования: Верременюк, В. В. Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами / В. В. Верременюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67/2,
220065, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@mail.ru

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
67/2, Nezavisimosty Ave.,
220065, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
ivashechkin_vlad@mail.ru

Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines

V. V. Veremenyuk¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, V. I. Krytskaya¹⁾

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

Abstract. For domestic and drinking water supply for cities and large industrial enterprises, group well water intakes are widely used, in which prefabricated water pipelines are designed to transport water from wells to collection points. The choice of the optimal layout of prefabricated water pipelines is determined after technical, economic and hydraulic calculations of the entire water intake, taking into account the characteristics of wells and deep-well pumps installed in them, and the parameters of all pressure pipelines. Hydraulic calculations are based on a developed mathematical model of water intake, which should provide reliable data on pump flows, drops in water levels in wells, flow rates and pressures in the collecting water pipeline system for any number and combination of operating wells. This allows for the correct selection of pumps and reduces energy costs for lifting and transporting water. The article is devoted to the development of a methodology for hydraulic calculation of group well water intakes with paired collection water pipelines, which are used at high-capacity water intakes in water supply systems with a high degree of water supply security. The difficulty in calculating such water intakes lies in the fact that here each well simultaneously supplies water to two strings of collecting water pipelines, which distinguishes this scheme for supplying water to a collecting unit from other standard schemes. The article presents calculation schemes and an algorithm for hydraulic calculation of group water intake, which is considered as a system with non-fixed water supplies. The calculation algorithm is based on taking into account the balance of pressures in water pipelines with pumps included in them and the balance of flow rates in nodes for all sections of prefabricated water pipelines. A computer program has been developed and the results of a numerical calculation of groundwater intake, equipped with paired prefabricated water pipelines and consisting of 15 wells, are presented.

Keywords: groundwater intake, water supply, paired prefabricated water pipelines, calculation algorithm, specific flow rate of wells, pressure balance

For citation: Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2024) Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (3), 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280> (in Russian)

Введение

Групповые скважинные водозаборы имеют в своем составе сборные водоводы, которые служат для транспортировки воды от скважин к сооружениям очистки и подготовки воды (сборным узлам). Типовые схемы сборных водоводов в плане могут быть линейными (тупиковыми), кольцевыми и парными [1–2]. Выбор той или иной схемы сборных водоводов при проектировании водозабора должен производиться на основе результатов гидравлических и технико-экономических расчетов и зависит от расположения скважин и сборных узлов (СУ), геологических и гидрогеологических условий места размещения водозабора, категории надежности подачи воды потребителю и ряда других факторов. На стадии разработки проекта должна производиться проверка работоспособности системы на основе комплексных расчетов водозабора подземных вод, который представляет собой единую гидравлическую систему, состоящую из взаимодействующих

между собой скважин с погружными насосами, работающими параллельно на сборные водоводы. В результате комплексных расчетов водозаборов получают значения подачи погружных насосов и понижений уровней воды в скважинах, расходов и потерь напора в сборных водоводах при различном количестве работающих скважин. Комплексные расчеты должны производиться на различные режимы и периоды эксплуатации водозаборов с учетом взаимовлияния скважин, кольматажа их фильтров и сработки запасов подземных вод. Однако часто происходит так, что введенные в действие сооружения в процессе эксплуатации работают в режиме, не соответствующем расчетному [3]. Это происходит в связи с тем, что фактические гидравлические характеристики скважин часто отличаются от проектных, а прогнозная сработка запасов подземных вод и интенсивность роста гидравлических сопротивлений фильтров скважин, линий подключения к сборным водоводам и в самих сборных водоводах не соответствуют расчетным значениям, полученным на стадии проектирования. Кроме этого, наблюдается износ погружных насосов в процессе эксплуатации, что приводит к снижению их напорно-расходных характеристик [4]. Поэтому выполнение комплексных расчетов необходимо не только на стадии проектирования водозаборов, но и по результатам обследования водозаборов в процессе эксплуатации, в том числе и после тампонажа старых и перебурирования вышедших из строя скважин. Расчеты должны содержать прогноз по снижению производительности водозабора во времени и рекомендации по повышению эффективности его работы [5–6]. Это необходимо для водозаборов с любыми плановыми схемами сборных водоводов.

Часто после расширения водозабора путем бурения новых скважин появляются новые участки сборных водоводов и перемычки между старыми и новыми участками. В этом случае схема сборных водоводов в плане изменяется и может трансформироваться из более простого вида в более сложный, например из линейной в кольцевую или в схему с парными водоводами. Часто схема сборных водоводов после реконструкции крупного скважинного водозабора становится очень сложной, комбинированной и представляет собой совокупность типовых и более сложных схем. Поэтому для создания математических моделей крупных водозаборов со сложными нетиповыми схемами сборных водоводов необходимо владеть алгоритмами расчета водозаборов с типовыми схемами. Это особенно актуально в связи с тем, что в настоящее время идет процесс перевода водоснабжения г. Минска на подземные воды и расширение действующих групповых скважинных водозаборов «Острова», «Вицковщина» и «Фелицианово» путем бурения около 100 новых скважин [7].

Методика комплексных расчетов групповых водозаборов с типовой линейной схемой соединения сборных водоводов освещена в литературе [1, 5, 6, 8]. В БНТУ разработаны алгоритмы и программы на ЭВМ водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов, получен опыт создания имитационных моделей крупных групповых скважинных водозаборов по результатам обследования [9–10].

Водозаборы с типовой схемой парных сборных водоводов являются сложными в части создания математических моделей по сравнению с другими типовыми схемами, так как здесь одна и та же скважина подсоединена двумя отдельными линиями к двум ниткам сборных водоводов, в то время как в линейных и кольцевых сборных водоводах каждая скважина подключена только к одному сборному водоводу. Это приводит к тому, что расход воды, подаваемой погружным насосом скважины, распределяется по двум парным сборным водоводам в неизвестных пропорциях, и это создает дополнительные трудности при разработке имитационной модели водозабора. В литературе отсутствуют методики расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами, что затрудняет создание их математических моделей и моделей водозаборов с более сложной конфигурацией сборных водоводов.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма и методики гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами.

Основная часть

Парные сборные водоводы с концевым и центральным расположением сборного узла (рис. 1) проектируют при большой производительности водозаборов и относительно коротких сборных водоводах [1, 2].

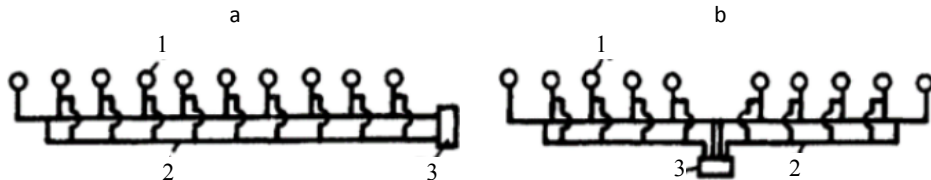


Рис. 1. Типовые схемы скважинных водозаборов с парными сборными водоводами:

a – с концевым расположением сборного узла;

b – с центральным расположением сборного узла;

1 – водозаборная скважина; 2 – сборные водоводы; 3 – сборный узел

Fig. 1. Typical diagrams of well water intakes with paired collection water pipelines:

a – with end location of prefabricated unit;

b – with central location of prefabricated unit;

1 – water well; 2 – prefabricated water pipelines; 3 – prefabricated unit

Наличие двух ниток сборных водоводов, идущих к сборному узлу, с которыми одновременно двумя линиями подключения соединена каждая скважина, повышает надежность системы водоснабжения, так как при выходе из строя одной нитки работает вторая.

Сразу же отметим, что при центральном расположении сборного узла (рис. 1b) правое и левое крылья водозабора работают независимо друг от друга и методика их расчета будет такой же, как и у водозабора с концевым расположением сборного узла (рис. 1a), поэтому ограничимся рассмотрением только этой схемы.

Расчетная схема водозабора с парными сборными водоводами и конечным расположением сборного узла представлена на рис. 2.

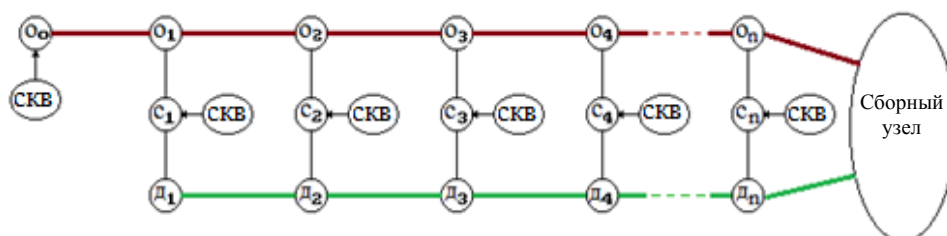


Рис. 2. Схема группового скважинного водозабора подземных вод с парными сборными водоводами и конечным расположением сборного узла, содержащего $n + 1$ скважину: скв – водозаборные скважины; $o_0, o_1, o_2, \dots, o_n$ – водопроводные колодцы на основной линии сборного водовода; d_1, d_2, \dots, d_n – то же на дополнительной линии сборного водовода; c_1, c_2, \dots, c_n – то же, к которым подключены скважины (первая скважина подключена к колодцу o_0)

Fig. 2. Scheme of group well groundwater intake with paired collection water pipeline and the end location of a collection unit containing $n + 1$ wells: скв – water intake wells; $o_0, o_1, o_2, \dots, o_n$ – water wells on the main collection water lines; d_1, d_2, \dots, d_n – the same on the additional line of the collection water pipeline; c_1, c_2, \dots, c_n – the same, to which the wells are connected (the first well is connected to the well o_0)

Для моделирования используем исходные данные двух типов: гидрогеологические и конструктивные (параметры сборных водоводов водозабора, соединительных труб, скважин и насосов). На данные первого типа проектировщик повлиять, как правило, не может, а используя алгоритмы моделирования и варьируя в разумных пределах данные второго типа, он способен решать различные оптимизационные задачи.

Предлагаемая в данной работе методика расчета парных водоводов с конечным расположением СУ базируется на разработанном ранее алгоритме расчета водозаборов сложной конфигурации с площадным размещением скважин [9].

Следуя этому алгоритму, мы должны использовать как положительные значения расходов по участкам водоводов, так и отрицательные. Поэтому оговорим следующие соглашения:

1) положительные значения расходов на участках $o_k - o_{k+1}$, $k = 0, 1, 2, \dots, n$, (а также на участках $d_k - d_{k+1}$, $k = 1, 2, \dots, n$) соответствуют движению воды от колодца o_k в сторону колодца o_{k+1} (соответственно от колодца d_k в сторону колодца d_{k+1}). Для отрицательных значений расходов на этих участках движение происходит в противоположных направлениях;

2) положительные значения расходов на участках $o_k - c_k$ (а также на участках $c_k - d_k$), $k = 1, 2, \dots, n$, соответствуют движению воды от колодца o_k в сторону колодца c_k (соответственно от колодца c_k в сторону колодца d_k). Для отрицательных значений расходов на этих участках движение происходит в противоположных направлениях.

Следуя [9], для схемы водозабора, представленной на рис. 2, мы имеем n простых колец.

Первые (считая слева направо) $n - 1$ колец содержат по 6 ВК (например, 1-е кольцо содержит колодцы $o_1, c_1, d_1, d_2, c_2, o_2$). Эти кольца далее будем называть начальными. Последнее n -е кольцо содержит 3 ВК (o_n, c_n, d_n) и СУ. Его будем называть конечным кольцом. Согласно [9], нам надо ввести в рассмотрение n неизвестных расходов: x_1, x_2, \dots, x_n , которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. У нас это будут x_i – расходы на участках $o_i - c_i$ (рис. 3).

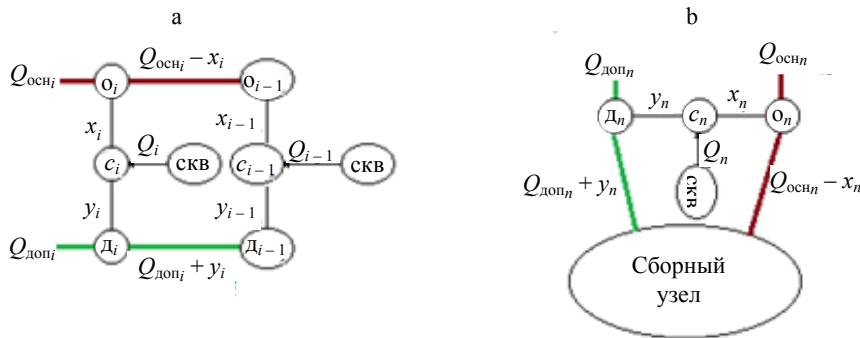


Рис. 3. Схемы для расчета колец парного сборного водозабора: а – начальное кольцо с номером i ; б – конечное кольцо

Fig. 3. Schemes for calculating rings of paired collection water intake: а – initial ring with number i ; б – final ring

Эти неизвестные найдем, исходя из того, что суммарные потери при движении по кольцу должны равняться нулю. В результате мы добьемся соблюдения принципа равенства потерь напора при движении воды от любого узла водовода до СУ по различным путям движения. Напомним, потери $\Pi_{AB}(Q)$ при движении расхода Q по участку AB водовода находим по правилу:

$$\Pi_{AB}(Q) = \begin{cases} G_{AB}Q^2, & \text{при } Q \geq 0; \\ -G_{AB}Q^2, & \text{при } Q < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где G_{AB} – коэффициент гидравлического сопротивления (далее КГС) участка AB . КГС рассчитывают с использованием таблиц [11] по значениям диаметров труб на участке, их материала и длины, а также скорости протекания воды по данному участку.

Теперь опишем процесс составления системы уравнений для нахождения расходов x_1, x_2, \dots, x_n при условии, что заданы расходы скважин Q_0, Q_1, \dots, Q_n (при $k > 0$: Q_k – расход скважины, подключенной к ВК c_k , Q_0 – расход скважины, подключенной к ВК o_0).

Рассмотрим начальное кольцо с номером $i, 1 \leq i \leq n - 1$ (рис. 3а). Здесь $Q_{осн_i}$ – входной расход по основной линии, который определяется рекур-

рентно: $Q_{осч_1} = Q_0$ и $Q_{осч_i} = Q_{осч_{i-1}} - x_{i-1}$ при $i > 1$. Далее, расходы y_i определяются равенством

$$y_i = Q_i + x_i. \quad (2)$$

Входной расход $Q_{доп_i}$ по дополнительной линии также определяем рекуррентно: $Q_{доп_1} = 0$ и $Q_{доп_i} = Q_{доп_{i-1}} + y_{i-1}$ при $i > 1$. Уравнение баланса потерь по i -му кольцу с учетом (1) и (2) имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_{o_i c_i}(x_i) + \Pi_{c_i d_i}(y_i) + \Pi_{d_i d_{i+1}}(Q_{доп_i} + y_i) + \Pi_{d_{i+1} c_{i+1}}(y_{i+1}) + \\ + \Pi_{c_{i+1} o_{i+1}}(x_{i+1}) + \Pi_{o_i o_{i+1}}(Q_{осч_i} - x_i) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Рассмотрим конечное кольцо с номером n (рис. 3б). Здесь $Q_{осч_n}$ – входной расход по основной линии; $Q_{доп_n}$ – то же по дополнительной линии (которые определяются, как это описано ранее). Расход y_n находится по формуле (2). Уравнение баланса потерь по конечному кольцу с учетом (1) и (2) имеет вид:

$$\Pi_{o_n c_n}(x_n) + \Pi_{c_n d_n}(y_n) + \Pi_{d_n cу}(Q_{доп_n} + y_n) + \Pi_{o_n cу}(Q_{осч_n} - x_n) = 0. \quad (4)$$

Итак, при наличии значений расходов скважин Q_0, Q_1, \dots, Q_n мы можем составить систему n уравнений (3)–(4), для нахождения неизвестных расходов x_1, x_2, \dots, x_n и, следовательно, такое распределение расходов воды по участкам водовода, при котором будет выполнено, во-первых, требование закона Кирхгофа [9], а во-вторых, требование равенства потерь напора при движении воды от любого узла водовода до СУ по различным путям движения. Эту систему будем называть системой реального распределения воды (РРВ).

Система РРВ содержит неизвестные x_1, x_2, \dots, x_n (1) как явно, так и неявно через КГС участков, которые зависят от скорости протекания воды по участку [8]. В связи с этим многие известные методы решения систем уравнений здесь не годятся. Поэтому для решения системы РРВ мы предлагаем использовать метод итераций. Предварительно оговорим, что меру отличия двух векторов $\bar{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ и $\bar{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ будем определять по формуле

$$|\bar{a} - \bar{b}| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (a_k - b_k)^2}. \quad (5)$$

Для решения системы РРВ методом итераций требуется выполнить следующие действия:

1) задаем точность $\varepsilon > 0$ и начальный вектор расходов $\bar{x}^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ (при расчете конкретной системы брали нулевой вектор $\bar{x}^{(0)} = (0, 0, \dots, 0)$);

2) при условии, что нашли вектор $\bar{x}^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$, $k \geq 0$, последовательно увеличивая номер i , находим расходы $x_i^{(k+1)}$, $i = 1, \dots, n$, для чего методом половинного деления решаем с точностью $0,1\varepsilon$ уравнение (3) относительно x_i (при этом значение x_{i+1} считаем равным $x_{i+1}^{(k)}$, $i < n$), не забывая пересчитывать, когда это необходимо, участвующие в (1) КГС; значение $x_i^{(k+1)}$ считается равным найденному значению x_i ;

3) если $|\bar{x}^{(k+1)} - \bar{x}^{(k)}| > \varepsilon$ (5), то возвращаемся в выполнении пункта 2, в противном случае найденный вектор $\bar{x}^{(k+1)}$ считаем искомым решением.

Отметим, что в представленном ниже примере с числом колец $n = 14$ (15 скважин) для $\varepsilon = 10^{-5}$ подобная процедура потребовала максимум 7 итераций.

Сформулируем алгоритм моделирования работы водозабора с парными сборными водоводами и концевым расположением СУ на основе алгоритма, изложенного в [9, с. 10]. Выполняем 1-й шаг этого алгоритма [9] с учетом схемы рис. 1. Если найдены некоторые приближенные значения расходов скважин $Q_0^{(i)}, Q_1^{(i)}, \dots, Q_n^{(i)}$, то, составляя и решая систему РРВ, находим расходы на каждом участке водозабора между ВК (как это было описано выше). Далее необходимо выполнить (без всяких изменений) 2-й шаг алгоритма из [9].

Пример. Расчетная схема представлена на рис. 3. Исходные данные по скважинам и водоводу (табл. 1–5) взяты из реального объекта – участка группового водозабора «Петровщина» г. Минска.

Таблица 1

Параметры скважин и насосного оборудования

Parameters of wells and pumping equipment

Наименование скважины – ВК	Удельный дебит q , м ² /ч	Статический напор $H_{ст}$, м	Отметка устья скважины, м	Коэффициент характеристики насоса $H^H = f(Q)$		
				$-a$, ч ² /м ⁵	b , ч/м ²	c , м
1	2	3	4	5	6	7
1б – о0	15,1	8,38	220,3	0,0049	0,1361	75,7
1а – с1	2,6	35,9	216,9	0,0097	0,1219	140,4
2в – с2	3,5	10,3	216,4	0,0105	0,0209	79,96
5б – с3	3,8	7,93	221,2	0,0064	0,2652	84,45
6б – с4	12,0	6,35	215,9	0,004	0,071	67,62
8а – с5	2,48	34,4	209,9	0,0188	0,2785	127,5
10б – с6	4,12	7,04	209,2	0,0054	0,2251	66,16
3б – с7	9,7	9,43	209,0	0,0115	0,9391	63,15

Окончание табл. 1
End of Table 1

1	2	3	4	5	6	7
4а – с8	3,8	33,9	208,9	0,0277	0,2785	124,9
9б – с9	3,9	4,7	209,0	0,0036	0,1023	81,36
10в – с10	2,18	6,4	210,5	0,0055	0,2513	68,82
13б – с11	4,7	2,75	209,2	0,021	1,071	86,8
12б – с12	4,9	6,0	209,5	0,0166	1,3651	40,57
11а – с13	2,35	28,1	211,0	0,0162	0,1061	107,6
11в – с14	10,7	6,41	210,7	0,0173	1,3564	67,9

Таблица 2

Параметры водоподъемных труб и линий подключения скважин
Parameters of water-lifting pipes and well connection lines

Наименование скважины – ВК	Параметры водоподъемных труб			Параметры линий подключения		
	Диаметр $D_{вп}$, мм	Длина $L_{вп}$, м	Материал	Диаметр $D_{лп}$, мм	Длина $L_{лп}$, м	Материал
1б – о0	100	29,0	чугун	125	25,0	п/э
1а – с1	150	7,0	чугун	125	82,0	п/э
2в – с2	100	15,0	сталь	125	44,0	п/э
5б – с3	150	27,0	чугун	140	32,5	п/э
6б – с4	150	8,0	чугун	125	25,0	п/э
8а – с5	150	13,0	чугун	125	63,4	п/э
10б – с6	150	28,6	чугун	140	31,5	п/э
3б – с7	150	12,5	чугун	125	32,0	п/э
4а – с8	100	40,0	чугун	125	51,0	п/э
9б – с9	160	40,5	п/э	110	37,6	п/э
10в – с10	100	12,0	чугун	125	38,0	п/э
13б – с11	160	19,5	п/э	125	26,0	п/э
12б – с12	100	12,2	п/э	125	32,0	п/э
11а – с13	160	30,0	чугун	125	76,0	п/э
11в – с14	110	44,0	п/э	125	32,0	п/э

Таблица 3

Параметры участков основной (красной) линии сборного водовода
Parameters of sections of the main (red) line of the collecting water pipeline

ВК в начале участка	Отметка устья ВК в начале участка, м	ВК в начале участка	Параметры труб (от начального ВК до конечного ВК можно задать 3 участка труб)								
			Материал	Диаметр D , мм	Длина L , м	Материал	Диаметр D , мм	Длина L , м	Материал	Диаметр D , мм	Длина L , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
о ₀	220,3	о ₁	чугун	150	57,75				–	–	–
о ₁	217,56	о ₂	чугун	150	81,0	чугун	150	200,0	–	–	–
о ₂	215,26	о ₃	чугун	200	576,0				–	–	–
о ₃	224,0	о ₄	чугун	200	103,0	чугун	250	200,0	–	–	–

Окончание табл. 3
End of Table 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
o ₄	215,85	o ₅	чугун	250	10,0	чугун	200	61,6	–	–	–
o ₅	210,74	o ₆	чугун	250	205,0	п/э	315	165,0	–	–	–
o ₆	209,15	o ₇	чугун	250	19,5	чугун	300	195,5	–	–	–
o ₇	209,15	o ₈	чугун	300	33,0	п/э	315	191,0	чуг.	300	122
o ₈	208,86	o ₉	чугун	300	36,5	п/э	315	96,5	–	–	–
o ₉	209,16	o ₁₀	чугун	250	15,0	чугун	250	35,0	–	–	–
o ₁₀	210,74	o ₁₁	чугун	350	53,0	чугун	350	254,0	–	–	–
o ₁₁	209,5	o ₁₂	чугун	300	56,0	чугун	300	200,0	–	–	–
o ₁₂	208,14	o ₁₃	п/э	315	84,0	чугун	300	110,0	–	–	–
o ₁₃	211,35	o ₁₄	чугун	300	34,0	чугун	300	34,0	–	–	–
o ₁₄	211,1	СУ	сталь	400	73,7	сталь	300	179,3	чуг.	300	36

Таблица 4

Параметры участков дополнительной (зеленой) линии сборного водовода

Parameters of sections of the additional (green) line of the collection water pipeline

ВК в начале участка	Отметка устья ВК в начале участка, м	ВК в начале участка	Параметры труб (от начального ВК до конечного ВК можно задать 3 участка труб)								
			Мате- риал	Диаметр D, мм	Длина L, м	Мате- риал	Диаметр D, мм	Длина L, м	Мате- риал	Диаметр D, мм	Длина L, м
д ₁	217,49	д ₂	чугун	200	281,0	–	–	–	–	–	–
д ₂	215,7	д ₃	чугун	200	574,4	–	–	–	–	–	–
д ₃	218,4	д ₄	чугун	200	304,4	–	–	–	–	–	–
д ₄	215,7	д ₅	п/э	250	71,0	–	–	–	–	–	–
д ₅	213,45	д ₆	чугун	200	134,0	чугун	250	171,0	п/э	250	66,0
д ₆	210,0	д ₇	чугун	250	217,0	–	–	–	–	–	–
д ₇	217,75	д ₈	чугун	300	346,0	–	–	–	–	–	–
д ₈	208,0	д ₉	чугун	250	133,0	–	–	–	–	–	–
д ₉	209,0	д ₁₀	чугун	250	50,7	–	–	–	–	–	–
д ₁₀	211,0	д ₁₁	чугун	350	307,7	–	–	–	–	–	–
д ₁₁	211,0	д ₁₂	чугун	300	258,0	–	–	–	–	–	–
д ₁₂	207,0	д ₁₃	п/э	315	190,0	–	–	–	–	–	–
д ₁₃	209,7	д ₁₄	п/э	315	70,0	–	–	–	–	–	–
д ₁₄	210,7	СУ	п/э	315	290,0	–	–	–	–	–	–

Таблица 5

Параметры соединительных участков сборного водовода

Parameters of the connecting sections of the prefabricated water pipeline

Соединительный участок	Ветки o _m – c _m			Ветки c _m – д _m		
	Диаметр D _{вп} , мм	Длина L _{вп} , м	Материал	Диаметр D _{лп} , мм	Длина L _{лп} , м	Материал
1	2	3	4	5	6	7
o ₁ – c ₁ – д ₁	150	37,25	чугун	200	30,5	чугун
o ₂ – c ₂ – д ₂	250	47,55	чугун	200	42,25	чугун
o ₃ – c ₃ – д ₃	250	42,8	чугун	200	26,5	чугун

Окончание табл. 5
End of Table 5

1	2	3	4	5	6	7
o ₄ – c ₄ – Д ₄	250	36,8	чугун	250	30,4	чугун
o ₅ – c ₅ – Д ₅	250	76,0	чугун	200	36,0	чугун
o ₆ – c ₆ – Д ₆	250	35,0	чугун	250	25,0	чугун
o ₇ – c ₇ – Д ₇	250	25,0	чугун	300	33,0	чугун
o ₈ – c ₈ – Д ₈	300	20,0	чугун	250	19,5	чугун
o ₉ – c ₉ – Д ₉	250	19,0	чугун	250	13,0	чугун
o ₁₀ – c ₁₀ – Д ₁₀	350	46,0	чугун	300	36,0	чугун
o ₁₁ – c ₁₁ – Д ₁₁	300	36,0	чугун	300	26,0	чугун
o ₁₂ – c ₁₂ – Д ₁₂	300	40,0	чугун	250	24,0	чугун
o ₁₃ – c ₁₃ – Д ₁₃	300	30,0	чугун	300	20,0	чугун
o ₁₄ – c ₁₄ – Д ₁₄	300	18,6	чугун	300	22,5	чугун

Ниже приведены результаты расчетов для водозабора с парными сборными водоводами, указанного на рис. 2, с исходными данными из табл. 1–5. (На рис. 4: синие эллипсы – подключенные скважины, внутри указаны их названия и рассчитанные расходы, м³/ч. Вдоль участков между ВК в числителе указаны пропускаемые расходы, м³/ч, в знаменателе – потери напора, мм).

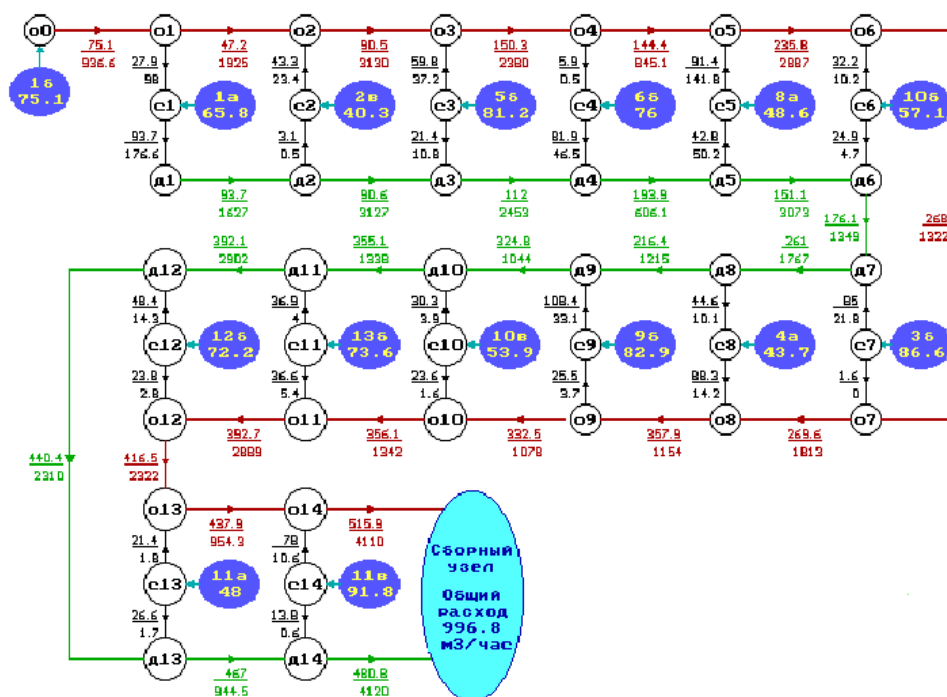


Рис. 4. Пример расчета водозабора с парными сборными водоводами согласно указанному алгоритму

Fig. 4. Example of calculating water intake with paired prefabricated water pipelines according to the specified algorithm

Анализ результатов расчета показывает, что все кольцевые участки сборных водоводов уравновешены по потерям напора и по расходам.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритм и методика гидравлического расчета группового скважинного водозабора с парными сборными водоводами, которые базируются на принципе равенства потерь напора при движении воды от точки разделения двух потоков до сборного узла по различным путям движения и уравнении неразрывности. Полученная методика расчета может применяться при любом количестве скважин.

2. Рассмотрен пример гидравлического расчета группового скважинного водозабора, состоящего из 15 скважин, подключенных к парным сборным водоводам. Построена математическая модель водозабора и составлена компьютерная программа расчета, которая позволяет моделировать работу водозабора при любом сочетании включенных скважин, осуществлять подбор насосов с разными напорными характеристиками, менять длины, диаметры и материал трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02–84) / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
2. Водозаборные сооружения: СП 4.01.03–2022: введ. 10.03.2023. Минск: Минстройархитектуры, 2023. 79 с.
3. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
4. Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования / В. В. Ивашечкин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 3. С. 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>.
5. Ивашечкин, В. В. Прогноз снижения удельного дебита скважин в процессе эксплуатации / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Э. И. Михневич // Мелиорация. 2012. № 2. С. 33–43.
6. Ивашечкин, В. В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин; под ред. А. Д. Гуриновича. Минск: БНТУ, 2005. 270.
7. Говорко, А. П. Перевод г. Минска на водоснабжение из подземных источников / А. П. Говорко // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: материалы Междунар. конф., Минск, 13–14 февр. 2019 г.: в 2 ч. Минск: БГТУ, 2019. Ч. 2. С. 37–40.
8. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. Минск: Выш. шк., 1989. 269 с.
9. Вереме́нюк, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Вереме́нюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>.
10. Вереме́нюк, В. В. Моделирование работы скважинного водозабора с кольцевым сборным водоводом / В. В. Вереме́нюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // Энергетика. Изв.

высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 283–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>.

11. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. М.: Бастет, 2016. 428 с.

Поступила 05.12.2023 Подписана в печать 07.02.2024 Опубликована онлайн 31.05.2024

REFERENCES

1. All-Union Scientific Research Institute “VODGEO” of State Construction Committee of the USSR (1989) *Guide to Designing Structures for Groundwater Intake* to SNiP – Construction Rules and Regulations 2.04.02–84). Moscow, Stroyizdat Publ. 272 (in Russian).
2. SP 4.01.03–2022. *Water Intake Structures*. Minsk, Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2023 (in Russian).
3. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. (1990) *Design and Operation of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroyizdat Publ. 256 (in Russian).
4. Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A. (2021) Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> (in Russian).
5. Ivashechkin V. V., Sheyko A. M., Mikhnevich E. I. (2012) Forecast for Reducing the Specific Production Rate of Wells during Operation. *Melioratsiya = Land Reclamation*, (2), 33–43 (in Russian).
6. Ivashechkin V. V. (2005) *Gas Pulse Technology for Restoring the Capacity of Water Intake Well Filters*. Minsk, Belarusian National Technical University. 270 (in Russian).
7. Govorko A. P. (2019) Transfer of Minsk to Water Supply from Underground Sources. *Sovremennye Tendentsii v Razvitii Vodospabzheniya i Vodootvedeniya: Materialy Mezhdunar. Konf., Minsk, 13–14 Fevr. 2019 g. Ch. 2* [Current Trends in the Development of Water Supply and Sanitation: Proceedings of International Conference, Minsk, February 13–14, 2019. Part 2]. Minsk, Belarusian State Technological University, 37–40 (in Russian).
8. Starinsky V. P., Mikhaylik L. G. (1989) *Water Intake and Treatment Facilities for Public Water Pipelines*. Minsk, Vysshaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
9. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
10. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian).
11. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) *Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes*. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).

Received: 05 December 2023

Accepted: 07 February 2024

Published online: 31 May 2024