

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Нижний Новгород 2022

УДК 621.3
ББК 31.2

Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 4 (20). – 141 с.

Выходит 1 раз в квартал

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки), 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)

Главный редактор

Алексей Борисович Лоскутов, д-р техн. наук, профессор

зам. гл. редактора

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент

Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

отв. секретарь

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

отв. редактор

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

выпускающий редактор

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Геннадий Яковлевич Вагин

д-р техн. наук, профессор

Леонид Абрамович Герман

д-р техн. наук, профессор

Валерий Геннадьевич Гольдштейн

д-р техн. наук, профессор

Игорь Васильевич Гуляев

д-р техн. наук, профессор

Павел Владимирович Илюшин

д-р техн. наук

Анатолий Викторович Кузнецов

д-р техн. наук, профессор

Александр Леонидович Куликов

д-р техн. наук, профессор

Виктор Николаевич Мешеряков

д-р техн. наук, профессор

Георгий Борисович Онищенко

д-р техн. наук, профессор

Александр Сергеевич Плехов

канд. техн. наук, доцент

Александр Юрьевич Смирнов

д-р техн. наук, доцент

Vitezslav Styskala

д-р техн. наук, профессор (Чехия)

Владимир Георгиевич Титов

д-р техн. наук, профессор

Олег Станиславович Хватов

д-р техн. наук, профессор

Юрий Иванович Хохлов

д-р техн. наук, профессор

Александр Иванович Чивенков

д-р техн. наук, профессор

Roustiam Chakirov

д-р техн. наук, профессор (Германия)

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева»

(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://ie.nntu.ru>

*СМИ зарегистрировано Роскомнадзором
ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.*

ISSN 2658-6754

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|------------|
| ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ | 4 |
| Александров И.В., Нос О.В., Баховцев И.А., Севостьянов Н.А. Синтез системы управления сетевым преобразователем с ограниченным уровнем выходного импеданса в a-b-c системе координат..... | 4 |
| Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Система прямого управления моментом тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами с минимизацией потерь мощности..... | 22 |
| Кононенко К.Е., Кононенко А.В. Методика курсового проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором..... | 38 |
| ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА | 43 |
| Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию Smart Grid..... | 43 |
| Лоскутов А.Б., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш. Исследования характеристик ПОМТЭ при работе в установившихся и динамических режимах..... | 53 |
| Осокин В.Л. Проблемы оценки надежности и эффективности в современных системах электроснабжения..... | 78 |
| Жидков А.А., Абасса А.З., Аль Рикаби Х.Т. Оценка эффективности использования объектов генерации на свалочном газе..... | 95 |
| Сулайманова В.А., Гусев А.С., Уфа Р.А., Литвинов С.А. Методика и средства всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электроснабжения..... | 112 |
| Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Ворошилов А.А. О применении твердотопливных элементов на биогазе для электроснабжения животноводческих предприятий..... | 126 |
| ХРОНИКА | 135 |
| Международный конгресс CIGRE-2022 в Париже | 135 |
| Издательская жизнь НГТУ 2022 | 137 |

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.072.2

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_04

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЕТЕВЫМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОГРАНИЧЕННЫМ УРОВНЕМ
ВЫХОДНОГО ИМПЕДАНСА
В А-В-С СИСТЕМЕ КООРДИНАТ****И.В. Александров**

ORCID: 0000-0002-3976-349X e-mail: alexandrov.i2018@gmail.com

Новосибирский государственный технический университет

*Новосибирск, Россия***О.В. Нос**

ORCID: 0000-0001-5737-5354 e-mail: nos@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет

*Новосибирск, Россия***И.А. Баховцев**

e-mail: bahovcev@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет

*Новосибирск, Россия***Н.А. Севостьянов**

ORCID: 0000-0002-0779-3424 e-mail: n.sevostyanov97@yandex.ru

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Россия

Выходной импеданс преобразователей электрической энергии для современных систем электроснабжения, содержащих большое количество электронных нагрузок, является важной характеристикой, описывающей не только качество генерируемого напряжения, но и устойчивость системы электроснабжения в целом. В этом случае его максимальное значение необходимо ограничивать на этапе синтеза системы управления путем выбора достаточной структуры регуляторов и их параметров, основываясь на частотных характеристиках преобразователя напряжения. Сетевые преобразователи напряжения, преобразующие переменное сетевое напряжение в постоянное, в данном случае не являются исключением. В работе приведены результаты моделирования динамических свойств сетевого преобразователя

напряжения в частотной области при управлении в исходной a - b - c системе координат. Показано, что в связи с наличием нуля второго порядка в передаточной функции объекта управления для исключения влияния тока нагрузки на контуры регулирования входных токов достаточно использовать ПИ-регулятор, частота сопряжения которого превышает частоту нуля в передаточной функции объекта управления. Также проведено исследование частотных характеристик объекта управления при замкнутых контурах управления входными токами. Дано их математическое описание. Показано, что параметры регулятора могут быть выбраны напрямую из задания на максимальный уровень выходного импеданса преобразователя с замкнутым контуром регулирования выходного напряжения. Предложены соотношения, позволяющие рассчитать параметры ПИ-регуляторов контуров регулирования тока и напряжения. Произведена проверка полученных соотношений в среде *MatLab/Simulink*, получены график логарифмической амплитудно-частотной характеристики выходного импеданса преобразователя с замкнутой двухконтурной системой управления и осциллограммы переходных процессов входных токов и выходного напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель, активный сетевой преобразователь, выходной импеданс, ПИ-регулятор, трехфазная сеть, частотные характеристики.

Для цитирования: Александров И.В., Нос. О.В., Баховцев И.А, Севостьянов Н.А. Синтез системы управления сетевым преобразователем с ограниченным уровнем выходного импеданса в a - b - c системе координат // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 4-21. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_04

CONTROL SYSTEM DESIGN OF GRID CONNECTED CONVERTER WITH LIMITED OUTPUT IMPEDANCE IN A-B-C REFERENCE FRAME

I.V. Alexandrov

ORCID: 0000-0002-3976-349X e-mail: alexandrov.i2018@gmail.com

Novosibirsk state technical university

Novosibirsk, Russia

O.V. Nos

ORCID: 0000-0001-5737-5354 e-mail: nos@corp.nstu.ru

Novosibirsk state technical university

Novosibirsk, Russia

I.A. Bahovtsev

e-mail: baxovcev@corp.nstu.ru

Novosibirsk state technical university

Novosibirsk, Russia

N.A. Sevostyanov

ORCID: 0000-0002-0779-3424 e-mail: n.sevostyanov97@yandex.ru

Novosibirsk state technical university

Novosibirsk, Russia

Abstract. Output impedance of an electrical converter becomes crucial in modern power systems with electronic loads not only in terms of output voltage quality but also for the stability of the power system itself. In such case, output impedance of a converter should be limited to a desired level according to the R.D. Middlebrook stability criterion. Grid connected power converters are no exception in this case. This work presents results of the mathematical modelling of the three-phase grid connected converters working in the mode of active front-end converter. It is shown that, second order zero of the power plant in the current control loop affects the dynamics of the closed current loop. This could be eliminated by means of a simple PI-controller with the corner frequency higher than the second order zero frequency. Analysis of the converter dynamic properties with the current loops closed was carried out also. It is show that limited level of output impedance could be obtained by proper choice of the current and voltage loop PI-controllers parameters. Mathematical expressions are proposed that allows selecting the parameters of the controllers to provide a given level of the output impedance. The obtained expressions were tested in the MatLab/Simulink environment, a bode plot of the frequency response of the output impedance of a converter with a closed two-loop control system and oscillograms of transient responses of input currents and output voltage were obtained. Which proves stability of the system and correctness of the obtained results.

Keywords: active rectifier, active network converter, output impedance, PI controller, three-phase network, frequency characteristics.

For citation: I.V. Alexandrov, O.V. Nos, I.A. Bahovtsev and N.A. Sevostyanov, “Control system design of grid-connected converter with limited output impedance in a-b-c reference frame”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 4-21, 2022.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_04

I. Введение

Развитие полупроводниковой техники и ужесточение требований к качеству электрической энергии, потребляемой от промышленной сети переменного тока, привело к появлению и широкому распространению транзисторных, связанных с сетью, силовых преобразователей, которые работают в режимах активных фильтро-компенсирующих устройств (АФКУ), а также в режиме активного выпрямителя напряжения (АВН), обеспечивая нагрузку постоянного тока стабилизированным напряжением [1-3]. При работе таких преобразователей в режимах АФКУ или АВН на нагрузку постоянного тока, не содержащих электронных преобразователей постоянного тока (разряд/заряд аккумуляторных батарей, пассивные цепи), разработчиков и исследователей интересует устойчивость непосредственно самого

преобразователя, обусловленная устойчивостью двухконтурной системы управления (СУ) токами входных дросселей и напряжением звена постоянного тока [4-5]. Однако, при проектировании системы электроснабжения постоянного тока с АВН, в нагрузку которого предполагается наличие электронных преобразователей электрической энергии, важным, с точки зрения устойчивости всей каскадной системы электроснабжения, становится выполнение импедансного критерия устойчивости системы, который накладывает ограничение на максимальное значение выходного импеданса АВН по соотношению [6-7].

$$|Z_{\text{АВН}}(j\omega)| \leq \frac{k_3 U_o^2}{P_H}, \quad (1)$$

где j – мнимая единица; $Z_{\text{АВН}}(j\omega)$ – комплексная величина выходного сопротивления АВН на угловой частоте ω ; U_o – среднее значение выходного напряжения АВН; P_H – мощность нагрузки; k_3 – коэффициент запаса.

В настоящее время существуют методики проектирования АВН, не учитывающие, однако, в процессе синтеза преобразователя и СУ выходной импеданс напрямую. Они требуют дополнительных компьютерных инструментов для выбора параметров регуляторов, либо ограничены случаем управления в синхронно-вращающейся системе координат $dq0$ [4-5, 8]. В данной работе предлагается процедура структурно-параметрического синтеза двухконтурной системы управления токами дросселей и напряжения звена постоянного тока с учетом (1) и задержек в цифровой реализации системы управления для сетевого преобразователя, работающего в режиме АВН. Управление преобразователем осуществляется в исходной системе координат $a-b-c$ [9]. Пример схемы преобразователя показан на рис. 1.

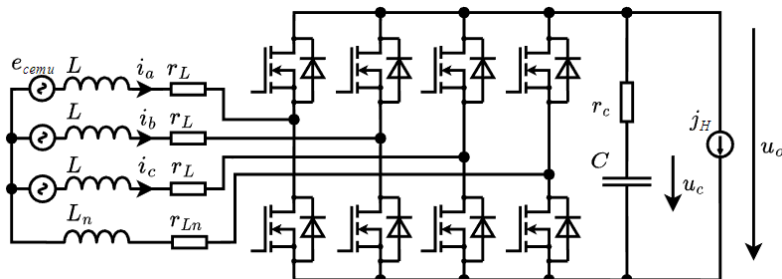


Рис. 1. Пример схемы сетевого преобразователя

Fig. 1. Example of the grid-converter topology

II. Выходной импеданс преобразователя в режиме АВН с разомкнутой системой управления

Анализ выходного импеданса преобразователя с разомкнутой системой управления в режиме АВН был выполнен с помощью метода усреднения в пространстве состояний, так как преобразователь управляется с помощью широтно-импульсной модуляцией с частотой f_k , намного большей частоты сетевого напряжения f_c [10]. В данном случае преобразователь может быть описан следующей малосигнальной моделью в окрестности выбранной рабочей точки.

$$\begin{cases} s\tilde{\mathbf{x}}(s) \approx \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(s) + \mathbf{B}\tilde{\mathbf{j}}_H(s) + \mathbf{F}\tilde{\mathbf{d}}(s) \\ \tilde{\mathbf{y}}(s) = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(s) + \mathbf{E}\tilde{\mathbf{j}}_H(s) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{x}}(s) = [\tilde{i}_a(s), \tilde{i}_b(s), \tilde{i}_c(s), \tilde{u}_c(s)]^T$ – вектор малосигнальных отклонений переменных состояния в окрестности точки линеаризации; $\tilde{\mathbf{d}}(s) = [\tilde{d}_a(s), \tilde{d}_b(s), \tilde{d}_c(s)]^T$ – вектор малосигнальных отклонений управляющих воздействий; $\tilde{\mathbf{y}}(s) = [\tilde{i}_a(s), \tilde{i}_b(s), \tilde{i}_c(s), \tilde{u}_c(s)]^T$ – вектор выходных переменных; $\tilde{j}_H(s)$ – малосигнальное отклонение тока нагрузки; s – оператор Лапласа.

Вектор сетевых напряжений $e_{\text{сети}}$ исключен из анализа, так как он не оказывает влияние на выходной импеданс преобразователя и настройку контуров регулирования токов входных дросселей (входных токов) и напряжения конденсатора звена постоянного тока (выходного напряжения). В случае управления преобразователем в исходной (a - b - c) системе координат системные матрицы принимают вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{L} & \frac{a_2}{L} & \frac{a_2}{L} & \frac{\gamma_a}{L} \\ \frac{a_2}{L} & \frac{a_1}{L} & \frac{a_2}{L} & \frac{\gamma_b}{L} \\ \frac{a_2}{L} & \frac{a_2}{L} & \frac{a_1}{L} & \frac{\gamma_c}{L} \\ \frac{D_a}{C} & \frac{D_b}{C} & \frac{D_c}{C} & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\beta U_o}{L} & \frac{\alpha U_o}{L} & \frac{\alpha U_o}{L} \\ \frac{\alpha U_o}{L} & \frac{\beta U_o}{L} & \frac{\alpha U_o}{L} \\ \frac{\alpha U_o}{L} & \frac{\alpha U_o}{L} & \frac{\beta U_o}{L} \\ \frac{I_a}{C} & \frac{I_b}{C} & \frac{I_c}{C} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ r_c \cdot D_a & r_c \cdot D_b & r_c \cdot D_c & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -r_c \end{bmatrix},$$

где $\alpha = L_n(3L_n+L)^{-1}$, $\beta = 1-\alpha$, $a_1 = -\beta r_L + (3\alpha-1)r_{Ln}$, $a_2 = \alpha r_L + (3\alpha-1)r_{Ln}$, $D_{a,b,c}$ – коэффициенты заполнения фазных стоек преобразователя в точке линеаризации; $\gamma_a = \alpha(D_b + D_c) - D_a\beta$, $\gamma_b = \alpha(D_a + D_c) - D_b\beta$, $\gamma_c = \alpha(D_a + D_b) - D_c\beta$; $I_{a,b,c}$ – значение токов фазных дросселей в точке линеаризации, U_o – установившееся значение напряжения на конденсаторе звена постоянного тока. Для схемы включения с изолированной нейтралью $\alpha = 1/3$.

Выходной импеданс преобразователя является характеристикой, описывающей реакцию выходного напряжения преобразователя (в данном случае – напряжения звена постоянного тока u_o) на изменение тока нагрузки j_H в частотной области. По определению, он является передаточной функцией (п.ф.) системы, равной отношению изображения по Лапласу выходного напряжения к изображению по Лапласу тока нагрузки, взятому с обратным знаком [11]. Используя математическую модель объекта управления (ОУ) (2) с матрицами, определенными в (3), можем получить следующее выражение, описывающее данный параметр в случае преобразователя с разомкнутой СУ:

$$Z_{\text{АВН}}(s) \triangleq -\frac{\tilde{u}_o(s)}{\tilde{i}_H(s)} \approx \frac{(sL + r_L)(1 + sr_c C)}{LC(s^2 + \omega_0^2)}, \quad (4)$$

где $\omega_0 = E_{(1)}(0,67LC)^{-0,5}/U_c$ – угловая резонансная частота преобразователя; $E_{(1)}$ – амплитуда основной гармоники сетевого напряжения.

График логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) выходного импеданса преобразователя показан на рис. 2. Для решения задачи синтеза, рассматриваемой в данной работе, исходя из (2), один канал трехканального преобразователя с разомкнутой СУ предлагается заменить блок-схемой (рис. 3).

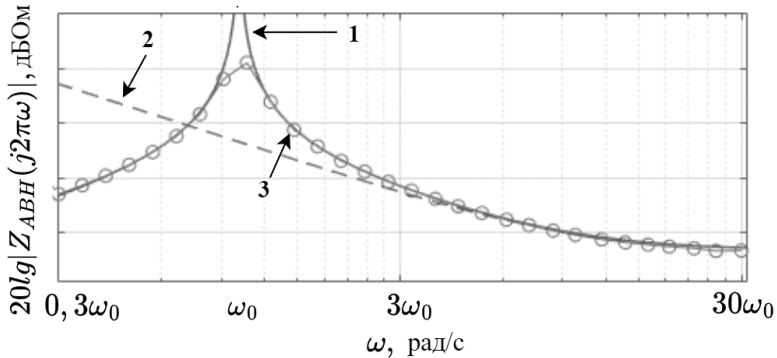


Рис. 2. ЛАЧХ выходного сопротивления преобразователя с разомкнутой СУ:
1 – $|Z_{ABH}(j\omega)|$; 2 – $|(1 + j\omega Cr_c)/j\omega C|$; 3 – имитационное моделирование

Fig. 2. Magnitude response of the open loop converter output impedance:
1 – $|Z_{ABH}(j\omega)|$; 2 – $|(1 + j\omega Cr_c)/j\omega C|$; 3 – simulation

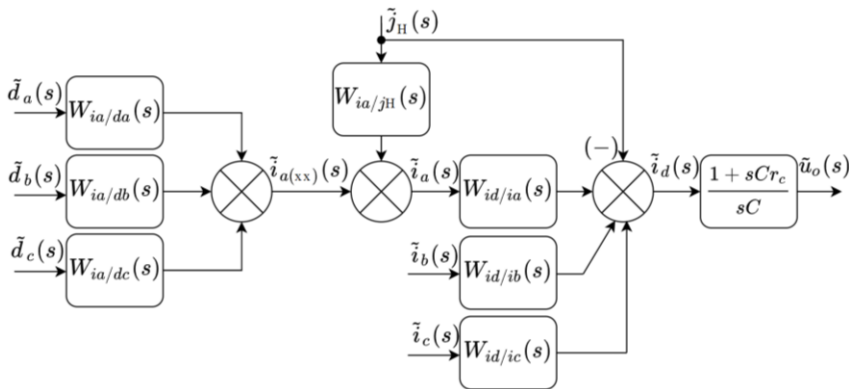


Рис. 3. Блок-схема канала преобразователя с разомкнутой СУ

Fig. 3. Block diagram of the open loop converter

III. Синтез контура регулирования входных токов преобразователя

Синтез двухконтурной системы регулирования выходного напряжения АВН предлагается начать с выбора параметров и структуры регуляторов входных токов преобразователя. Ток нагрузки влияет на ток преобразователя через п.ф. $W_{in/jH}(s)$, где $n = a, b, c$ (рис. 3). В данном случае за счет выбора достаточной полосы пропускания контура регулирования и структуры регулятора можно снизить это воздействие, приведя выходной импеданс преобразователя при замкнутых контурах входных токов к импедансу

выходного конденсатора, показанному прерывистой линией на рис. 2. В случае цифровой СУ с присущими задержками [11]:

$$\tau = 0,5T_{\text{выб}} + t_{\text{ашп}} + t_{\text{рас}},$$

где $T_{\text{выб}}$ – период между двумя последовательными выборками АЦП; $t_{\text{ашп}}$ – время выборки АЦП; $t_{\text{рас}}$ – время выполнения управляющей программы, выбор частоты среза контура регулирования тока. На основании аппроксимации фазочастотной характеристики (ФЧХ) контура в разомкнутом состоянии первыми тремя членами ряда Тейлора может быть осуществлен по следующему соотношению:

$$\omega_{c,i} = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{2 \operatorname{tg}(0,5\pi - \varphi_{m,i} - \varphi_i)^2 + 1 - 1}{\operatorname{tg}(0,5\pi - \varphi_m - \varphi_i)}}, \quad (5)$$

где $\varphi_{m,i}$ – желаемый запас по фазе разомкнутого контура регулирования ($\varphi_m \approx \pi/6 \dots \pi/3$); φ_i – фазовый сдвиг, вносимый регулятором на частоте среза контура регулирования тока в разомкнутом состоянии ($\varphi_i \approx \pi/9 \dots \pi/6$). Однако, необходимо учесть, что полоса пропускания контура тока должна удовлетворять следующему соотношению:

$$\omega_0(3\dots 5) \leq \omega_{c,i} \quad (6)$$

Если при выборе частоты среза по (5) условие (6) не выполняется, необходимо пересмотреть параметры φ_m , φ_i и силовой схемы или уменьшить задержку τ , пока условие (6) не выполнится.

Структуру регулятора предлагается определить из вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ОУ в контурах регулирования входных токов. $W_{in/dn-}(s) = \tilde{i}_n(s) / \tilde{d}_n(s)$, где $n = a, b, c$. Графики ЛАЧХ и ФЧХ приведены на рис. 4, а, из которого видно, что п.ф. по управляющему воздействию к току входного дросселя имеет дополнительную пару кратных нулей, располагающихся на частоте:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{(D_c^2 + D_b^2)\beta^2 - 2D_b D_c \alpha \beta - (D_c + D_b)^2 \alpha}{\beta LC}}.$$

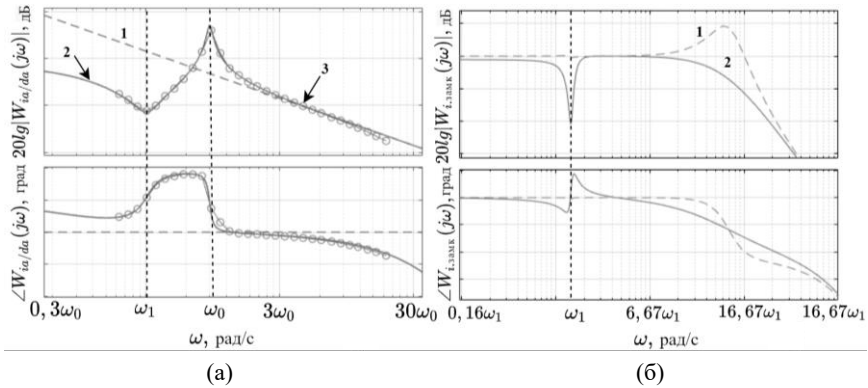


Рис. 4. ЛАЧХ и ФЧХ контура тока:

разомкнутый (а): 1 – $\beta U_o/j\omega L$; 2 – выражение (4); 3 – имитационная модель;
замкнутый (б): 1 – ПИ-регулятор; 2 – П-регулятор

Fig. 4. Bode plot of the current loop:

open-loop (a): 1 – $\beta U_o/j\omega L$; 2 – equation (4); 3 – simulation;
closed-loop (b): 1 – PI-type controller; 2 – P-type controller

Влияние данных нулей выражается в снижении коэффициента передачи контура в замкнутом состоянии в малой окрестности данной частоты (рис. 4, б), что вызывает отклонение выходного импеданса от желаемого значения. Для уменьшения влияния этого фактора необходимо выполнение следующего условия:

$$|W_{in/dn}(j\omega)G_i(j\omega)| \gg 1 \quad \forall \omega \in [0, \omega_0], \quad (7)$$

где $W_{in/dn}(j\omega) \approx \beta U_o/(j\omega L)$ для частот $\omega > \omega_0$, как показано на рис. 4; $G_i(j\omega)$ – частотная характеристика регулятора контура тока.

Условие (7) может быть выполнено при использовании ПИ-регулятора, частота сопряжения ЛАЧХ которого удовлетворяет следующему соотношению:

$$\omega_i \geq (15...20)\omega_1, \quad (8)$$

Таким образом, по результатам анализа частотных характеристик преобразователя может быть сформирована система уравнений для выбора параметров ПИ-регулятора контура тока с п.ф., описываемой выражением $G_i(s) = k_i(1 + \omega_i/s)$, при единичной обратной связи:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_{c,i} \operatorname{tg}(\varphi_i) \\ k_i = \frac{\omega_{c,i} L}{\beta U_c \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_i}{2\pi f_{ci}}\right)^2}} \end{cases}$$

При выборе параметров регулятора необходимо учитывать выполнение условий (6) и (8).

IV. Синтез контура регулирования выходного напряжения

Синтез контура регулирования напряжения выполняется при условии, что потребляемый от сети фазный ток имеет нулевой сдвиг относительно соответствующего фазного напряжения, что соответствует единичному cosφ, где φ угол между током и напряжением соответствующей фазы системы электроснабжения. В таком случае схема, изображенная на рис. 3, может быть преобразована для случая замкнутых контуров тока к виду, показанному на рис. 5.

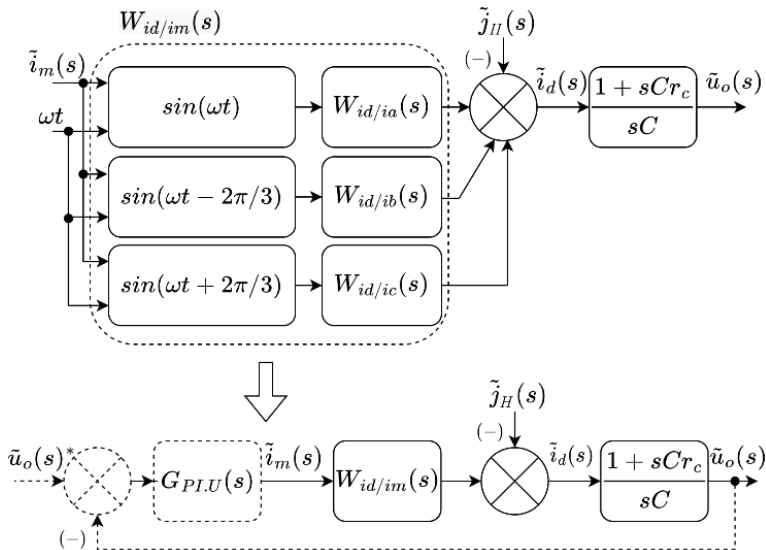


Рис. 5. Блок-схема объекта управления в контуре напряжения при замкнутых контурах управления токами входных катушек индуктивности

Fig. 5. Diagram of the power plant with input inductors current-loops closed

Объект управления в контуре регулирования напряжения предлагается описать трехканальным источником тока с п.ф. $W_{id/im}(s)$, нагруженным на сопротивление конденсатора и источник тока нагрузки. Управление источником тока осуществляется с помощью задания амплитуды тока i_m , в результате чего малосигнальная п.ф. объекта управления может быть описана следующим соотношением:

$$W_{uo/im}(s) = \frac{\tilde{u}_o(s)}{\tilde{i}_m(s)} = \frac{3E_{(1)} \left(1 - s \frac{2J_H LU_o}{3E_{(1)}^2} \right) (1 + sr_c C)}{2J_H (1 + sCU_o J_H^{-1})} W_{i,замк}(s); \quad (9)$$

$$W_{id/im}(s) = \frac{\tilde{i}_d(s)}{\tilde{i}_m(s)} = \frac{3E_{(1)}}{2U_o} \left(1 - s \frac{2J_H LU_o}{3E_{(1)}^2} \right) W_{i,замк}(s),$$

где J_H – ток нагрузки преобразователя в установившемся режиме; $W_{i,замк}(s)$ – п.ф. замкнутого контура регулирования тока. Графики частотных характеристик объекта управления показаны на рис. 6.

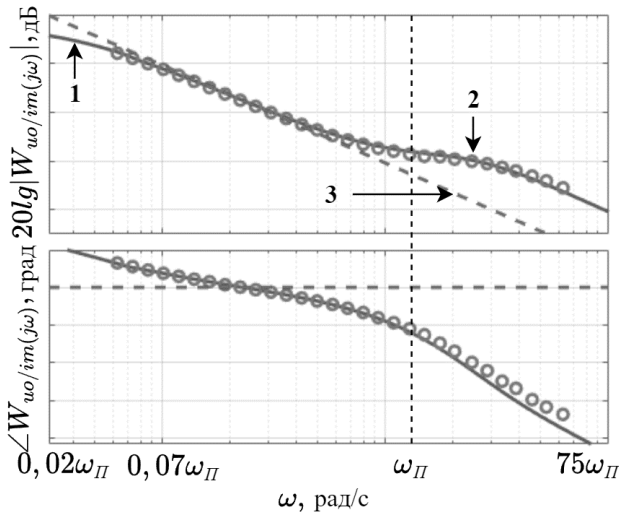


Рис. 6. ЛАЧХ и ФЧХ объекта управления в контуре напряжения:
1 – выражение (9); 2 – результаты оценки по имитационной модели;
3 – $1,5E_{(1)}/(j\omega U_o C)$

Fig. 6. Bode plot of the $W_{uo/im}(s)$ transfer function:
1 – equation (9); 2 – simulation; 3 – $1,5E_{(1)}/(j\omega U_o C)$

Как следует из (9) и рис. 6, п.ф. объекта управления в контуре регулирования выходного напряжения содержит правый ноль на частоте $\omega_{\Pi} = 3E_{(1)}^2 / (2J_H L U_o)$, что сужает область допустимых значений частоты среза контура регулирования напряжения, поскольку при ее нахождении в окрестности частоты правого нуля вызывает возрастание максимального значения импеданса при увеличении тока нагрузки. Для обеспечения приемлемого запаса устойчивости по фазе и заданного максимального уровня выходного импеданса частоту среза контура напряжения предлагается выбирать в области частот, где ЛАЧХ объекта управления спадает с наклоном -20 дБ/дек. При таком выборе частоты среза контура регулирования выходной импеданс объекта управления с контуром регулирования напряжения в замкнутом состоянии, исходя из рис. 5, может быть описан следующим соотношением:

$$Z_{\text{АВН}}^{\text{замк}}(s) = \frac{Z_c(s)}{1 + Z_c(s)W_{\text{id/im}}(s)G_{\text{PI,U}}(s)} \approx \frac{0,67U_o E_{(1)}^{-1} G_{\text{PI,U}}^{-1}(s)}{1 + s0,67CU_o E_{(1)}^{-1} G_{\text{PI,U}}^{-1}(s)},$$

где $Z_c(s) = (1 + sr_c C) / (sC)$ – п.ф. конденсатора звена постоянного тока; $G_{\text{PI,U}}(s) = k_u(1 + \omega_u/s)$ – п.ф. ПИ-регулятора в контуре регулирования напряжения. В таком случае:

$$\max\left(\left|Z_{\text{АВН}}^{\text{замк}}(j\omega)\right|\right) = 2U_o / (3E_{(1)} k_u).$$

Для обеспечения астатизма по выходной координате достаточно использовать ПИ-регулятор. Таким образом, как и в случае контуров регулирования токов входных дросселей, на основе анализа частотных характеристик объекта управления в контуре регулирования напряжения может быть составлена система уравнений для выбора параметров ПИ-регулятора напряжения, исходя из требований к максимальному значению выходного импеданса преобразователя.

$$\begin{cases} k_u = \frac{2U_o}{3E_{(1)} Z_{\text{max}}^*}, \\ \omega_{\text{с.н}} = \frac{\sqrt{U_o^2 - (J_H Z_{\text{max}}^*)^2}}{U_o C Z_{\text{max}}^*}, \\ \omega_u = \frac{\omega_{\text{с.н}}}{2}, \end{cases} \quad (10)$$

где $Z_{\max}^* = k_3 U_o^2 / P_H$ – требуемое максимальное значение импеданса преобразователя, $\omega_{c.u}$ – частота среза контура регулирования напряжения, $\varphi_{т.и}$ – запас устойчивости по фазе контура регулирования напряжения. При расчете параметров регулятора по (10) необходимо учитывать требования системы подчиненного регулирования по разделению частот среза контуров регулирования:

$$\omega_{c,i} \geq (3 \dots 5) \omega_{c,u}, \quad (11)$$

При невыполнении (11) необходимо скорректировать k_3 в сторону его уменьшения или увеличить емкость преобразователя.

V. Проверка полученных соотношений

Верификация полученных соотношений была произведена на имитационной модели преобразователя в *MatLab/Simulink* с применением библиотеки *Simscape Power Systems* [12]. Частотные характеристики ОУ получены инструментом *Frequency Response Estimation*. Проверка включала оценку частотных характеристик разомкнутого преобразователя, показанных на рис. 2 и 4, а, проверку частотной характеристики объекта управления в контуре регулирования напряжения, изображенную на рис. 6, а также оценку частотных характеристик выходного импеданса преобразователя с двухконтурной СУ и временной анализ кривых входных токов и напряжения звена постоянного тока при сбросе/набросе нагрузки, которые приведены на рис. 7 и 8. Параметры преобразователя, используемые для моделирования, показаны в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры преобразователя

Table 1.
Converter parameters

| Параметр | Значение | Единицы измерения |
|--|----------|-------------------|
| Z_{\max}^* | 1,5 | Ом |
| Выходное напряжение, U_o | 760 | В |
| Амплитуда основной гармоники сетевого напряжения фазного, $E_{(1)}$ | 325 | В |
| Частота сетевого напряжения, f_c | 50 | Гц |
| Частота коммутации преобразователя, f_k | 50 | кГц |
| Индуктивность входных катушек индуктивности, L | 400 | мкГн |
| Емкость конденсатора в звене постоянного тока, C | 700 | мкФ |
| Запасы устойчивости по фазе контуров регулирования $\varphi_{т.i}$ и $\varphi_{т.и}$ | 45 | град. |

Первый эксперимент на имитационной модели направлен на оценку частотной характеристики выходного импеданса преобразователя, который нагружен на источник тока со средним значением $J_H = 50$ А. Для измерения частотной характеристики в ток нагрузки вносятся гармонические колебания с амплитудой 1 А в диапазоне частот от 30 Гц до 10 кГц. Фиксируются колебания выходного напряжения. Полученный график ЛАЧХ выходного импеданса преобразователя показан на рис. 7. Теоретические зависимости показаны линиями, результаты имитационного моделирования – с помощью маркеров.

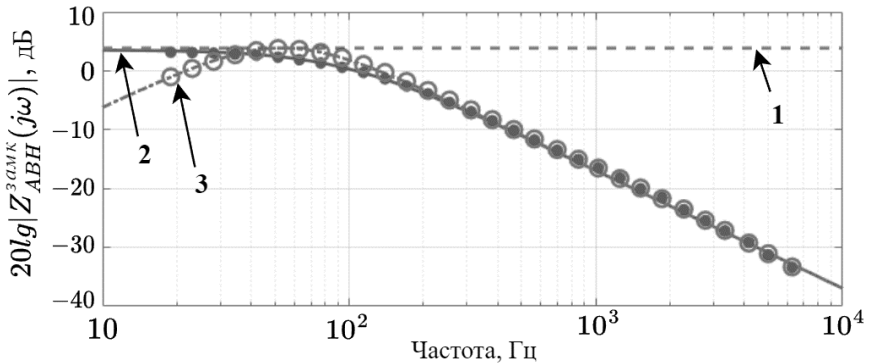


Рис. 7. ЛАЧХ выходного импеданса преобразователя:

1 – Z^*_{max} ; 2 – при П-регуляторе в контуре регулирования напряжения;
3 – при ПИ-регуляторе

Fig. 7. Bode plot of the converter output impedance:

1 – Z^*_{max} ; 2 – using P-type controller in the voltage loop; 3 – using PI-controller

Второй эксперимент направлен на определение устойчивости силового преобразователя напряжения с рассчитанными параметрами регуляторов по приведенным выше соотношениям при динамически изменяющемся характере нагрузки. Эксперимент включает оценку переходных процессов выходного напряжения и входных токов преобразователя, показанных на рис. 8 для двух случаев: ступенчатом изменении тока нагрузки от 0 до 50 А и ступенчатом изменении тока нагрузки с 50 до 0 А.

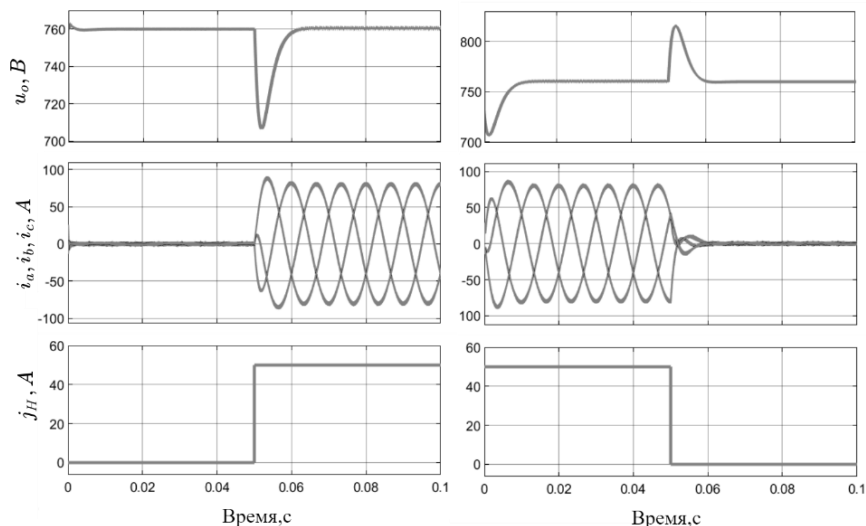


Рис. 8. Переходные процессы при сбросе/набросе нагрузки с использованием ПИ-регулятора в контуре регулирования напряжения

Fig. 8. Transient response of the converter during load step change using PI-controller in the voltage control loop

VI. Заключение

Анализ частотных характеристик сетевого преобразователя, работающего в режиме активного выпрямителя напряжения, показал, что его выходной импеданс может быть ограничен на заданном уровне с помощью двухконтурной системы управления подчиненного типа, реализованной в a - b - c координатах состояния.

Для исключения влияния тока нагрузки как возмущающего воздействия на токи входных катушек индуктивности, предложено использовать ПИ-регулятор, способный уменьшить вклад нуля п.ф. объекта управления в частотные характеристики замкнутых контуров управления входными токами. В таком случае импеданс системы удастся свести к импедансу выходного конденсатора, исключив резонанс.

Синтез регулятора напряжения в таком случае может быть произведен непосредственно из задания на максимальное значение выходного импеданса преобразователя с двухконтурной системой управления подчиненного типа. Однако быстродействие контура регулирования ограничено вкладом правого нуля, присущего объекту управления в контуре регулирования напряжения.

В ходе анализа частотных характеристик преобразователя напряжения предложен набор математических выражений, позволяющий выбрать параметры регуляторов двухконтурной системы управления на основе задания на максимальное значение выходного импеданса преобразователя и ненулевых запасов устойчивости с учетом задержек цифровой реализации системы управления.

Полученные выражения могут быть как использованы на этапе проектирования преобразователя, так и реализованы напрямую в цифровой системе управления для подстройки параметров регуляторов. Также на их основе может быть решена обратная задача определения выходного импеданса активного выпрямителя напряжения при заданных параметрах и структурах регуляторов.

© Александров И.В., 2022

© Нос О.В., 2022

© Баховцев И.А., 2022

© Севостьянов Н.А., 2022

Поступила в редакцию 14.09.2022

Received 14.09.2022

Библиографический список

- [1] Иванчин И.И. Применение активного выпрямителя в электроэнергетических системах // Международ. науч.-тех. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения)», Май 31 – Июнь 2, 2017, Иваново, Россия: ИГЭУ, 2017. Т. 1. С. 346-350.
- [2] Кириенко В.П., Слепченков М.Н. Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажения в системах питания с управляемыми выпрямителями // Электричество. 2006. № 11. С. 33-40.
- [3] Балабанов М.С., Хамитов Р.Н. Facts-устройства. Выбор при проектировании электрооборудования предприятий. Омск: ОмГТУ, 2015. – 184 с.
- [4] Хорошев М.А., Харитонов С.А. Анализ динамических процессов в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты для летательных аппаратов // Доклады Томского Государственного Университета Систем Управления и Радиоэлектроники. 2019. № 22 (3). С. 103-110. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110
- [5] Вилков А.Е. Исследование и разработка трехфазных активных выпрямителей с пофазным управлением: автореф. дис. канд. техн. наук, НИУ «МЭИ», Москва, 2013. – 20 с.
- [6] Haroun R., El Aroudi A., Cid-Pastor A., Martinez-Salamero L. Stability issues in cascade connected switching converters for DC microgrid applications // proc. 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), May 19-23, 2013, Beijing, China. DOI: 10.1109/ISCAS.2013.6572098

- [7] Riccobono A., Santi E. Comprehensive review of stability criteria for DC distribution systems // in proc. 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA. P. 3917-3925. DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342299
- [8] Александров И.В. Разработка активного выпрямителя напряжения с учетом требований к выходному импедансу преобразователя // IEEE XXII Межд. конф. мол. спец. в области электронных приборов и материалов (EDM 2021), Июнь 30 - Июль 4, 2021, Ая, Россия. Ая: НГТУ, 2021. С. 379-384.
- [9] Мишин В.Н., Пчельников В.А., Лушпин Г.А. Устройство управления трехфазным активным выпрямителем, Пат. 142859 RU, заявл. 03.02.14; опубл. 10.07.14. – Бюл. № 19.
- [10] Erickson R.W., Maksimovic D. Fundamentals of power electronics. 3rd ed. Springer Cham, 2020. – P. 250-255. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4
- [11] Corradini L., Maksimovic D., Mattavelli P., Zane R. Digital control of high-frequency switched-mode power converters. Wiley-IEEE Press, 2015. – P. 66-70.
- [12] Лазарева Н.М. Экспериментальное определение передаточных функций объектов управления // Вестник Чувашского университета. 2022. № 1. С. 73-87. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-73-87

References

- [1] I.I. Ivanchin, “Active rectifier application in electric power system”, in proc. *Sostojanie i perspektivy razvitiya jelektro- i teplo-tehnologii (XIX Benardosovskie chtenija) [Condition and prospects of development of electrical and thermal technologies]*, May 31 – June 2, 2017, Ivanovo, Russia, vol. 1, pp. 346-350 (in Russian).
- [2] V.P. Kiriyenko and M.N. Slepchenkov, “An integrated device for compensating reactive power and distortion power in power supply systems with controlled rectifiers”, *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 33-40, 2006.
- [3] M.S. Balabanov and R.N. Hamitov, *Facts-ustrojstva. Vybor pri proektirovanii elektrooborudovaniya predpriyatij [Facts devices. The choice in the design of electrical equipment of enterprises]*. Omsk: OmSTU, 2015 (in Russian).
- [4] M.A. Khoroshev and S.A. Kharitonov, “Analysis of dynamic processes in the electric power generating system of variable frequency for aircrafts”, *Proceedings of the TUSUR University*, vol. 22, no. 3, pp. 103-110, 2019. DOI: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110
- [5] A.E. Vilkov, “*Issledovanie i razrabotka tryohfaznykh aktivnykh vypryamitelej s pofaznym upravleniem [Research and development of three-phase active rectifiers with phase-by-phase control]*”, Cand. of Tech. S. thesis, MPEI, Moscow, Russia, 2013 (in Russian).
- [6] R. Haroun, A. El Aroudi, A. Cid-Pastor and L. Martinez-Salamero, “Stability issues in cascade arced switching converters for DC microgrid applications”, in proc. *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, May 19-23, 2013, Beijing, China. DOI: 10.1109/ISCAS.2013.6572098
- [7] A. Riccobono and E. Santi, “Comprehensive review of stability criteria for DC distribution systems”, in proc. *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sep. 15-20, 2012, Raleigh, NC, USA, pp. 3917-3925.

DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342299

- [8] I.V. Aleksandrov, “*Razrabotka aktivnogo vypryamatelya napryazheniya s uchetom trebovaniy k vyhodnomu impedansu preobrazovatelya [Development of an active voltage rectifier taking into account the requirements for the output impedance of the converter]*”, in proc. *IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, June 30 – July 4, 2021, Aya, Russia, pp. 379-384 (in Russian).
- [9] V.N. Mishin, V.A. Pchel'nikov and G.A. Lushpin, “*Ustrojstvo upravleniya trekhfaznym aktivnym vypryamitelem [Three-phase active rectifier control device]*”, Patent RU 142859, Jul. 10, 2014 (in Russian).
- [10] R.W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*. 3rd ed. Springer Cham, 2020, pp. 250-255. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4
- [11] L. Corradini, D. Maksimovic, P. Mattavelli and R. Zane. *Digital control of high-frequency switched-mode power converters*. Wiley-IEEE Press, 2015, pp. 66-70.
- [12] N.M. Lazareva, “*Experimental determination of transfer functions of control objects*”, *Bulletin of the Chuvash University*, no. 1, pp. 73-87, 2022. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-1-73-87

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александров Иван Викторович, аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Ivan V. Alexandrov, postgraduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Нос Олег Викторович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Oleg V. Nos, D. Sci. (Eng.), professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Баховцев Игорь Анатольевич, доктор технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Igor A. Bakhovtsev, D. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

Севостьянов Никита Алексеевич, аспирант Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

Nikita A. Sevostyanov, postgraduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

СИСТЕМА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ ТЯГОВОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Н.В. Чуприна

ORCID: 0000-0001-8915-0926 e-mail: nikochuprina212@yandex.ru

Брянский государственный технический университет

Брянск, Россия

А.А. Пугачев

ORCID: 0000-0002-1836-0923 e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

Брянский государственный технический университет

Брянск, Россия

Показана актуальность применения тяговых синхронных двигателей с постоянными магнитами. Приведен обзор научных исследований в области разработок систем управления тяговых электроприводов с двигателями переменного тока, который показал, что система прямого управления моментом в наиболее полной степени удовлетворяет предъявляемым требованиям с точки зрения быстродействия и возможности по энергоэффективности. На основе методов теории электропривода разработаны эквивалентная схема замещения и математическая модель синхронного двигателя с постоянными магнитами, учитывающие потери в стали статора, нагрев обмотки меди статора и магнитов ротора. Выполнено компьютерное моделирование электропривода с системой прямого управления моментом, содержащей двухпозиционный регулятор потокосцепления статора и трехпозиционный регулятор момента с гистерезисом, а также таблицу переключения вектора напряжения статора, в программном комплексе *Matlab/Simulink* для синхронного двигателя мощностью 133 кВт. Анализ полученных результатов показал, что за счет выбора и поддержания определенного значения потокосцепления статора, зависящего от текущей нагрузки и температуры узлов двигателя, можно обеспечить снижение потерь мощности в двигателе. Синтезирована алгебраическая зависимость для определения требуемого значения потокосцепления статора для двигателей с равномерным распределением намагниченности в воздушном зазоре между статором и ротором, модифицирована структурная схема прямого управления момента с учетом полученной зависимости. Представлены результаты моделирования электропривода, подтверждающие работоспособность предложенного решения. Анализ полученных результатов, показал, что эффективность предложенного подхода увеличивается с уменьшением момента сопротивления и увеличением температуры узлов двигателя.

Ключевые слова: математическая модель, потери мощности, потокосцепление, температура, тяговый электропривод, эквивалентная схема замещения.

Для цитирования: Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Система прямого управления моментом тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами с минимизацией потерь мощности // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 22-37. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_22

TRACTION PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DIRECT TORQUE CONTROL SYSTEM WITH POWER LOSSES MINIMIZATION

N.V. Chuprina

ORCID: 0000-0001-8915-0926 e-mail: nikochuprina212@yandex.ru

Bryansk State Technical University

Bryansk, Russia

A.A. Pugachev

ORCID: 0000-0002-1836-0923 e-mail: alexander-pugachev@rambler.ru

Bryansk State Technical University

Bryansk, Russia

Abstract. The relevance of traction synchronous motors with permanent magnets is shown. The overview of scientific research in the field of development of traction electric drive control systems with AC motors is presented. It is shown that the direct torque control system meets the most requirements in terms of transient modes, steady states and energy efficiency. Based on the methods of electric drive theory, an equivalent circuit and a mathematical model of a synchronous motor with permanent magnets were developed, taking into account power losses in the stator iron, and heating of the stator winding copper and rotor magnets. A computer simulation of an electric drive with a direct torque control system was performed, comprising a two-position stator flow control and a three-position moment control with hysteresis, as well as a table for switching the stator voltage vector, in the Matlab/Simulink software system for a 133 kW synchronous motor. Analysis of the obtained results showed that by selecting and maintaining a certain value of stator flux linkage, depending on the presented load torque and temperature of the motor components, it is possible to reduce power losses in the motor. Algebraic dependence was synthesized to determine the required value of stator flux linkage with a uniform distribution of magnetization in the air gap between the stator and the rotor, the topology of direct torque control was modified taking into account the obtained dependence. The results of simulation of the electric drive confirming the operability and adequacy of the proposed solution are presented. The analysis of the obtained results showed that the effectiveness of the proposed approach increases with a decrease in the load torque and an increase in the temperature of the motor components.

Keywords: mathematical model, power losses, flux linkage, temperature, traction electric drive, equivalent circuit.

For citation: N.V. Chuprina and A.A. Pugachev, "Traction permanent magnet synchronous motor direct torque control system with power losses minimization", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 22-37, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_22

1. Введение

В настоящее время в тяговых электроприводах на железнодорожном транспорте наибольшее применение получили коллекторные двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (например, на серийных тепловозах 2ТЭ25К^М, ТЭМ18ДМ и электровозах 2ЭС4К) и бесколлекторные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (на серийных тепловозах 2ТЭ25А и электровозах ЭП20, на перспективных тепловозах ТЭМ23, 2ТЭ35А) [1, 2]. Вместе с тем, существуют новые разработки, направленные на использование новых типов двигателей переменного тока в тяговых целях. Одним из них является применение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), апробация которых произведена на электропоездах серии *TGV* и *AGV* производства *Alstom Transport* и тепловозах серии *HD300* производства *Japan Freight Railway* [3]. Внедрению СДПМ в тяговый электропривод способствуют его энергетические и регулировочные характеристики, позволяющие обеспечивать широкий диапазон регулирования частоты вращения с высокими значениями КПД.

Основной задачей тягового электропривода является реализация тягового момента, обеспечивающего процессы трогания, движения и торможения подвижного состава с учетом действующих в электропередаче ограничений. В режиме трогания (разгона) и торможения возможно возникновение нежелательных явлений буксования и юза, при которых нарушается пропорциональная зависимость между линейной скоростью подвижного состава и частотой вращения приводных колес. Для уменьшения вероятности возникновения этих явлений применяют различные методы, заключающиеся в увеличении коэффициента трения между колесом и рельсом посредством подачи песка в зону их контакта (для тепловозов) или пропусканием электрического тока через контакт (для электровозов). Дополнительно к этому может применяться высокودинамичное регулирование момента тягового двигателя, позволяющее поддерживать силу тяги на требуемом уровне. Таким образом, к системе управления тягового электропривода предъявляются жесткие требования по обеспечению быстродействия и точности регулирования момента в переходных процессах.

После выхода в установившийся (квазиустановившийся) режим работы актуальность приобретают вопросы повышения энергоэффективности работы электропривода, так как уменьшение потерь мощности в тяговом двигателе приводит не только к уменьшению расхода электроэнергии (дизельного топлива) на тяговые нужды, но и к уменьшению нагрева обмоток двигателя, что позволяет перевести в частичные режимы работы систему

его охлаждения. Поэтому к системе управления также предъявляются требования по обеспечению работы двигателя в режиме с минимумом потерь мощности (или минимумом тока статора).

Анализ современных систем управления показывает, что требованиям тягового электропривода в наибольшей степени удовлетворяют системы векторного управления и прямого управления моментом, позволяющие поддерживать высокие значения КПД во всем диапазоне регулирования [1, 3-8]. Классические системы векторного управления, тем не менее, построены таким образом, что требуемые характеристики реализуются за счет организации контуров регулирования токов статора в ортогональной системе координат, непосредственно контур регулирования момента отсутствует, что накладывает некоторые ограничения на качество его регулирования. Системы прямого управления моментом лишены этого недостатка: вместо контуров тока они используют замкнутый контур регулирования момента, что позволяет получать требуемые показатели качества его регулирования.

В данной статье авторами поставлена задача синтеза и исследования системы прямого управления моментом СДПМ, обеспечивающей высокодинамичное регулирование момента и минимизацию потерь мощности в установившихся режимах работы. Для достижения указанной цели применены методы теории электропривода, решения алгебраических и дифференциальных уравнений, компьютерного моделирования.

II. Математическая модель СДПМ

Математическое описание процессов СДПМ осуществим на основе эквивалентной схемы замещения, представленной в работе [4]. При составлении этой модели были приняты следующие допущения и ограничения: нелинейные магнитные процессы в стали отсутствуют, магнитная цепь статора ненасыщенной; реальная распределенная обмотка статора заменяется сосредоточенной; поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие, воздушный зазор равномерен; магнитодвижущие силы распределяются в воздушном зазоре синусоидально; магнитная проводимость по внутреннему диаметру статора постоянна и не зависит от положения ротора, все параметры ее линейные. Основным недостатком схемы [4] является учет потерь только в меди обмотки статора. Однако потери в СДПМ образуются не только за счет потерь в меди обмотки, но также и в стали сердечника статора. Для исследования количественного распределения данных потерь в двигателе и их влияния на динамические и статические показатели необходима электромеханическая модель СДПМ, учитывающая потери в стали. Выполнить учет потерь в стали можно за счет включения эквивалентного сопротивления сердечника r_i либо последовательно индук-

тивности намагничивания [9], либо параллельно [10]. При сравнении с математическим описанием процессов в асинхронном двигателе второй вариант оказывается предпочтительным, поскольку позволяет лучше передать электромагнитные процессы в двигателе, тем самым предоставляя возможность корректно оценить потери в стали. Недостатком параллельного включения эквивалентного сопротивления в сердечнике по сравнению с последовательным является увеличение числа переменных. Эквивалентная схема замещения СДПМ с параллельно включенным сопротивлением r_i в осях dq , вращающихся с частотой вращения ротора, без учета потерь на рассеяние представлена на рис. 1.

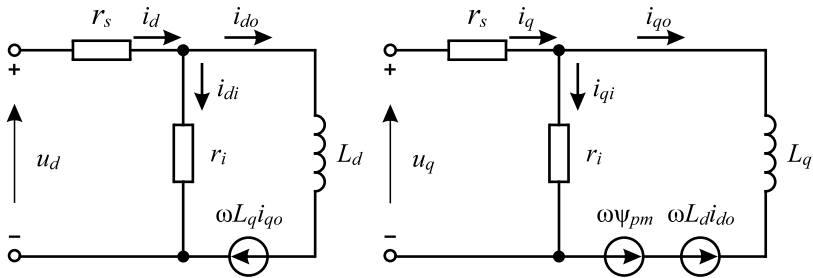


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения СДПМ с учетом потерь в стали в осях dq

Fig. 1. Equivalent circuit of permanent magnet synchronous motor taking into account power losses in iron in dq axis

Эквивалентная схема замещения СДПМ (рис. 1) может быть представлена в следующем виде:

$$u_d = r_s i_d + L_d \frac{di_{do}}{dt} - \omega L_q i_{qo}; \quad (1)$$

$$u_q = r_s i_q + L_q \frac{di_{qo}}{dt} + \omega \psi_{pm} + \omega L_d i_{do}, \quad (2)$$

где u_d и u_q – напряжение статора в осях d и q ; L_d и L_q – индуктивности статора в осях d и q ; i_d и i_q – токи статора в осях d и q ; i_{do} и i_{qo} – токи намагничивания статора в осях d и q ; ω – электрическая частота вращения поля статора; ψ_{pm} – потокосцепление постоянных магнитов.

Токи статора i_d и i_q , представленные в (1) и (2), согласно первому закону Кирхгофа, могут быть представлены:

$$i_d = i_{do} + i_{di}; \quad (3)$$

$$i_q = i_{qo} + i_{qi}, \quad (4)$$

где i_{di} и i_{qi} – токи в ветвях с сопротивлением r_i в осях d и q .

Токи i_{di} и i_{qi} в (3) и (4) рассчитываются следующим образом:

$$i_{di} = -\frac{\omega L_q i_{qo}}{r_i}; \quad (5)$$

$$i_{qi} = \frac{\omega \Psi_{pm} + \omega L_d i_{do}}{r_i}. \quad (6)$$

Потокоцепления Ψ_d и Ψ_q в осях d и q в математической модели СДПМ с учетом потерь в стали могут быть представлены в следующей форме:

$$\Psi_d = \Psi_{pm} + L_d i_{do}; \quad (7)$$

$$\Psi_q = L_q i_{qo}. \quad (8)$$

Электромагнитный момент M двигателя с гладким ротором выражается следующим образом:

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_{pm} i_{qo}, \quad (9)$$

где p – число пар полюсов СДПМ.

Потери в меди и стали статора СДПМ ΔP_m и ΔP_c вычисляются следующим образом:

$$\Delta P_m = \frac{3}{2} r_s (i_d^2 + i_q^2); \quad (10)$$

$$\Delta P_c = \frac{3}{2} r_s (i_{di}^2 + i_{qi}^2). \quad (11)$$

Рассматриваемые суммарные потери мощности ΔP_Σ в двигателе есть сумма ΔP_m и ΔP_c .

Контроль и регулирование температуры обмоток статора СДПМ является важным фактором корректной работы двигателя для реализации желаемых энергетических и электромеханических характеристик. СДПМ

имеют небольшие массогабаритные показатели, из-за чего влияние теплового состояния имеет больший эффект, чем для асинхронных двигателей. Повышение температуры в обмотке меди статора приводит к повышению температуры постоянных магнитов ротора за счет процессов переноса тепла, что вызывает уменьшение магнитного потока, формируемого ротором, тем самым увеличивается ток в статоре двигателя (при неизменной нагрузке на валу), что приводит к еще большим потерям и нагреву. Кроме того, даже кратковременное увеличение температуры магнитов выше предельно допустимых значений может привести к их невозвратному размагничиванию, что влечет за собой останов электропривода [11, 12].

Температурная зависимость сопротивления обмоток двигателя отражается в удельном электрическом сопротивлении медного проводника, которое изменяется в зависимости от температуры. Учет влияния изменения температуры в обмотке статора и потокоцепления постоянных магнитов ротора можно произвести следующим образом [11-13]:

$$\begin{aligned} r_T &= r_{20} [1 + \alpha(T - 20)]; \\ \psi_{pmT} &= \psi_{pm20} [1 + \beta(T - 20)], \end{aligned} \quad (12)$$

где T – температура соответствующего узла СДПМ; r_T , ψ_{pmT} – сопротивление обмотки статора и потокоцепление постоянных магнитов ротора, соответственно, при температуре T ; α , β – температурные коэффициенты сопротивления обмотки статора и магнитов ротора, соответственно (для меди – $\alpha=0,004$ 1/°C, для NdFeB (магнитный материал) $\beta = 0,0011$ 1/°C); r_{20} , ψ_{pm20} – сопротивление обмотки статора и потокоцепление постоянных магнитов, соответственно, при $T = 20^\circ\text{C}$.

III. Модель системы прямого управления моментом

Классическая система прямого управления моментом асинхронного двигателя, впервые разработанная *I. Takahashi*, *T. Noguchi* и *M. Depenbrock* [14, 15], за счет применения релейных регуляторов момента и потокоцепления позволяет обеспечить высокодинамичное регулирование момента при более простой относительно системы векторного управления структуре. В настоящее время система прямого управления моментом получила применение для управления и другими двигателями переменного тока, включая СДПМ [6]. В данной работе для управления СДПМ в качестве базовой использована система прямого управления моментом, структура которой показана на рис. 2. Здесь и далее надстрочным индексом * обозначается сигнал задания на соответствующие величины.

Расчет потокоцепления статора двигателя в системе управления выполняется следующим образом:

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2}, \quad (13)$$

где Ψ_α – потокосцепление обмотки статора по оси α ; Ψ_β – потокосцепление обмотки статора по оси β .

Перевод токов статора из трехфазной неподвижной системы координат ABC в двухфазную неподвижную систему $\alpha\beta$ хорошо известен, перевод из $\alpha\beta$ в двухфазную вращающуюся систему координат dq подробно представлен в [4]. Таблица выбора оптимального напряжения является аналогичной таблице для электроприводов с асинхронными двигателями [14, 15]. В контуре регулирования потокосцепления статора использовано двухпозиционное реле, в контуре регулирования момента – трехпозиционное реле с гистерезисом. Контур момента подчинен внешнему контуру частоты вращения (на рис. 2 не показан), выполненному по принципу рассогласования сигналов задания и обратной связи. В контуре частоты вращения – пропорционально-интегральный регулятор с ограничением максимального и минимального значений выходного сигнала задания момента M^* .

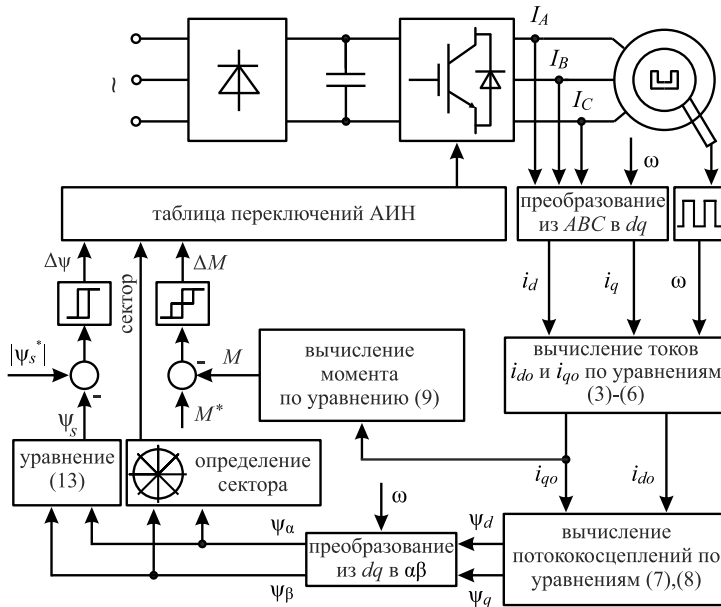


Рис. 2. Структурная схема электропривода с системой прямого управления моментом СДПМ

Fig. 2. Electric drive topology with direct torque control of PMSM

IV. Результаты моделирования электропривода с системой прямого управления моментом

Исследование электропривода с системой прямого управления моментом с СДПМ осуществлено в программном комплексе *Matlab* с использованием пакета *Simulink*. Параметры СДПМ в номинальном режиме работы: мощность $P = 133$ кВт, механическая частота вращения $\omega_{\text{мех}} = 314$ рад/с, $p = 2$, напряжение звена постоянного $U_{dc} = 540$ В, $r_s = 0,013$ Ом, $L_d = 0,0008673$ Гн, $L_q = 0,0008673$ Гн, потокосцепление постоянных магнитов ротора $\psi_{pm} = 0,3469$ Вб, суммарный момент инерции механической части электропривода $J = 4$ кг·м². Параметры регулятора частоты вращения: пропорциональная составляющая – 100 Нм/(рад/с), постоянная времени интегрирования – 0,01 с, ширина петли гистерезиса регулятора момента 15 Нм. Некоторые результаты моделирования в части распределения потерь мощности показаны на рис. 3.

Анализ потерь мощности в стали ΔP_c показал, что наибольшее влияние на их значение оказывает частота тока статора (частота вращения ротора), – зависимость потерь ΔP_c от потокосцепления статора ψ_s представлена на рис. 3, а, она носит монотонный характер. С увеличением потокосцепления ψ_s растет влияние частоты вращения ω на величину потерь ΔP_c . Изменение момента сопротивления M_c на потери в стали не оказывает влияния (во всем диапазоне изменения момента сопротивления M_c (и выше, и ниже номинального значения момента СДПМ $M_{\text{ном}}$) потери в стали ΔP_c изменяются менее, чем на 1 %). Изменение температуры меди обмоток и стали статора не оказывает значительного воздействия на потери в стали при частотах тока статора порядка десятков и сотен Гц [12]. Исследуемый диапазон изменения частот тока статора – 10...100 Гц, поэтому зависимость потерь ΔP_c от температуры также отсутствует.

Зависимость потерь в меди ΔP_m от потокосцепления ψ_s (рис. 3, б) носит экстремальный характер, что напрямую указывает на возможность снижения потерь за счет выбора оптимального с точки зрения потерь потокосцепления статора. Данная задача будет решена в следующем разделе статьи. Анализ результатов моделирования показывает, что с уменьшением нагрузки уменьшается оптимальное значение потокосцепления, увеличивая эффект от его регулирования. Это ограничивает данный способ уменьшения потерь значениями момента сопротивления ниже номинального момента СДПМ, так как в обратном случае достижению оптимального потокосцепления препятствует насыщение магнитной цепи. Для наглядности на рис. 3, б и далее показаны зависимости при моментах, меньших $M_{\text{ном}}$.

Экстремальный характер с ярко выраженным минимумом также имеет зависимость суммарных потерь ΔP_{Σ} от потокосцепления ψ_s (рис. 3, в), качественно не имеющая существенных отличий от зависимости (рис. 3, б).

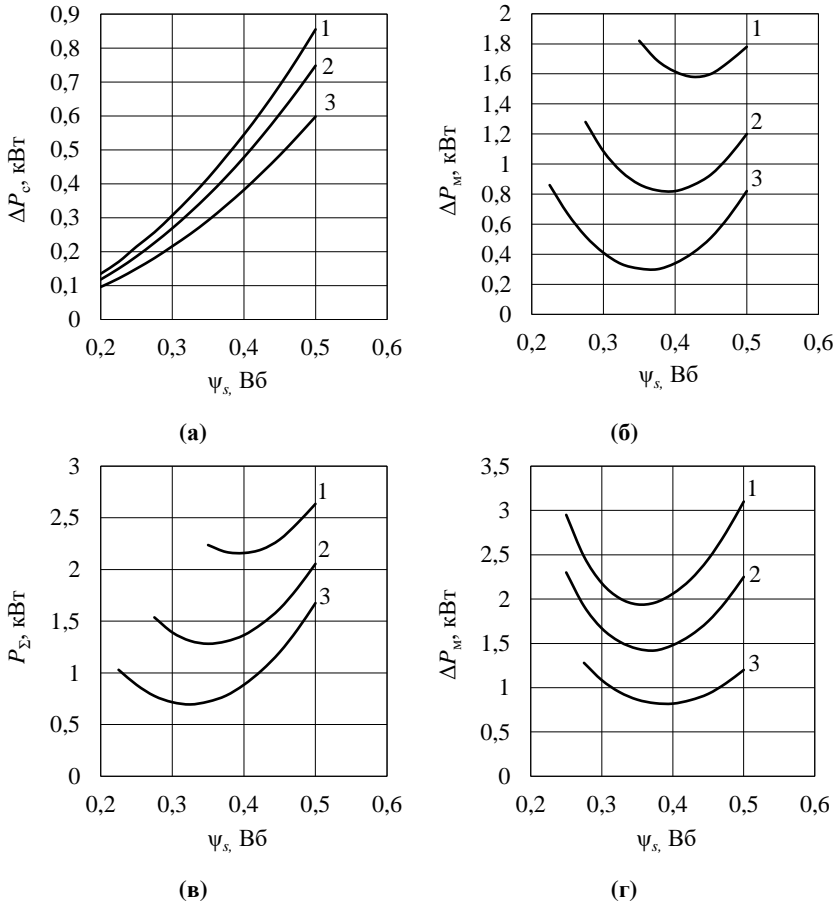


Рис. 3. Зависимости потерь мощности ΔP_{Σ} , ΔP_c и ΔP_M от потока сцепления статора ψ_s :

- (а): $M_c = 0,5M_{ном}$, $T_{обм} = 20$ °C: 1 – $\omega = \omega_{ном}$, 2 – $\omega = 0,75\omega_{ном}$, 3 – $\omega = 0,5\omega_{ном}$;
 (б): $\omega = 0,5\omega_{ном}$, $T_{обм} = 20$ °C: 1 – $M_c = 0,7M_{ном}$, 2 – $M_c = 0,5M_{ном}$, 3 – $M_c = 0,3M_{ном}$;
 (в): $\omega = \omega_{ном}$, $T_{обм} = 20$ °C: 1 – $M_c = 0,7M_{ном}$, 2 – $M_c = 0,5M_{ном}$, 3 – $M_c = 0,3M_{ном}$;
 (г): $\omega = 0,5\omega_{ном}$, $T_{обм} = 20$ °C, $M_c = 0,5M_{ном}$: 1 – $T_{обм} = 180$ °C, 2 – 120 °C, 3 – 20 °C

Fig. 3. Power losses ΔP_{Σ} , ΔP_c and ΔP_M vs. stator flux linkage:

- (a) $M_c = 0,5M_{rat}$, $T_{win} = 20$ °C: 1 – $\omega = \omega_{rat}$, 2 – $\omega = 0,75\omega_{rat}$, 3 – $\omega = 0,5\omega_{rat}$;
 (b) $\omega = 0,5\omega_{rat}$, $T_{win} = 20$ °C: 1 – $M_c = 0,7M_{rat}$, 2 – $M_c = 0,5M_{rat}$, 3 – $M_c = 0,3M_{rat}$;
 (c) $\omega = \omega_{rat}$, $T_{win} = 20$ °C: 1 – $M_c = 0,7M_{rat}$, 2 – $M_c = 0,5M_{rat}$, 3 – $M_c = 0,3M_{rat}$;
 (d) $\omega = 0,5\omega_{rat}$, $T_{win} = 20$ °C, $M_c = 0,5M_{rat}$: 1 – $T_{win} = 180$ °C, 2 – 120 °C, 3 – 20 °C

Влияние температуры обмоток статора и магнитов ротора на потери в меди проиллюстрированы на рис. 3, г. Анализ исследований теплового состояния СДПМ показал, что чаще всего в нагретом состоянии температура магнитов на 2-15 % меньше температуры обмотки статора, поэтому при моделировании электропривода при температуре обмоток $T_{обм} = 120$ °С и $T_{обм} = 180$ °С температура магнитов принималась 108 и 162 °С соответственно. Полученные результаты соответствуют рассуждениям, приведенным в разделе II.

V. Оптимизация задания потокосцепления

В данном разделе решена задача по минимизации потерь мощности в меди обмотки статора. Поскольку система прямого управления моментом имеет контур регулирования потокосцепления статора, данная задача сводится к определению требуемого задания на потокосцепление при текущем моменте сопротивления.

Необходимо отметить, что для системы прямого управления СДПМ определение потокосцепления, обеспечивающего минимум потерь мощности в меди, имеет отличия в зависимости от конструкции ротора двигателя. Приведем расчеты для СДПМ с магнитами поверхностного монтажа, обеспечивающими равномерный воздушный зазор между статором и ротором (то есть $L_d = L_q$). Приняв, что минимум потерь мощности в меди соответствует минимуму тока статора, задание на модуль вектора потокосцепления статора на основе принципа минимума тока статора для реализации заданного момента может быть вычислено на основании уравнений потокосцеплений и момента:

$$\overline{\psi}_s = L_s \overline{i}_s + \psi_{pm} e^{j\theta_e}; \quad (14)$$

$$M = \frac{3}{2} p \operatorname{Im}(\overline{\psi}_s \overline{i}_s), \quad (15)$$

где ψ_s – вектор потокосцепления статора; i_s – вектор тока обмотки статора; θ_e – электрический угол положения ротора; L_s – индуктивность статора ($L_s = L_d = L_q$).

Тогда, на основании уравнений (14) и (15), задание на потокосцепление статора при определенном моменте может вычисляться как:

$$|\psi_s^*| = \sqrt{\psi_{pm}^2 + \left(\frac{L_s M^*}{\frac{3}{2} p \psi_{pm}} \right)}. \quad (16)$$

Таким образом, структурная схема (рис. 2) изменится лишь в части добавления функциональной зависимости задания потокосцепления $|\psi_s^*|$ от задания момента M^* .

VI. Результаты моделирования электропривода с системой прямого управления моментом с минимизацией потерь мощности

Сравнительные результаты моделирования электропривода с учетом изменений, показанных в схеме, приведены для температуры обмотки статора и магнитов ротора $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4). Очевидно, что механические характеристики СДПМ идентичны при применении двух способов задания потокосцепления, т.е. временные зависимости частоты вращения ω (рис. 4, а) и момента M (рис. 4, б) одинаковы для двух систем управления. Благодаря наличию интегральной составляющей в регуляторе частоты вращения, система прямого управления моментом обеспечивает нулевую ошибку регулирования частоты вращения при работе под нагрузкой в установившихся режимах работы. Время регулирования в контуре момента составляет 1,2 мс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тяговому электроприводу по показателям быстродействия. Зависимость потокосцепления (рис. 4, в) показывает работоспособность синтезированного уравнения (16) – уменьшение момента сопротивления приводит к уменьшению потокосцепления. Эффект энергосбережения нагляден на временных зависимостях модуля вектора тока I_s (рис. 4, г): в режиме холостого хода разница токов составляет 165 А, при $M_c = 0,3M_{\text{ном}} - 75$ А, при $M_c = 0,5M_{\text{ном}} - 40$ А, при $M_c = 0,7M_{\text{ном}} - 20$ А. Потери мощности в меди для классической системы управления равняются значениям на графике (рис. 3, б) при $\psi_s = \psi_{s,\text{ном}} = 0,49$ Вб; для системы управления с учетом (16) потери мощности в меди равняются значениям на графике (рис. 3, б) при $\psi_s = 0,45$ Вб (для $M_c = 0,7M_{\text{ном}}$), при $\psi_s = 0,4$ Вб (для $M_c = 0,5M_{\text{ном}}$), при $\psi_s = 0,37$ Вб (для $M_c = 0,3M_{\text{ном}}$). Снижение потерь мощности в меди составляет: 0,18 кВт или 10% (для $M_c = 0,7M_{\text{ном}}$), 0,38 кВт или 31% (для $M_c = 0,5M_{\text{ном}}$), 0,52 кВт или 63% (для $M_c = 0,3M_{\text{ном}}$).

Проведено моделирование при повышенных температурах, результаты которого показали увеличение количественной разницы потерь мощности (рис. 3, г).

VII. Выводы

На основе анализа в качестве системы управления тяговым СДПМ выбрана система прямого управления моментом, обеспечивающая высокодинамичное регулирование момента тягового двигателя, что является критичным для реализации пусковых и тормозных режимов работы подвижного состава. В результате анализа алгебраических уравнений потокосцепления и момента СДПМ синтезирована формула определения задания потокосцепления для двигателей с равномерным воздушным зазором между статором и ротором, обеспечивающая уменьшение тока статора и, соответственно, потерь мощности. Наибольший эффект от ее применения достигается при пониженных нагрузках (для СДПМ мощностью 133 кВт снижение

потерь составило 0,52 кВт, что составляет 13,7 % от потерь мощности в номинальном режиме, при $M_c = 0,3 M_{ном}$ и 0,18 кВт при $M_c = 0,7 M_{ном}$.

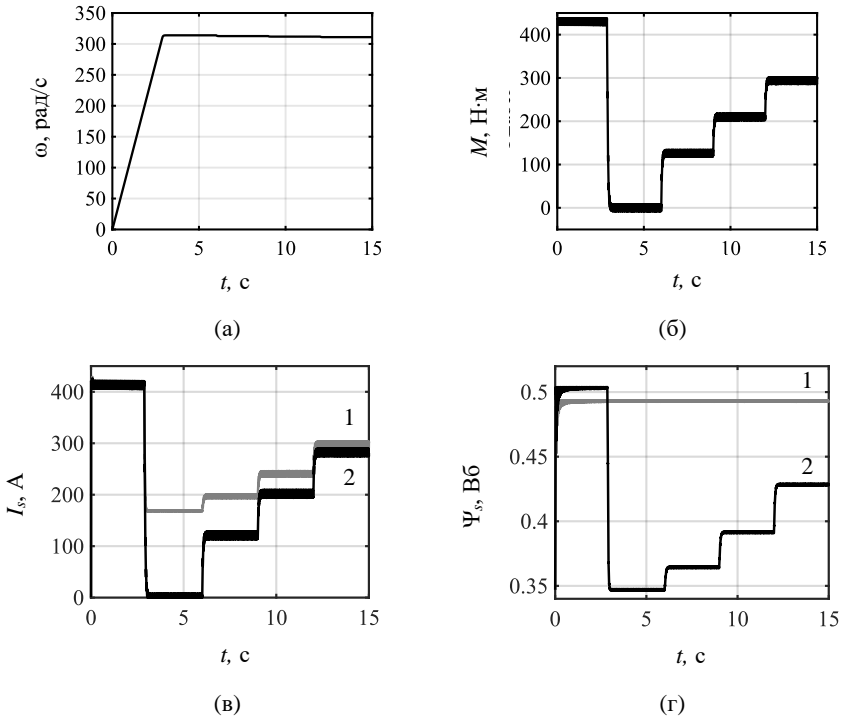


Рис. 4. Зависимости частоты вращения:

ω (а), момента M (б), модуля вектора тока статора I_s (в), потокосцепления ψ_s (г) от времени t : 1 – классическая система прямого управления моментом с $|\psi_s^| = \psi_{s,ном}$ (рис. 2), 2 – система прямого управления моментом с $|\psi_s^*|$, определяемой по (16)*

Fig. 4. Speed dependencies:

ω (a), torque M (b), stator current vector module I_s (c), flux linkage ψ_s (d) vs. time t : 1 – classical direct torque control system with $|\psi_s^| = \psi_{s,rat}$ (Fig. 2), 2 – direct torque control system with $|\psi_s^*|$ determined by (16)*

Также эффект увеличивается при повышении температуры узлов СДПМ. При превышении моментом номинального значения возможности энергосбережения ограничены насыщением кривой намагниченности, поэтому предложенный метод целесообразно применять только в зоне частичных нагрузок.

© Чуприна Н.В., 2022

© Пугачев А.А., 2022

Поступила в редакцию 27.09.2022

Received 27.09.2022

Библиографический список

- [1] Воробьев В.И., Пугачев А.А., Копылов С.О., Николаев Е.В. Метод объектного моделирования при разработке патентоспособных конструкций узлов тягового привода // Автоматизация и Моделирование в Проектировании и Управлении. 2021. № 3-4(13-14). С. 4-13. DOI: 10.30987/2658-6436-2021-3-4-4-13
- [2] Журавлев С.Н. Система управления силовой установкой маневрового теплового двигателя с алгоритмом автоматического регулирования скорости // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2021. № 3-4 (13-14). С. 31-38. DOI: 10.30987/2658-6436-2021-3-4-31-38
- [3] Sharma R.K., Sanadhya V., Behera L. Bhattacharya S. Vector control of a permanent magnet synchronous motor // in proc. 2008 Annual IEEE India Conference, Dec. 11-13, 2008, Kanpur, India. P. 81-86. DOI: 10.1109/INDCON.2008.4768805
- [4] Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами // Электротехнические Системы и Комплексы. 2022. № 2 (55). С. 10-17. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17
- [5] Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications // proc. IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dec. 18, 2017, Beijing, China. P. 6607-6611. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217153
- [6] Zhang Y., Zhu J. A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. № 26 (10). P. 3055-3067. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2129577
- [7] Попов А.А., Онищенко Г.Б., Гуляев И.В. Анализ быстродействия системы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором с оптимизацией по минимуму тока статора // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 2 (18). С. 4-15. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_2_04
- [8] Муртазин Т.Э., Титов В.Г. Синхронный электропривод с векторным управлением // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2 (14). С. 41-52. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_41
- [9] Shutta Y., Takahashi Y., Fujiwara K. Behavioral modeling of permanent magnet synchronous motor fed by PWM inverters considering iron losses due to carrier harmonics // Electrical Engineering in Japan. 2020. № 210 (1). P. 1-10. DOI: 10.1002/ej.23265
- [10] Urasaki N., Senjyu T., Uezato K. Relationship of parallel model and series model for permanent magnet synchronous motors taking iron loss into account // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2004. № 19 (2). P. 265-270. DOI: 10.1109/TEC.2004.827291

- [11] Chen S., Zhang Q., He B., Huang S., Hui D.-D. Thermal analysis of high density permanent magnet synchronous motor based on multi physical domain coupling simulation // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2017. № 12 (1). P. 91-99. DOI: 10.5370/JEET.2017.12.1.091
- [12] Chen X., Wang J., Griffio A. A high-fidelity and computationally efficient electrothermally coupled model for interior permanent-magnet machines in electric vehicle traction applications // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2015. № 1 (4). P. 336-347. DOI: 10.1109/TTE.2015.2478257
- [13] Jercic T., Zarko D., Martinovic M., Kovacic M., Jiric J., Hanic Z., Stipetic S. Centrifugal fan design for permanent magnet synchronous motor in a traction application // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), May 21-24, 2017, Miami, FL, USA: IEEE, 2017. P. 1-7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002227
- [14] Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986. № IA-22 (5). P. 820-827. DOI: 10.1109/TIA.1986.4504799
- [15] Depenbrock M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1988. № 3 (4). P. 420-429. DOI: 10.1109/63.17963

References

- [1] V.I. Vorob'ev, A.A. Pugachev, S.O. Kopylov and E.V. Nikolaev, "The method of object modeling in the development of patentable designs of traction drive mechanisms", *Automation and Modeling in Design and Management*, no. 3-4(13-14), pp. 4-13, 2021. DOI: 10.30987/2658-6436-2021-3-4-4-13
- [2] S.N. Zhuravlev, "Power equipment control system of a shunting locomotive with automatic speed control algorithm", *Automation and modeling in design and management*, no. 3-4 (13-14), pp. 31-38. DOI: 10.30987/2658-6436-2021-3-4-31-38
- [3] R.K. Sharma, V. Sanadhya, L. Behera and S. Bhattacharya, "Vector control of a permanent magnet synchronous motor", in proc. *2008 Annual IEEE India Conference*, Dec. 11-13, Kanpur, India, pp. 81-86. DOI: 10.1109/INDCON.2008.4768805
- [4] N.V. Chuprina, A.A. Pugachev, "Simulation of traction permanent magnet synchronous motor vector control system", *Electrotechnical Systems and Complexes*, no. 2 (55), pp. 10-17, 2022. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17
- [5] M. Lashkevich, A. Anuchin, D. Aliamkin and F. Briz, "Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications", in proc. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dec. 18, 2017, Beijing, China, pp. 6607-6611. DOI: 10.1109/IECON.2017.8217153
- [6] Y. Zhang and J. Zhu, "A novel duty cycle control strategy to reduce both torque and flux ripples for DTC of permanent magnet synchronous motor drives with switching frequency reduction", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 10, pp. 3055-3067, Oct. 2011. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2129577
- [7] A.A. Popov, G.B. Onishchenko and I.V. Gulyaev, "Analysis of performance of control system for squirrel-cage induction motor with optimization for minimum of stator current", *Smart Electrical Engineering*, vol. 2, no. 18, pp. 4-15, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_04

- [8] T.E. Murtazin and V.G. Titov, “Synchronous electric drive with vector control”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 2, no. 14, pp. 41-52, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_41
- [9] Y. Shutta, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, “Behavioral modeling of permanent magnet synchronous motor fed by PWM inverters considering iron losses due to carrier harmonics”, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 210, no. 1, pp. 1-10, March 2020. DOI: 10.1002/ej.23265
- [10] N. Urasaki, T. Senjyu and K. Uezato, “Relationship of parallel model and series model for permanent magnet synchronous motors taking iron loss into account”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 265-270, Jun. 2004. DOI: 10.1109/TEC.2004.827291
- [11] S. Chen, Q. Zhang, B. He, S. Huang and D.-D. Hui, “Thermal analysis of high density permanent magnet synchronous motor based on multi physical domain coupling simulation”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 91-99, June 2017. DOI: 10.5370/JEET.2017.12.1.091
- [12] X. Chen, J. Wang and A. Griffio, “A high-fidelity and computationally efficient electrothermally coupled model for interior permanent-magnet machines in electric vehicle traction applications”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 4, pp. 336-347, Dec. 2015. DOI: 10.1109/TTE.2015.2478257
- [13] T. Jercic, D. Zarko, M. Martinovic, M. Kovacic, J. Jiric, Z. Hanic and S. Stipetic, “Centrifugal fan design for permanent magnet synchronous motor in a traction application”, in proc. *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, May 21-24, 2017, Miami, FL, USA, pp. 1-7. DOI: 10.1109/IEMDC.2017.8002227
- [14] I. Takahashi and T. Noguchi, “A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 5, pp. 820-827, Sept. 1986. DOI: 10.1109/TIA.1986.4504799
- [15] M. Depenbrock, “Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 420-429, Oct. 1988. DOI: 10.1109/63.17963

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чуприна Николай Валентинович, аспирант Брянского государственного технического университета, г. Брянск, Российская Федерация

Nikolay V. Chuprina, postgraduate student of the Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

Пугачев Александр Анатольевич, доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, г. Брянск, Российская Федерация

Alexander A. Pugachev, D. Sci. (Eng.), associate professor of the Bryansk State Technical University, Bryansk, Russian Federation

УДК 621.313.333

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_38

МЕТОДИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

К.Е. Кононенко

ORCID: 0000-0002-8958-0499 e-mail: kekononenko@yandex.ru

Воронежский государственный технический университет

*Воронеж, Россия***А.В. Кононенко**

ORCID: 0000-0001-9549-2519 e-mail: anastkononenko@yandex.ru

Воронежский государственный технический университет

Воронеж, Россия

Традиционная методика расчета асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором основана на круговых диаграммах и схемах замещения, ее погрешность достигает 50 %. Погрешность численного метода конечных элементов сокращается до 1 %. Методику расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно сделать существенно более точной даже без использования методов теории поля в явном виде. Достаточно учесть результаты громоздких и многолетних исследований, которые можно представить в виде ряда таблиц. Если пособия по проектированию асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором дополнить таким приложением, точность расчетов значительно возрастет. Знание площади поперечного сечения алюминия в роторе позволит без дополнительных экспериментальных исследований многократно уточнить получаемый результат.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, конечно-элементный анализ, круговые диаграммы, методика расчета, электромагнитное поле, физическое моделирование.

Для цитирования: Кононенко К.Е., Кононенко А.В. Методика курсового проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 38-42. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_38

METHODOLOGY OF COURSE DESIGN OF ASYNCHRO- NOUS MOTORS WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR

К.Е. Kononenko

ORCID: 0000-0002-8958-0499 e-mail: kekononenko@yandex.ru

Voronezh State Technical University

Voronezh, Russia

A.V. KononenkoORCID: 0000-0001-9549-2519 e-mail: anastkononenko@yandex.ru

Voronezh State Technical University

Voronezh, Russia

Abstract. The traditional method of calculating asynchronous motors is based on pie charts and substitution schemes containing errors exceeding 50%. If the numerical finite element method is applied, the error is reduced to 1%. The calculation methodology of an asynchronous motor with a short-circuited rotor can be made significantly more accurate even without using the methods of field theory explicitly. To do this, it suffices to take into account the results of cumbersome and long-term studies, which can be presented in the form of a series of tables. If manuals for the design of asynchronous squirrel-cage motors are supplemented with such an application, the accuracy of the calculations will increase significantly. Knowing the cross-sectional area of aluminum in the rotor based on the results of our previous studies will allow to repeatedly refine the result obtained without additional experimental studies.

Keywords: asynchronous electric motor, finite element analysis, pie charts, calculation technique, electromagnetic field, physical modeling.

For citation: K.E. Kononenko and A.V. Kononenko, “Methodology of course design of asynchronous motors with a short-circuited rotor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 38-42, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_38

I. Введение

Электрическая машина – неотъемлемая часть энергетических установок [1]. Асинхронные двигатели (АД), как и другие электрические машины, изучаются на электротехнических факультетах многих вузов России, а курсовое проектирование по курсу «Электрические машины» входит в учебные планы специальностей «Электропривод», «Электроснабжение». Статья посвящена методике расчета АД с короткозамкнутым ротором.

Традиционная методика расчета основана на использовании схем замещения и круговых диаграмм, однако погрешности традиционного метода достигают 80 %. Использование метода, основанного на расчете электромагнитного поля, позволяет снизить погрешность до 1 % [2]. Самый эффективный метод расчета поля – численный метод конечных элементов, но для вычислений требуются дорогостоящие программные комплексы и высокопроизводительные компьютеры.

Предлагаемый авторами подход опирается на результаты многолетнего опыта использования метода конечных элементов в расчете АД. Установлено, что, кроме числа пазов статора и ротора, необходимо учитывать и площадь одного паза. Умноженная на число пазов ротора, площадь одного паза даст суммарное сечение проводникового материала в поперечном сечении ротора.

Одним из основных учебников по проектированию АД является [3]. Однако в нем не учтено, что при выборе пазов на АД с беличьей клеткой есть только два основных требования. Во-первых, число пазов ротора не может равняться числу пазов статора, во-вторых, площадь одного паза будет определяться справочными данными, в которых для каждого габарита указаны поперечные сечения алюминия в роторе. Необходимо отметить, что понятие площади паза ранее не применялось. Именно этим объясняется столь большое расхождение расчетов с экспериментами.

Для упрощения задачи расчета АД представлены результаты применения метода конечных элементов в АД. Данные представлены в виде таблицы, а их погрешность составляет не более 2 %. Использование представленных результатов может значительно упростить расчет при решении студентами учебных задач.

II. Справка для студентов, проектирующих АД с короткозамкнутым ротором

В табл. 1 приведены справочные значения, необходимые при проектировании.

Таблица 1.
Справочные данные

Table 1.
Reference data

| Мощность, Вт | Количество полюсов, шт | Диаметр ротора, мм | Воздушный зазор, мм | Площадь алюминия в роторе, мм ² |
|--------------|------------------------|--------------------|---------------------|--|
| 1,5 | 2 | 18 | 0,1 | 43 |
| 120 | 2 | 41 | 0,25 | 237 |
| 3000 | 4 | 105 | 0,3 | 1265 |
| 5500 | 4 | 125 | 0,3 | 1520 |
| 7500 | 4 | 145 | 0,35 | 2014 |
| 11000 | 4 | 145 | 0,35 | 2010 |
| 15000 | 4 | 185 | 0,5 | 2750 |

Выбрав число пазов ротора и зная площадь поперечного сечения алюминия, можно определить площадь одного паза. Таблица позволяет без сложных расчетов электромагнитного поля определить конфигурацию листа ротора и правильно рассчитать энергоэффективного АД.

В качестве примера на рис. 1 приведен лист ротора энергоэффективного АД, который получен в результате расчета электромагнитного поля. Полученный лист отличается от стандартного листа, поскольку задачей исследования являлось создание энергоэффективного АД [4]. На рис. 2 приведен лист ротора стандартного АД.

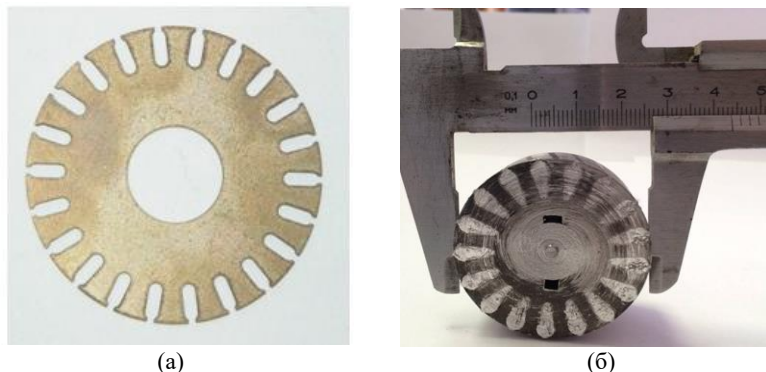


Рис. 1. АД мощностью 120 Вт:
*лист ротора энергоэффективного двигателя (а)
и поперечное сечение ротора стандартного двигателя (б)*

Fig. 1. 120 W induction motor:
(a) rotor leaf of energy efficient motor and (b) rotor cross section of a standard motor

III. Заключение

Курсовое проектирование АД с короткозамкнутым ротором можно выполнить без привлечения сложных программ метода конечных элементов. Для этого следует использовать данные табл. 1. При выборе числа пазов на роторе необходимо принимать во внимание суммарную площадь алюминия обмотки ротора. Для двигателей, мощность которых отлична от параметров, представленных в таблице, следует провести предварительную оценку, которая будет точнее, чем отказ от понятия «площади поперечного сечения проводникового материала обмотки ротора». Данная методика позволяет спроектировать АД без применения сложных расчетов метода конечных элементов.

© Кононенко К.Е., 2022

© Кононенко А.В., 2022

Поступила в редакцию 20.06.2022

Received 20.06.2022

Библиографический список

- [1] Костенко М.П. Электродинамическое моделирование энергетических систем. М.–Л.: АН СССР, 1959. – 406 с.
- [2] Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. – 928 с.
- [3] Копылова И.П. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1980. – 495 с.
- [4] Юрканов В.В. Зубцовые зоны энергоэффективных трехфазных асинхронных

микродвигателей с короткозамкнутым ротором: автореф. дис. канд. тех. наук, МЭИ, Москва, 2015. – 18 с.

- [5] Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
- [6] Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. – 190 с.
- [7] Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радионинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 1986. – 229 с.

References

- [1] M.P. Kostenko, *Elektrodinamicheskoe modelirovanie energeticheskikh system [Electrodynamic modeling of power systems]*. Moscow–Leningrad: AS USSR, 1959 (in Russian).
- [2] A.V. Ivanov-Smolensky, *Elektricheskie mashiny [Electrical machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [3] I.P. Kopylova, *Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]*. Moscow: Energy, 1980 (in Russian).
- [4] V.V. Yurkanov, “*Zubcovye zony energoeffektivnykh trekhfaznykh asinhronnykh mikrodvigateley s korotkozamknutym rotorom [Tooth zones of energy-efficient three-phase asynchronous micromotors with a squirrel-cage rotor]*”, Cand. of Tech. S. thesis, MPEI, Moscow, Russian, 2015 (in Russian).
- [5] A.E. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin and E.A. Sobolevskaya, *Asinhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik [Series 4A asynchronous motors: a handbook]*. Moscow: Energoatomizdat, 1982 (in Russian).
- [6] J.-C. Sabonnadière and J.-L. Coulomb, *Metod konechnykh elementov i SAPR [Finite element method and CAD]*. Moscow: Mir, 1989 (in Russian).
- [7] P. Sylvester and R. Ferrari, *Metod konechnykh elementov dlya radioinzhenerov i inzhenerov-elektrikov [Finite element method for radio and electrical engineers]*. Moscow: Mir, 1986 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Кононенко Константин Евгеньевич, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация

Konstantin E. Kononenko, D. Sci. (Eng.), professor of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

Кононенко Анастасия Валентиновна, кандидат технических наук, доцент Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

Anastasia V. Kononenko, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_43

ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СВЯЗИ С ПЕРЕВОДОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ НА ТЕХНОЛОГИЮ *SMART GRID*

Г.Я. Вагин

e-mail: ee@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.Л. Куликов

ORCID: 0000-0003-1092-7136 e-mail: inventor61@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Севостьянов

e-mail: ee@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ показателей качества электроснабжения, характеризующих надежность, качество электрической энергии и качество обслуживания систем электроснабжения. Даны рекомендации по учету анализируемых показателей качества, при проведении комплексной модернизации существующих систем электроснабжения. Приведены рекомендации по модернизации систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом внедрения технологии *Smart Grid*.

Ключевые слова: индикаторы надежности, качество электрической энергии, надежность электроснабжения, показатели качества электроснабжения, ущерб.

Для цитирования: Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid* // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 43-52. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_43

REQUIREMENTS FOR QUALITY OF POWER SUPPLY TO INDUSTRIAL ENTERPRISES IN CONNECTION WITH TRANSFER OF RUSSIAN ELECTRIC POWER INDUSTRY TO SMART GRID TECHNOLOGY

G.Y. Vagin

e-mail: ee@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.L. Kulikov

ORCID: [0000-0003-1092-7136](https://orcid.org/0000-0003-1092-7136) e-mail: inventor61@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Sevostyanov

e-mail: ee@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The analysis of power supply quality indicators characterizing reliability, quality of electric energy and quality of service of power supply systems is given. Recommendations are presented on taking into account the analyzed quality indicators when carrying out a comprehensive modernization of existing power supply systems. Recommendations are given for the modernization of power supply systems of industrial enterprises, taking into account the introduction of Smart Grid technology.

Keywords: reliability indicators, power quality, power supply reliability, power supply quality indicators, damage.

For citation: G.Y. Vagin, A.L. Kulikov and A.A. Sevostyanov, "Requirements for quality of power supply to industrial enterprises in connection with transfer of Russian electric power industry to smart grid technology", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-52, 2022. DOI: [10.46960/2658-6754_2022_4_43](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2022_4_43)

I. Введение

Перевод электроэнергетики России на «цифру» и технологию *Smart Grid* (интеллектуальные энергетические системы) требует модернизации существующих систем электроснабжения (СЭС) потребителей электроэнергии, в первую очередь – СЭС промышленных предприятий, которые также должны стать интеллектуальными. СЭС призваны координировать действие всех элементов СЭС, присоединенных к ней (потребителей электроэнергии, средств повышения качества электроэнергии и компенсации

реактивной мощности, распределенных источников энергии и др.), чтобы эффективно обеспечивать безопасное, экономичное и надежное электроснабжение [1, 2]. Большинство СЭС предприятий этим требованиям не соответствуют [3], поэтому основное внимание при их модернизации необходимо обратить на повышение качества электроснабжения.

Качество электроснабжения СЭС оценивается следующими показателями [1]:

- 1) надежностью;
- 2) качеством электроэнергии;
- 3) качеством обслуживания.

В настоящей статье дан анализ этих показателей качества и рекомендации по их учету при модернизации СЭС промышленных предприятий.

II. Надежность электроснабжения

При оценке надежности СЭС потребителей электроэнергии необходимо учитывать следующие возможные нарушения нормального электроснабжения [4-5]:

- 1) внезапные кратковременные перерывы электроснабжения или глубокие посадки напряжения, вызванные короткими замыканиями или переходными процессами в питающей энергосистеме или в СЭС;
- 2) внеплановые перерывы электроснабжения с предварительным предупреждением;
- 3) внезапные длительные (до нескольких часов) перерывы электроснабжения;
- 4) ограничения по мощности или энергии (с предварительным предупреждением или без предупреждения).

При указанных выше нарушениях нормального электроснабжения на промышленных предприятиях может происходить:

- 1) снижение или прекращение выработки продукции;
- 2) разладка технологических процессов;
- 3) брак продукции;
- 4) выход из строя и сокращение срока службы оборудования, инструментов и приспособлений;
- 5) увеличение расходов электроэнергии, сырья и материалов на выработку продукции;
- 6) простой обслуживающего персонала.

В настоящее время в России надежность электроснабжения потребителей определяется по упрощенному методу (категорийности электроснабжения электроприемников) [7]. Установлены три категории I, II и III, для каждой из них предусмотрены допустимые времена перерывов питания.

Количество электроприемников в СЭС промышленных предприятий может достигать сотен тысяч, режим их работы весьма разнообразен и зависит от отрасли промышленности, поэтому сложно определить категорию всей СЭС и правильно выбрать оптимальную схему питания. В странах Евросоюза надежность энергосистем и СЭС потребителей зависит от величины ущерба, который возникает при перерывах электроснабжения потребителей. Используются следующие индикаторы надежности [1, 8]:

- 1) *SAIFI* – показатель средней частоты прерываний в работе энергосистемы, число в год (число прерываний работы на число всех потребителей в энергосистеме за год);
- 2) *SAIDI* – показатель средней длительности прерываний в работе энергосистемы, мин/год (совокупная продолжительность прерываний на число потребителей в энергосистеме за год);
- 3) *CAIFI* – показатель средней частоты прерываний электроснабжения потребителей (число прерываний работы на число всех прерванных потребителей в энергосистеме за год);
- 4) *CAIDI* – показатель средней длительности прерывания электроснабжения потребителей, мин/год (средняя длительность прерывания электроснабжения потребителей);
- 5) *ENS* – недоотпуск электроэнергии, МВт · ч/год (суммарный объем электроэнергии, недопоставленный во время всех отключений потребителей).

Энергосистемы и СЭС потребителей считаются высоконадежными, если выполняется критерий *N-1*, а показатели надежности 1-5 имеют минимальные значения. Критерий *N-1* означает, что надежность энергосистемы или СЭС потребителей сохраняется, если выходит из строя один из ее элементов (генератор, трансформатор, одна питающая линия, рабочие сборные шины и т.д.) [1].

На основании показателей надежности определяются ущербы от перерывов электроснабжения как для отдельных предприятий, так и для отраслей промышленности. Такая работа активно ведется в странах Евросоюза. Так, в [8] приведены данные по ущербам в пяти отраслях промышленности. Он находится в пределах от 5 до 100 Евро на 1 кВт отключенной мощности. Наибольший ущерб зафиксирован в медицинской промышленности, наименьший – в производстве цемента. На основании величин ущербов выбираются оптимальные варианты при проектировании и модернизации систем электроснабжения.

В нашей стране подобные исследования проводились в 1960-е гг. [4]. Это позволило повысить надежность электроснабжения многих промышленных предприятий.

В XXI в. исследования ущербов практически не проводятся в связи с ликвидацией крупных проектных институтов и нежеланием собственников предприятий давать сведения об ущербах от перерывов электроснабжения. Данных о величинах *SAIFI* и *CAIDI* по потребителям электроэнергии нет. Имеются сведения только по энергосистемам *SAIFI* и *SAIDI*. В 2018 г. по ЕЭС России *SAIDI* составлял 8,7 часов в год, в 2035 г. данный показатель планируется довести до 2,23 часа. *SAIFI* составлял 2,3 единицы, а в 2035 г. планируется – 0,85 единиц [10]. По странам Евросоюза средняя величина *SAIDI* составляет 1,5 часа в год, при этом *SAIFI* – 1,0 единиц в год [12].

III. Качество электроэнергии

В интеллектуальных СЭС применяется большое количество микропроцессоров и цифровых устройств, которые весьма чувствительны к качеству электроэнергии (КЭ). Низкое значение КЭ приводит к экономическому ущербу, который определяется по выражению [13]:

$$Y_{\Sigma} = Y_{T} + Y_{\Delta}, \quad (1)$$

где Y_T – технологическая составляющая ущерба, в которую входят ущербы от изменения производительности, брака продукции и изменения срока службы электроустановок; Y_{Δ} – электромагнитная составляющая ущерба, в которую входят ущербы от изменения потребления и потерь активной и реактивной мощности, а также срока службы элементов СЭС.

Исследования показывают, что наибольший ущерб создают кратковременные провалы напряжения, прерывания электроснабжения и высшие гармоники. В [14, 15] приведены значения ущербов от высших гармоник у некоторых потребителей электроэнергии:

- 1) страховая компания: ложное срабатывание автоматического выключателя – 100 000 евро за час простоя;
- 2) металлургический завод: выход из строя трех индукционных печей из-за резонанса – 20 000 евро в час;
- 3) мебельная фабрика: выход из строя регулируемых электроприводов – 10 000 евро в час;
- 4) фармацевтическая лаборатория: выход из строя генераторной установки при испытании новых лекарственных средств – 17 млн евро.

В России ущербы от низкого качества электроэнергии оцениваются в 25 млрд долл. в год [16]. Учитывая, что в интеллектуальных СЭС они будут расти, при проектировании данных систем необходим комплексный учет ущербов от надежности и качества электроэнергии.

Суммарный ущерб для СЭС промышленных предприятий будет определяться по выражению:

$$Y_{\Sigma} = Y_{\text{НЭ}} + Y_{\text{КЭ}}, \quad (2)$$

где $Y_{\text{НЭ}}$ – ущерб от надежности электроснабжения; $Y_{\text{Э}}$ – ущерб от низкого качества электроэнергии.

Учитывая большие сложности в определении ущербов в (2), авторы рекомендуют при модернизации СЭС промышленных предприятий применять имитационное моделирование.

Имитационная модель СЭС предприятия позволяет предсказывать поведение данной системы в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах при воздействии как внешних, так и внутренних факторов различного характера. С помощью имитационного моделирования определяются характеристики, необходимые для расчета надежности, ущербов, качества электроэнергии, и определяются методы и средства повышения качества электроснабжения.

Для построения имитационной модели СЭС необходимо выполнить агрегатное моделирование производственного процесса предприятия [17]. Идея метода агрегатного моделирования основана на разложении производственного процесса на элементарные части: участки производства – «агрегаты», накопители и их связи для детального анализа его индивидуальных особенностей и взаимодействия отдельных частей.

«Агрегатом» является наименьший набор производственных механизмов, устройств, отделенный от остального оборудования предприятия промежуточными накопителями сырья – продукции [17] (рис. 1).

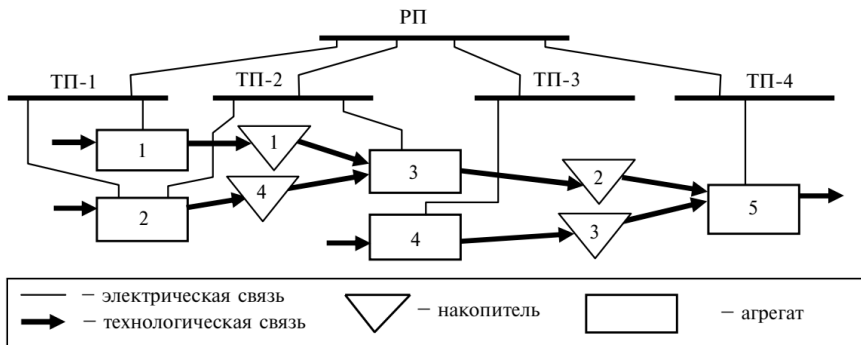


Рис. 1. Пример агрегатной модели

Fig. 1. An example of an aggregate model

При агрегатном преобразовании производственной системы все разнообразие технологического оборудования предприятия и организация его технологического процесса отражается тремя абстрактными элементами: «агрегатом» (участки производства), «накопители» (склады, емкости) и «связью» (электрические, технологические и прочие) учитывающей взаимовлияние первых двух элементов. Структура производства задается в виде направленного графа (рис. 1).

В [17] приведены примеры применения метода агрегатного моделирования для определения ущербов и классификация агрегатных моделей для предприятий различных отраслей промышленности.

IV. Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие рекомендации по модернизации СЭС промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid*.

1. На промышленных предприятиях России наблюдаются большие ущербы от перерывов электроснабжения и низкого качества электроэнергии, поэтому необходимы разработка и принятие государственной программы «Повышение качества электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию *Smart Grid*».

2. Необходима разработка дорожной карты реализации этой Программы.

3. В процессе выполнения Программы необходимо следующее.

3.1. Провести исследование ущербов от нарушений электроснабжения и низкого качества электроэнергии на предприятиях различных отраслей промышленности и создать банк данных по ущербам.

3.2. Определить критерии надежности этих предприятий *CAIFI* и *CAIDI*.

3.3. Разработать методику построения имитационных моделей СЭС предприятий различных отраслей промышленности предприятий.

4. При сравнении вариантов модернизации СЭС промышленных предприятий необходимо обязательно учитывать ущербы от нарушения электроснабжения и низкого качества электроэнергии, за весь срок службы элементов СЭС.

5. Модернизированные СЭС должны соответствовать основным требованиям стандарта МЭК 61850.

© Вагин Г.Я., 2022

© Куликов А.Л., 2022

© Севостьянов А.А., 2022

Поступила в редакцию 12.08.2022

Received 12.08.2022

Библиографический список

- [1] Бухгольц Б.М., Стычински З.А. Smart Grids – основы и технологии энергосистем будущего. М.: МЭИ, 2017. – 460 с.
- [2] EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006. – 44 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.smartgrid.gov/files/documents/Vision_Strategy_for_Europe_Electricity_Networks_Future_200601.pdf (дата обращения 01.08.2022).
- [3] Бушуев В.В., Кобец Б.Б., Лизалек Н.Н., Васильев В.В. Энергетическая политика: Интеллектуальное развитие электроэнергетики с учетом «активного» потребителя. М.: Энергия, 2013. – 84 с.
- [4] Михайлов В.В. Потребление электрической энергии – надежность и режимы. М.: Высшая школа, 1989. – 143 с.
- [5] Гук Ю.Б. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. М.: Энергия, 1970. – 177 с.
- [6] Baigent D., Adamiak M., Mackiewicz R. IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users // Protection & Control Journal. 2009. № 8. P. 61-68. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf> (дата обращения 17.07.2022).
- [7] Правила устройства электроустановок. М.: ЗАО “Энергосервис”, 1998. – 607 с.
- [8] Цапенко А.В., Тухас В.А. Системы мониторинга качества электрической энергии. Проблемы и пути контроля и управления качеством электрической энергии в электроэнергетике // Энергонадзор и Энергобезопасность. 2007. № 2. С. 24-29.
- [9] Головкин П.И. Режимы электроснабжения потребителей. М.: Энергия, 1971. – 112 с.
- [10] Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 №1523-р. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года.
- [11] Концепция “Цифровая трансформация 2030”. М.: 2018. – 31 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rosseti.ru/investment/Kontsepsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения 18.07.2022).
- [12] Ремизова Т.С., Кошелев Д.Б. Применение цифровых технологий для модернизации инфраструктуры электроэнергетической отрасли России // Проблемы Современной Экономики. 2018. № 2 (66). С. 31-34.
- [13] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. М.: Академия, 2010. – 224 с.
- [14] Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойберггер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей. М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- [15] Руководство по устройству электроустановок. Schneider Electric, 2009. – 469 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.se.com/ru/ru/download/document/Electrical_Guide_2009/ (дата обращения 19.07.2022).
- [16] Добрусин Л.А. Проблемы качества электроэнергии и электроснабжения в России // Энергоэксперт. 2008. № 4 (9). С. 30-35.
- [17] Шарыгин М.В. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными потребителями. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2017. – 283 с.

References

- [1] B.M. Buchholz and Z.A. Stychinski, *Smart Grids – Osnovy i Tekhnologii Energiosistem Budushchego [Smart Grids – Fundamentals and Technologies of Energy Systems of the Future]*. Moscow: MPEI, 2017 (in Russian).
- [2] EUR 22040 — European Technology Platform SmartGrids. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006 [Online]. Available at: https://www.smartgrid.gov/files/documents/Vision_Strategy_for_Europe_Electricity_Networks_Future_200601.pdf [Accessed: Aug. 1, 2021].
- [3] V.V. Bushuev, B.B. Kobets, N.N. Lizalek and V.V. Vasiliev, *Energeticheskaya politika: Intellektual'noe razvitie elektroenergetiki s uchytom «aktivnogo» potrebitelya [Energy policy: Intellectual development of the electric power industry, taking into account the "active" consumer]*. Moscow: Energiya, 2013 (in Russian).
- [4] V.V. Mikhailov, *Potreblenie elektricheskoy energii – nadyozhnost' i rezhimy. [Electric energy consumption – reliability and modes]*. Moscow: Higher School, 1989 (in Russian).
- [5] Yu.B. Guk, *Teoriya i raschyot nadyozhnosti sistem elektrosnabzheniya [Theory and calculation of reliability of power supply systems]*. Moscow: Energiya, 1970 (in Russian).
- [6] D. Baigent, M. Adamiak and R. Mackiewicz, “IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users”, *Protection & Control Journal*, vol. 8, pp. 61-68, July 2009. [Online]. Available at: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/journals/issues/spring09/iec61850.pdf> [Accessed: July 17, 2022].
- [7] *Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]*. Moscow: CJSC "Energoservice", 1998 (in Russian).
- [8] A.V. Tsapenko and V.A. Tukhas, “Sistemy monitoringa kachestva elektricheskoy energii. Problemy i puti kontrolya i upravleniya kachestvom elektricheskoy energii v elektroenergetike [Electrical energy quality monitoring systems. Problems and ways of monitoring and managing power quality in electric power industry]”, *Energondzor i Energobezopasnost' [Energy Supervision and Energy Security]*, no. 2, pp. 24-29, 2007 (in Russian).
- [9] P.I. Golovkin, *Rezhimy elektrosnabzheniya potrebitel'ev [Modes of power supply to consumers]*. Moscow: Energiya, 1971 (in Russian).
- [10] Decree of the Government of the Russian Federation dated 06.09.2020 no. 1523-r. *Ob utverzhenii Energeticheskoy strategii Rossijskoj federacii na period do 2035 goda [On the approval of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]* (in Russian).
- [11] *Koncepciya “Cifrovaya transformaciya 2030” [The concept of “Digital Transformation 2030”]*. Moscow: 2018. [Online]. Available at: http://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf [Accessed: July 18, 2022] (in Russian).
- [12] T.S. Remizova and D.B. Koshelev, “The use of digital technologies for infrastructural modernization of the electric energy production in Russia (Russia, Moscow)”, *Problems of Modern Economics*, no. 2 (66), pp. 31-34, 2018 (in Russian).
- [13] G.Ya. Vagin, A.B. Loskutov and A.A. Sevostianov, *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in the electric power industry]*. Moscow: Academy, 2010 (in Russian).

- [14] I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovsky, G.G. Pivnyak, Yu.L. Saenko and N.A. Neuberger, *Elektromagnitnaya sovместimost' potrebitelej* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow: Mashinostroenie, 2012 (in Russian).
- [15] *Rukovodstvo po ustrojstvu elektroustanovok* [Manual for the device of electrical installations]. Schneider Electric, 2009. [Online]. Available at: https://www.se.com/ru/ru/download/document/Electrical_Guide_2009/ [Accessed: July 19, 2022] (in Russian).
- [16] L.A. Dobrusin, "Problemy kachestva elektroenergii i elektroснабzheniya v Rossii [Problems of power quality and power supply in Russia]", *Energoekspert* [Energoexpert], no 4 (9), pp. 30-35, 2008 (in Russian).
- [17] M.V. Sharygin, *Zashchita i avtomatika sistem elektroснабzheniya s aktivnymi potrebitelyami* [Protection and automation of power supply systems with active consumers]. N. Novgorod: NRU RANEPА, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вагин Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Gennady Y. Vagin, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Aleksandr L. Kulikov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Севостьянов Александр Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Aleksandr A. Sevostyanov, Cand. Sci. (Eng.), head of the chair of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.352.6

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_53

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМТЭ В УСТАНОВИВШИХСЯ И ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

А.Б. Лоскутов

ORCID: 0000-0003-1961-1728 e-mail: loskutovab@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

И.А. Липужин

ORCID: 0000-0002-3799-5641 e-mail: lipuzhin@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Р.Ш. Бедретдинов

ORCID: 0000-0003-0767-1096 e-mail: bedretdinov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Исследована проблема интеграции топливных элементов с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ) в системы электроснабжения стационарных потребителей. Разработан экспериментальный образец гибридного энергетического комплекса на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных аккумуляторных батарей для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли. Проведены экспериментальные исследования работы ПОМТЭ в установившихся и динамических режимах. Для установившихся режимов работы ПОМТЭ представлен анализ зависимостей среднего расхода водорода за 1 мин, объема водорода на выработку 1 кВтч электроэнергии, КПД ПОМТЭ от тока нагрузки. Представлены диаграммы изменения выходного напряжения ПОМТЭ и выполнен анализ их характеристик при работе ПОМТЭ при динамическом изменении нагрузки.

Ключевые слова: водород, гибридный энергетический комплекс, КПД, система управления, топливный элемент, топливный элемент с полимерной протонообменной мембраной.

Для цитирования: Лоскутов А.Б., Липужин И.А., Бедретдинов Р.Ш. Исследование характеристик ПОМТЭ при работе в установившихся и динамических режимах // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 53-77.

DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_53

STUDY OF PEMFC CHARACTERISTICS IN STEADY AND DYNAMIC MODES

A.B. Loskutov

ORCID: **0000-0003-1961-1728** e-mail: **loskutovab@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.A. Lipuzhin

ORCID: **0000-0002-3799-5641** e-mail: **lipuzhin@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

R.Sh. Bedretdinov

ORCID: **0000-0003-0767-1096** e-mail: **bedretdinov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the problem of proton-exchange membrane fuel cells (PEMFC) integration into the power supply systems of stationary consumers. A prototype of a hybrid energy complex based on PEMFC and lithium-iron-phosphate batteries to power stationary consumers in the railway industry has been developed. Experimental studies of the PEMFC operation in steady and dynamic modes have been carried out. The dependences of the average hydrogen consumption for 1 min, the volume of hydrogen for the generation of 1 kWh of electricity and efficiency of PEMFC on the load current are presented for the steady-state operating modes. Diagrams of the change in PEMFC output voltage are presented and an analysis of their characteristics during the operation of the PEMFC under dynamic change of load have carried out.

Keywords: control system, efficiency, hydrogen, hybrid energy complex, fuel cell, proton-exchange membrane fuel cells.

For citation: A.B. Loskutov, I.A. Lipuzhin and R.Sh. Bedretdinov, “Study of of PEMFC characteristics in steady and dynamic modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 53-77, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_53

I. Введение

Ключевое направление развития мировой электроэнергетики связано с расширением использования экологических низкоуглеродных источников энергии. В связи с этим все большее внимание уделяется топливным элементам. По сравнению с другими типами низкоуглеродных источников (ветровые энергоустановки, фотоэлектрические модули и др.) главными преимуществами топливных элементов являются: высокий КПД (от 40 до

60 %); отсутствие шума и вибрации в процессе работы, модульность конструкции. Это определяет перспективы их широкого применения на транспорте и в системах электроснабжения потребителей [1, 2].

В настоящее время наиболее распространенными типами топливных элементов являются: топливные элементы с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ), топливные элементы с щелочным электролитом (ЩТЭ), топливные элементы с фосфорнокислотным электролитом (ФКТЭ), топливные элементы с расплавленным карбонатом (РКТЭ), топливные элементы с твердооксидным электролитом (ТОТЭ) [3]. Выбор типа ТЭ зависит от особенностей его работы, параметров и требований потребителя. Для электроснабжения стационарных потребителей установленной мощностью до 50 кВт наиболее подходящими считаются ПОМТЭ. ПОМТЭ могут работать с высокой эффективностью при низкой температуре, а также отличаются компактными размерами.

Однако проблема интеграции ПОМТЭ в системы электроснабжения связана с недостаточной маневренностью топливного элемента. Работа топливных элементов при резких увеличениях нагрузки характеризуется топливным голоданием [4]. Решение данной проблемы связано с комплексным использованием ПОМТЭ с системами накопления на основе аккумуляторных батарей (АБ) в едином гибридном энергетическом комплексе (ГЭК). АБ обеспечивает более быстрый отклик на динамическое изменение нагрузки по сравнению с ПОМТЭ [5, 6].

В НГТУ выполнен проект по разработке экспериментального образца ГЭК на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных АБ для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли [3]. Установленная мощность ПОМТЭ составляет 1 кВт, выходное номинальное напряжение 57 В. Выходные параметры ПОМТЭ и АБ согласуются между собой и потребителям электроэнергии с помощью устройства контроля, защиты и управления (УКЗУ). Для определения параметров силовой части УКЗУ и разработки системы управления необходимо понимание зависимостей характеристик ПОМТЭ (расход водорода, КПД) от входных параметров (давление водорода) и нагрузки в установившихся режимах работы и возможностей ПОМТЭ реагировать на динамические изменения нагрузки.

Исследованиям характеристик топливных элементов посвящено большое количество научных статей. Основным методом исследования является имитационное моделирование. Так, моделирование работы топливных элементов при изменении подачи водорода и кислорода представлено в [7, 8]. В [9] с помощью моделирования проведен анализ зависимости между выходной мощностью ПОМТЭ и его эффективностью. Эффективность работы ПОМТЭ на основе моделирования в *LabView* исследуется в

[10]. Большинство имитационных моделей показывают хорошие результаты при медленном изменении нагрузки. Однако качественные зависимости характеристик ПОМТЭ от входных параметров, полученные с помощью имитационного моделирования, могут отличаться. Так, в [7] показано, что напряжение топливного элемента уменьшается при увеличении давления кислорода и температуры. В [12] характер данных зависимостей является противоположным.

Имитационная модель, отражающая переходные процессы при работе топливного элемента при резких изменениях нагрузки, а также обзор исследований в данной области представлены в [13]. Однако возможность конкретного ПОМТЭ реагировать на динамические изменения нагрузки также зависит от степени деградации топливного элемента и потребления мощности устройством (вентиляторы или компрессор) для подачи воздуха, что сложно учесть при имитационном моделировании.

Таким образом, для перехода к стадии создания экспериментального образца ГЭК обязательным является дополнение результатов имитационного моделирования, подтверждающих правильность основных принятых решений, результатами экспериментальных исследований, позволяющих скорректировать параметры силовой части ГЭК и более точно настроить систему управления.

Статья является продолжением работы [3] и вносит научный вклад в решение проблемы интеграции ПОМТЭ в системы электроснабжения за счет комплексного анализа характеристик работы ПОМТЭ, полученных на основе экспериментальных исследований. С практической стороны полученные в работе результаты предназначены для корректировки системы управления экспериментального образца ГЭК, обеспечивающей эффективную работу ГЭК в установившихся режимах и надежное питание нагрузки при ее динамических изменениях.

II. Материалы и методы

Ячейка ПОМТЭ состоит из двух электродов (анода и катода), которые разделены мембраной (рис. 1). На аноде происходит реакция окисления водорода, вследствие которой атомы водорода делятся на протоны и электроны, стремящиеся к катоду:



Движение протонов к катоду осуществляется через мембрану. Перенос электронов к катоду осуществляется по внешней цепи, таким образом, создается постоянный электрический ток. На катоде происходит восстановительная реакция, в результате которой протоны и электроны соединяются

с окислителем (кислородом или воздухом) с образованием воды и выделением тепла:



В результате протекающих реакций на выводах электродов топливного элемента образуется напряжение $U_{\text{ПОМТЭ}}$.

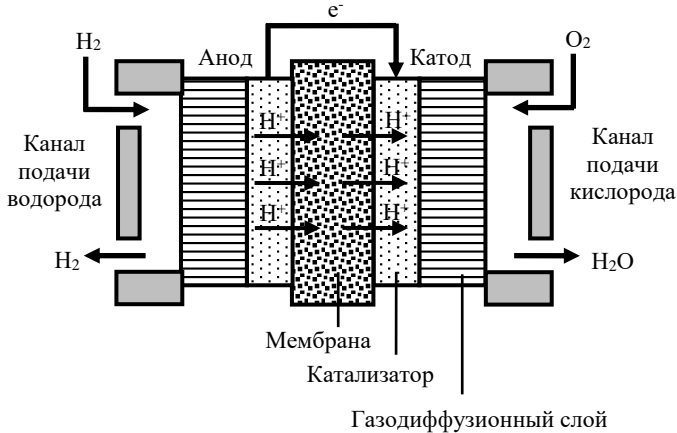


Рис. 1. Структура ячейки ПОМТЭ

Fig. 1. PEMFC cell structure

Зависимость $U_{\text{ПОМТЭ}}$ от тока нагрузки $I_{\text{ПОМТЭ}}$ отражает вольт-амперная характеристика (ВАХ) топливного элемента. На рис. 2 приведена паспортная ВАХ ПОМТЭ, используемого в ГЭК. На ВАХ можно выделить 3 области потерь в топливном элементе [4, 9, 11, 14]:

- область I – активационные потери ($I_{\text{ПОМТЭ}} =$ от 0 до 3 А);
- область II – омические потери ($I_{\text{ПОМТЭ}} =$ от 3 до 17 А);
- область III – концентрационные потери ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ более 17 А).

Значение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ меньше теоретически возможного напряжения на величину потерь напряжения в топливном элементе:

$$U_{\text{ПОМТЭ}} = E_{\text{ТЕОР}} - \Delta U_{\text{АКТ}} - \Delta U_{\text{ОМ}} - \Delta U_{\text{КОН}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{ТЕОР}}$ – теоретическая величина ЭДС топливного элемента (напряжение на выводах топливного элемента при разомкнутой электрической сети);

$\Delta U_{\text{АКТ}}$ – активационные потери топливного элемента, связанные с медленными реакциями на поверхности электродов (область I); $\Delta U_{\text{ОМ}}$ – омические потери топливного элемента, связанные с падением напряжения из-за резистивных потерь в ячейке ПОМТЭ (область II); $\Delta U_{\text{КОН}}$ – концентрационные потери топливного элемента, связанные со снижением плотности реагентов при больших токах (область III).

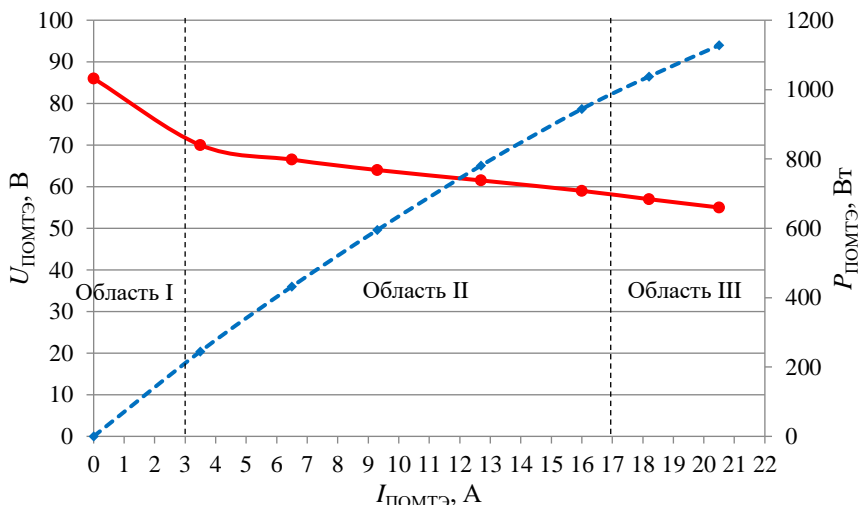


Рис. 2. Паспортная ВАХ ПОМТЭ

Fig. 2. PEMFC passport volt-ampere characteristic

Потери напряжения непосредственно влияют на эффективность работы ПОМТЭ и ГЭК в целом. Чем выше значение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при соответствующем токе нагрузки, тем меньше потери напряжения в топливном элементе и работа ПОМТЭ более эффективна. Предполагается, что ПОМТЭ в составе ГЭК большую часть времени будет работать в области омических потерь. Омические потери пропорциональны сопротивлению ячейки ПОМТЭ, которое включает сопротивление протонному току в мембране и сопротивление электродов движению электронов [12]:

$$\Delta U_{\text{ОМ}} = I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot R_{\text{ПОМТЭ}} = I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot (R_{\text{М}} + R_{\text{Эл}}), \quad (4)$$

где $R_{\text{ПОМТЭ}}$ – сопротивление ячейки ПОМТЭ; $R_{\text{Эл}}$ – сопротивление электродов топливного элемента движению электронов ($R_{\text{Эл}} = \text{const}$); $R_{\text{М}}$ – сопротивление мембраны топливного элемента движению ионов.

От величины $R_{\text{ПОМТЭ}}$ зависят параметры элементов УКЗУ в составе ГЭК [3].

*Методика исследования работы ПОМТЭ
в установившемся режиме*

В качестве основных характеристик работы ПОМТЭ в установившихся режимах в работе использованы:

- 1) $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ – КПД ПОМТЭ по производству электроэнергии, %;
- 2) $W_{\text{ПОМТЭ}}$ – выработанная электроэнергия ПОМТЭ, кВтч;
- 3) V – объем использованного водорода ПОМТЭ, л.

КПД по производству электроэнергии ($\eta_{\text{ПОМТЭ}}$) является одной из основных характеристик, определяющих эффективность работы ПОМТЭ в установившемся режиме. Под $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ понимается отношение электроэнергии, выработанной топливным элементом, к энергии, которая была запасена в использованном топливном элементе водороде:

$$\eta_{\text{ПОМТЭ}} = W_{\text{ПОМТЭ}} / Q, \quad (5)$$

где Q – энергия, которая была запасена в поступившем на вход топливного элемента водороде, кДж.

Значение $W_{\text{ПОМТЭ}}$ можно выразить в кДж ($1 \text{ кВтч} = 3,6 \text{ кДж}$), используя выражение:

$$W_{\text{ПОМТЭ}} = (U_{\text{ПОМТЭ}} \cdot I_{\text{ПОМТЭ}} \cdot \Delta t \cdot 3,6) / 60, \quad (6)$$

где $P_{\text{ПОМТЭ}}$ – мощность на выходе топливного элемента, кВт; Δt – интервал времени в минутах, за который определялась выработка электроэнергии.

Энтальпия сгорания водорода составляет 286 кДж/моль. С учетом этого, значение Q можно определить на основе измерений расхода водорода, который переведен в количество вещества, измеряемого в моль:

$$Q = n \cdot 286, \quad (7)$$

где n – количество вещества (моль).

Значение n можно определить с учетом рабочих параметров ПОМТЭ (давление водорода и температура), используя уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$n = (P \cdot V) / (R \cdot T), \quad (8)$$

где P – давление водорода на входе ПОМТЭ, атм; R – газовая постоянная ($R = 0,0821 \text{ л} \cdot \text{атм} / \text{моль} \cdot \text{К}$); T – температура, К.

На первом этапе с помощью экспериментальных исследований получены зависимости характеристик $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ и V от тока нагрузки ($I_{\text{ПОМТЭ}}$) при различных значениях давления водорода на входе ПОМТЭ (P).

На втором этапе проведен анализ полученных результатов и определены особенности корректировки системы управления ГЭК, обеспечивающие наибольшую эффективность работы в установившихся режимах.

*Методика исследования работы ПОМТЭ
при динамических изменениях нагрузки*

Работу ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки поясняет типовая переходная характеристика топливного элемента (рис. 3). Когда ток увеличивается, возникает провал напряжения, затем напряжение плавно восстанавливается и достигает установившегося значения в течение времени восстановления. При снижении тока происходит скачок напряжения с последующим восстановлением до равновесного значения [13].

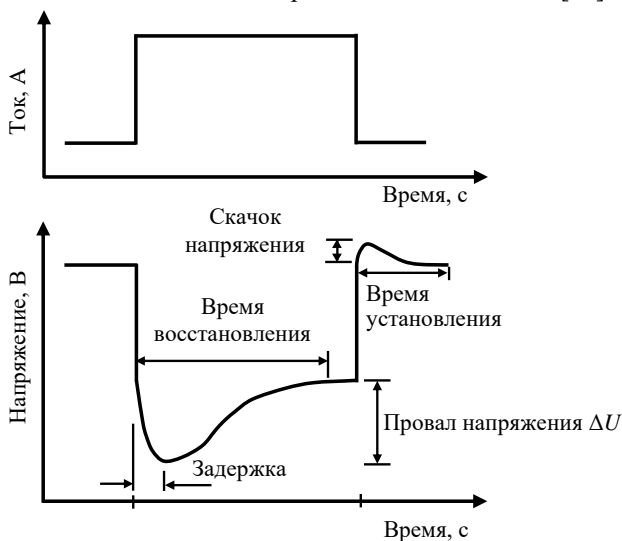


Рис. 3. Типовая переходная характеристика топливного элемента

Fig. 3. Typical fuel cell transient response

В качестве основных характеристик работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки в работе использованы:

- 1) минимальное значение напряжения при динамическом увеличении нагрузки U_{MIN} ;
- 2) максимальное значение напряжения при динамическом уменьшении нагрузки U_{MAX} ;

- 3) провал напряжения ΔU_{UN} , то есть разница между U_{MIN} и значением напряжения, которое устанавливается после динамического увеличения нагрузки;
- 4) скачок напряжения ΔU_{OV} , то есть разница между U_{MAX} и значением напряжения, которое устанавливается после динамического уменьшения нагрузки;
- 5) время восстановления T_{REC} , то есть время, за которое после динамического увеличения нагрузки напряжение увеличится до установившегося значения, соответствующего новому току нагрузки;
- 6) время установления T_{SET} , то есть время, за которое после динамического уменьшения нагрузки напряжение уменьшится до установившегося значения, соответствующего новому току нагрузки.

На первом этапе с помощью экспериментальных исследований получены значения характеристик U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} , T_{REC} , T_{SET} :

- для каждого начального значения тока нагрузки ($I_{НАЧ}$) от 0 до 20 А с шагом 2 А при увеличении нагрузки от $I_{НАЧ}$ до 22 А с шагом 2 А;
- для каждого конечного значения тока нагрузки ($I_{КОН}$) от 20 до 0 А с шагом 2 А при уменьшении нагрузки от 22 А до $I_{КОН}$ с шагом 2 А.

На втором этапе проведен анализ полученных результатов и определены особенности корректировки системы управления ГЭК, обеспечивающие надежное питание потребителя при динамическом изменении нагрузки.

III. Лабораторный стенд для исследования работы ПОМТЭ

Экспериментальные исследования работы ПОМТЭ проведены в лаборатории НГТУ. Структурная схема лабораторного стенда ПОМТЭ представлена на рис. 4.

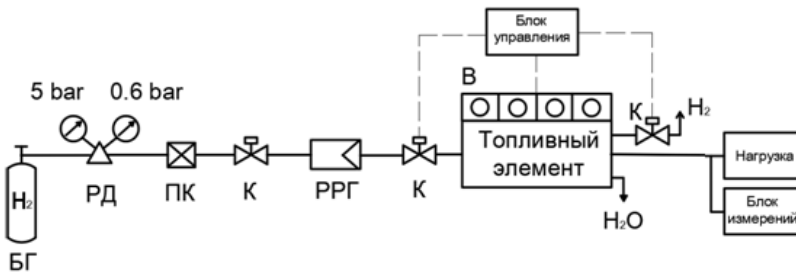


Рис. 4. Структурная схема лабораторного стенда с ПОМТЭ

Fig. 4. Structural scheme of the laboratory bench with PEMFC

Водород поступает в ПОМТЭ через регулятор давления, который снижает его до значения 0,6-0,8 атм. Подача водорода регулируется с помощью входного электромагнитного клапана. Выходной клапан необходим для сброса остатков неиспользованного водорода. Измерения тока и напряжения проводятся на выводах ПОМТЭ и отдельно на вентиляторах для подачи воздуха в ПОМТЭ. Расход газа измерялся с помощью регулятора расхода газа. Внешний вид лабораторного стенда показан на рис. 5.

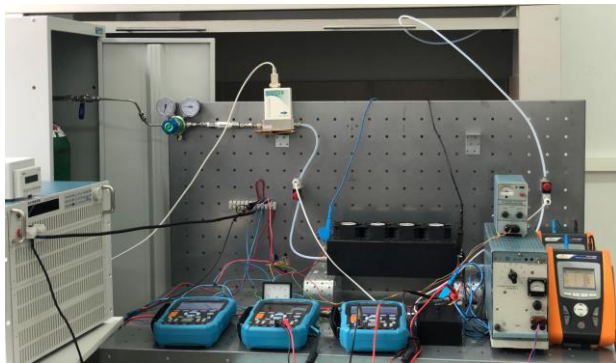


Рис. 5. Внешний вид лабораторного стенда

Fig. 5. Appearance of the laboratory stand

Основные технические параметры лабораторного стенда и исследуемого ПОМТЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Основные технические параметры лабораторного стенда и ПОМТЭ

Table 1.
Main technical parameters of the laboratory stand and PEMFC

| № | Параметр | Значение |
|---|---|--------------------------|
| 1 | Газ | H ₂ (99,99 %) |
| 2 | Давление на выходе газового баллона | 150 атм |
| 3 | Давление на входе ПОМТЭ | 0,6-0,8 атм |
| 4 | Установленная мощность ПОМТЭ | 1 кВт |
| 5 | Номинальное напряжение ПОМТЭ | 57 В |
| 6 | Номинальный ток ПОМТЭ | 17,5 А |
| 7 | Напряжение питания вентиляторов подачи воздуха | 48 В |
| 8 | Количество и номинальная мощность вентиляторов подачи воздуха | 4×62,4 Вт |

IV. Результаты исследований

Исследование потерь напряжения и внутреннего сопротивления ПОМТЭ

ВАХ топливного элемента зависит от давления водорода на входе топливного элемента. Построены вольт-амперная и мощностная характеристики при граничных значениях паспортного диапазона входного давления водорода (рис. 6).

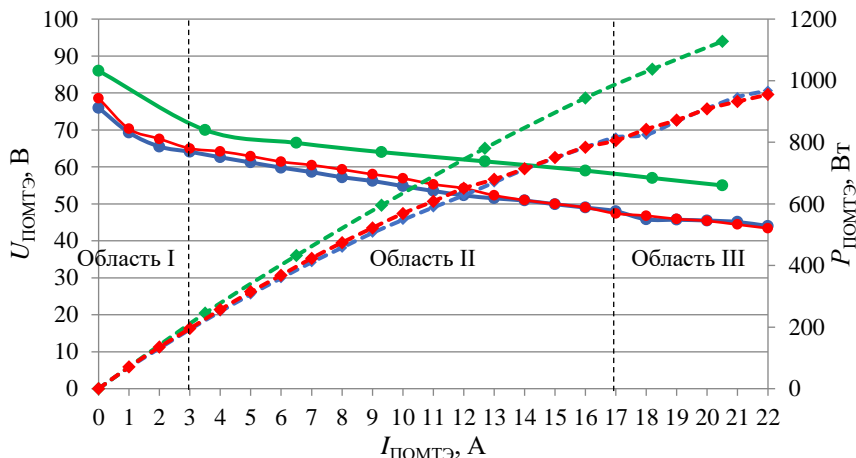


Рис. 6. Вольт-амперная (сплошная линия) и мощностная (пунктирная) характеристики ПОМТЭ:
паспортная при 0,6 атм (зеленый); фактические при 0,6 атм (синий) и 0,8 атм (красный)

Fig. 6. Volt-ampere characteristic (solid line) and power (dotted) characteristics of PEMFC:
passport at 0,6 atm (green); measured at 0,6 atm (blue) and 0,8 atm (red)

Работа ПОМТЭ в паспортном диапазоне давления водорода на входе (0,6-0,8 атм) характеризуется незначительными изменениями ВАХ. Значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,8$ атм немного превышают значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,6$ атм. Это соответствует закономерностям, полученным в других исследованиях [7, 8, 12]. Вместе с тем, фактические значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ во всех областях потерь на 5-10 В меньше значений напряжения, которые соответствуют паспортной ВАХ. Это можно объяснить тем, что паспортная ВАХ не учитывает затраты мощности на работу вентиляторов для подачи воздуха, а также процессом неизбежной деградации ПОМТЭ. Поэтому при уточнении параметров элементов УКЗУ будут учитываться именно факти-

ческие значения $U_{\text{ПОМТЭ}}$, полученные в ходе экспериментальных исследований. Для области II (омические потери) выполнена аппроксимация результатов измерений $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при $P = 0,6$ атм и $0,8$ атм и получено уравнение прямой, описывающее ВАХ в этой области:

$$U_{\text{ПОМТЭ}} = 68,011 - 1,211 \cdot I_{\text{ПОМТЭ}}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что значение внутреннего сопротивления ПОМТЭ $R_{\text{ПОМТЭ}} = 1,211$ Ом. Данное значение использовано для определения емкости фильтровых компенсаторов УКЗУ в составе ГЭК.

*Исследование характеристик ПОМТЭ
при работе в установившихся режимах*

Проведены измерения потребления водорода ПОМТЭ за 1 минуту при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм. Измерения были проведены при изменении тока нагрузки от 0 до 22 А с шагом 1 А (рис. 7).

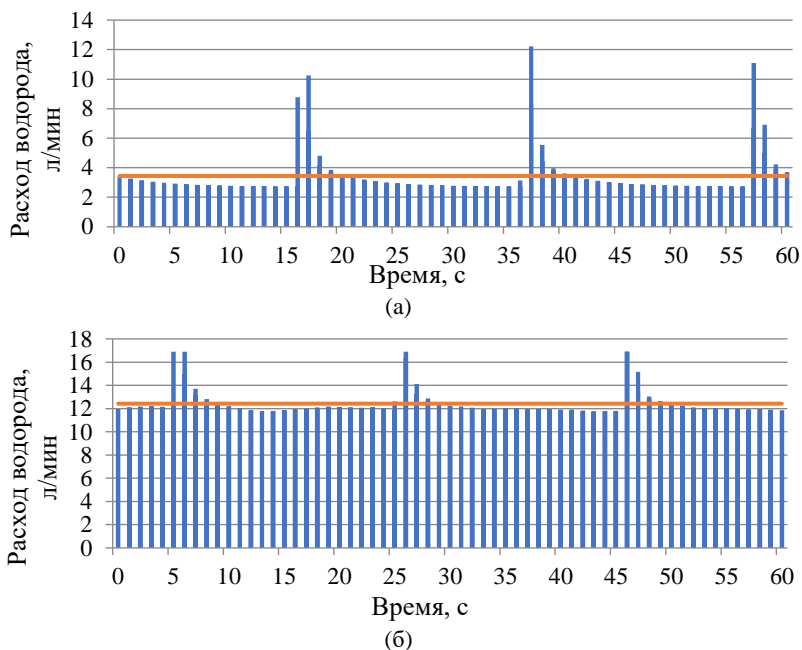


Рис. 7. Потребление водорода за 1 мин при 0,8 атм: $I_{\text{ПОМТЭ}} = 1$ А (а) и 15 А (б)

Fig. 7. Hydrogen consumption of for 1 min at 0,8 atm: $I_{\text{PEMFC}} = 1$ А (а); 15 А (б)

Рис. 7 показывает, что потребление водорода практически постоянно, но периодически возникают пики потребления, которые соответствуют открытию выходного клапана ПОМТЭ для выброса излишка водорода. Красной линией показан средний расход водорода за 1 мин при соответствующем токе нагрузки.

Построена зависимость среднего расхода водорода за 1 мин от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм (рис. 8).

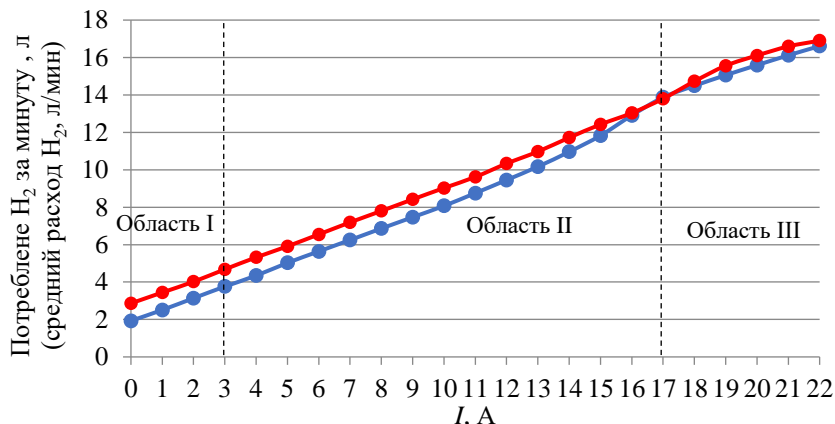


Рис. 8. Зависимость среднего расхода водорода за 1 мин от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм (синяя) и $0,8$ атм (красная)

Fig. 8. Dependence of the average hydrogen consumption per 1 minute on the load current at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

Из рис. 8 следует, что зависимость среднего расхода водорода от тока нагрузки является линейной. При работе ПОМТЭ в области I и II средний расход водорода при $P = 0,8$ атм примерно на 1 л/мин больше, чем при $P = 0,6$ атм. Также были построены графики, показывающие, какой объем водорода и время необходимы для производства 1 кВтч электроэнергии в зависимости от тока нагрузки и давления водорода на входе (рис. 9).

Из рис. 9 следует, что для любой из точек ВАХ при $P = 0,6$ атм и $P = 0,8$ атм на выработку 1 кВтч электроэнергии, в целом, потребуется одинаковое время. Однако при работе ПОМТЭ при $P = 0,8$ атм в области I и II для выработки 1 кВтч электроэнергии потребуется больший объем водорода, чем при $P = 0,6$ атм. Объем водорода, необходимый для выработки 1 кВтч электроэнергии, увеличивается при снижении тока нагрузки. Так, при работе ПОМТЭ в области I расход водорода на выработку 1 кВтч электроэнергии более чем в 2 раза превышает расход в области II. Поэтому работа

ПОМТЭ в режиме малых нагрузок ($I_{\text{ПОМТЭ}}$ до 3 А) является неэффективной. В этом случае для повышения эффективности работы ГЭК целесообразным представляется переводить питание нагрузки на АБ.

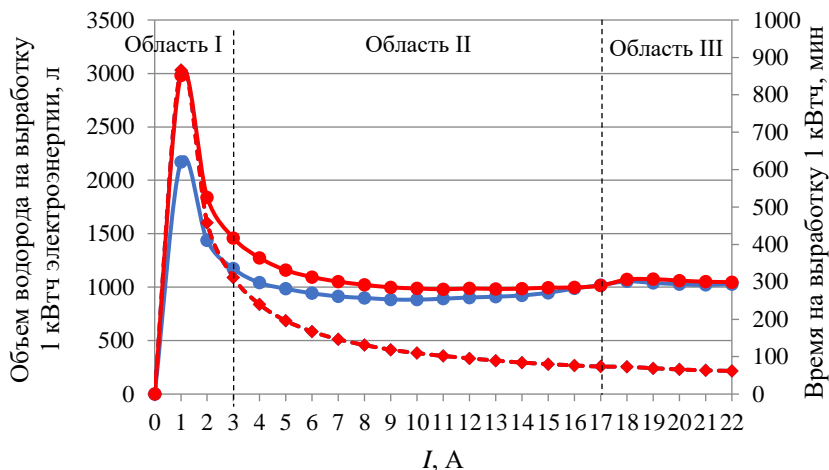


Рис. 9. Объем водорода (сплошная линия) и время, необходимые на выработку 1 кВтч электроэнергии (пунктирная линия) при $P = 0,6$ атм (синяя линия) и $0,8$ атм (красная линия)

Fig. 9. Volume of hydrogen (solid line) and time required to generate 1 kWh (dotted line) at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

На основе результатов измерений потребления водорода для каждой точки ВАХ от 0 до 22 А с шагом 1 А выполнены расчеты (5, 8) и определены значения $W_{\text{ПОМТЭ}}$, Q и $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$. При выполнении расчетов принято среднее значение температуры $T = 25^\circ\text{C}$ (рис. 10).

Зависимость $\eta_{\text{ПОМТЭ}}$ от тока нагрузки показана на рис. 11. Показано, что КПД выше при работе ПОМТЭ на нижней границе паспортного диапазона входного давления водорода. Это можно объяснить тем, что при $P = 0,8$ атм увеличиваются потери водорода, которые выбрасываются через выходной клапан ПОМТЭ. Наибольшие значения КПД (около 45 %) соответствуют работе ПОМТЭ в области II. В области III значения КПД уменьшаются и практически не изменяются с ростом тока.

На основе результатов исследований характеристик работы ПОМТЭ в установившихся режимах предложены следующие корректировки системы управления ГЭК.

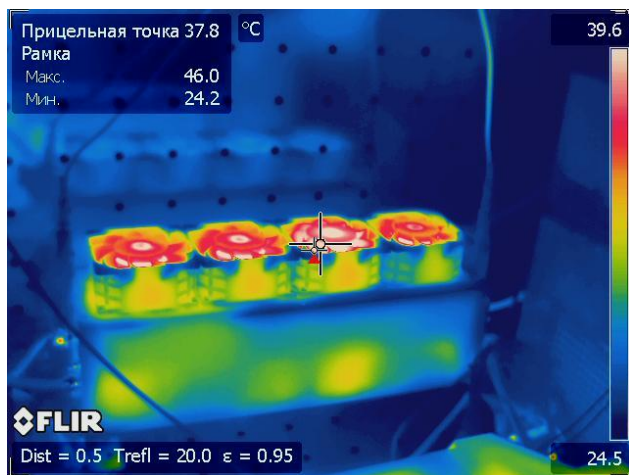


Рис. 10. Тепловизионная съемка ПОМТЭ в ходе испытаний

Fig. 10. Thermal imaging of PEMFC during testing

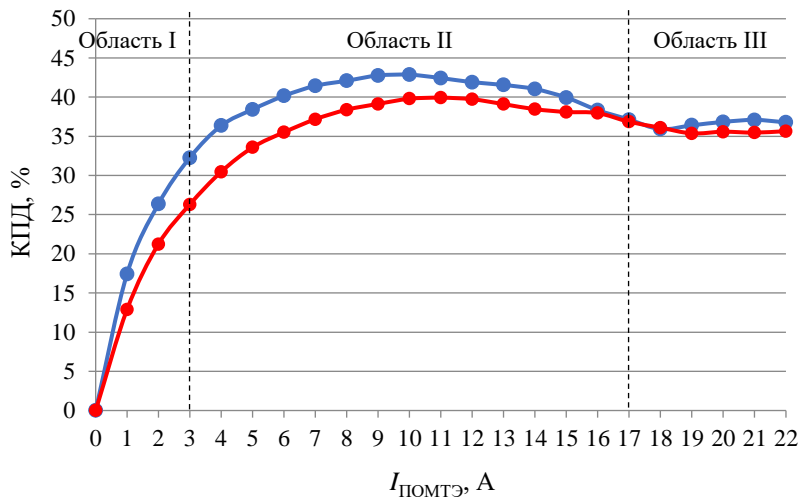


Рис. 11. Зависимость КПД ПОМТЭ от тока нагрузки при $P = 0,6$ атм (синяя линия) и $0,8$ атм (красная линия)

Fig. 11. Dependence of efficiency on the load current at $P = 0,6$ atm (blue) and $0,8$ atm (red)

1. Значения напряжения на ВАХ более приближены к паспортной характеристике при $P = 0,8$ атм (верхняя граница паспортного диапазона давления водорода на входе). Однако средний расход водорода и объем водорода, требуемый для производства 1 кВтч электроэнергии, ниже, а КПД работы ПОМТЭ, соответственно, выше при $P = 0,6$ атм (нижняя граница паспортного диапазона давления водорода на входе). Поэтому при работе ПОМТЭ в установившихся режимах предлагается поддерживать давление водорода на входе 0,6 атм.

2. Наибольший КПД 45 % достигается при работе ПОМТЭ в области II. При переходе в область III КПД работы ПОМТЭ снижается до 35 %. Поэтому при токах нагрузки более 17 А предлагается совместное использования ПОМТЭ и АБ. Это позволит повысить на 5-10 % КПД работы ПОМТЭ и, соответственно, эффективность работы ГЭК.

3. Установлено, что при работе ПОМТЭ в области I КПД составляет около 25 %, а объем водорода, необходимый для производства 1 кВтч электроэнергии, практически в 2 раза выше, чем при работе ПОМТЭ в области II. Поэтому для повышения автономности работы ГЭК при малых нагрузках (до 2 А) предлагается переходить на питание нагрузки только от АБ (при условии достаточного уровня заряда АБ). Таким образом, для работы ПОМТЭ в установившихся режимах наиболее эффективной является область II (область омических потерь).

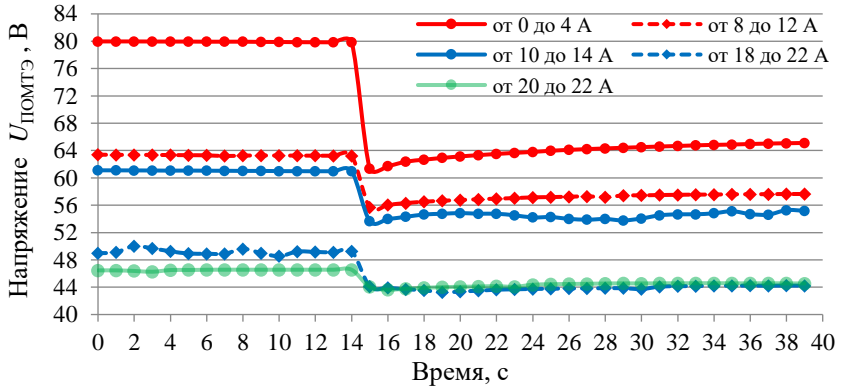
*Исследования характеристик ПОМТЭ
при динамических изменениях нагрузки*

Проведена серия экспериментов, в которых начальный ток нагрузки ($I_{нач}$) мгновенно увеличивался до заданного конечного значения ($I_{кон}$) и после достижения установившегося режима вновь мгновенно уменьшался до $I_{нач}$. Полученные диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ для различных значений $I_{нач}$ приведены на рис. 12. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ в зависимости от особенностей их характеристик могут быть разделены на 3 группы.

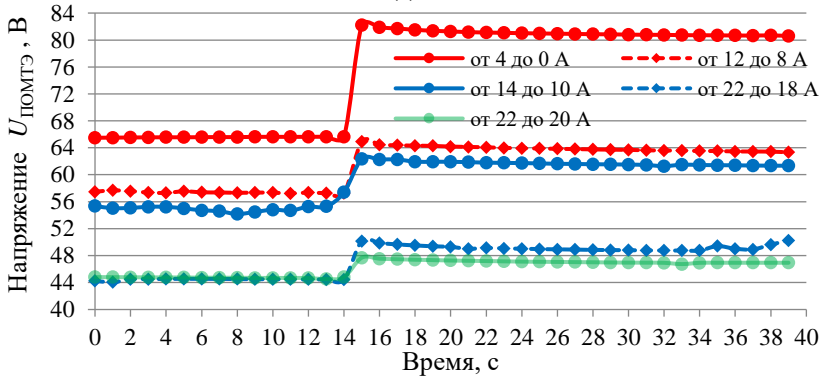
Группа 1 – изменение $U_{ПОМТЭ}$ при динамическом изменении $I_{ПОМТЭ}$ при $I_{нач}$ от 0 до 8 А. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ полностью соответствуют типовой переходной характеристики топливного элемента (рис. 3). На основе этих диаграмм возможно определить характеристики U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} и построить их зависимости.

Группа 2 – изменение $U_{ПОМТЭ}$ при динамическом изменении $I_{ПОМТЭ}$ при $I_{нач}$ от 10 до 18 А. Диаграммы изменения $U_{ПОМТЭ}$ отличаются от типовой переходной характеристики топливного элемента. При динамическом изменении нагрузки наблюдаются колебания $U_{ПОМТЭ}$, которые характеризуются большой частотой при небольших амплитудах (несколько В). Это не позволяет точно определить характеристики ΔU_{UN} , ΔU_{OV} , T_{REC} и T_{SET} .

Группа 3 – изменение $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при динамическом изменении $I_{\text{ПОМТЭ}}$ при $I_{\text{НАЧ}}$ от 20 до 22 А. Диаграммы изменения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ характеризуются тем, что колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$ становятся значительно меньше, и диаграмма соотносится с типовой переходной характеристикой топливного элемента.



(a)



(б)

Рис. 12. Диаграммы изменения выходного напряжения $U_{\text{ПОМТЭ}}$ при изменении тока нагрузки (красная линия):
рост нагрузки (а); снижение нагрузки (б)

Fig. 12. Diagrams of changes in the output voltage of PEMFC U_{PEMFC} when the load current changes:
load increase (a); load decrease (b)

Колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$ на диаграммах из группы 2 можно объяснить работой вентиляторов, которые обеспечивают подачу воздуха. На рис. 13 показана диаграмма изменения потребляемой мощности вентиляторами в зависимости от тока нагрузки.

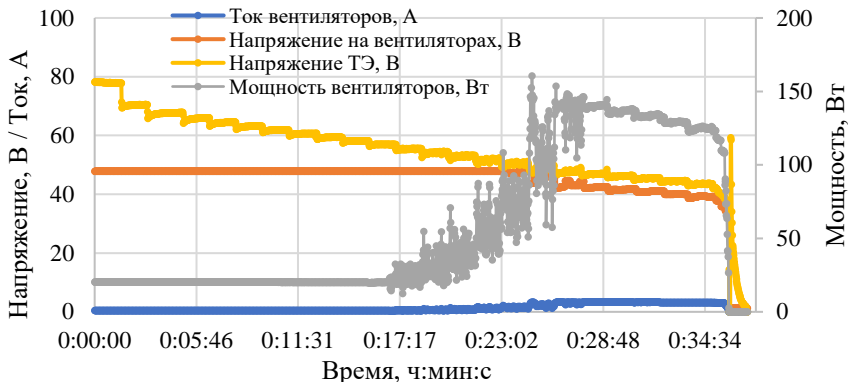


Рис. 13. Характеристики работы вентиляторов подачи воздуха:
ток (синий); напряжение (красный); мощность (зеленый) вентиляторов
и напряжение на выходе ПОМТЭ (фиолетовый)

Fig. 13. Characteristics of the operation of fans providing air supply:
current (blue); voltage (red); power (green) and PEMFC output voltage (purple)

Из рис. 13 следует, что при $I_{\text{НАЧ}}$ от 0 до 10 А вентиляторы постоянно потребляют одинаковую мощность, равную 20 Вт. На этом интервале диаграммы изменения выходного напряжения ПОМТЭ соответствуют типовой переходной характеристике топливного элемента (колебания напряжения отсутствуют). На интервале $I_{\text{НАЧ}}$ от 10 до 18 А мощность, потребляемая вентиляторами, увеличивается от 20 до 160 Вт. При этом на всем интервале наблюдаются существенные колебания потребляемой мощности (амплитудой до 40 Вт). Это приводит к колебаниям подачи воздуха, необходимого для работы топливного элемента, что при динамических изменениях нагрузки приводит к появлению колебаний $U_{\text{ПОМТЭ}}$. При достижении $I_{\text{НАЧ}}$ 20 А потребляемая вентиляторами мощность снова стабилизируется (равна примерно 130 Вт). Как следствие, при $I_{\text{НАЧ}} = 20$ А на диаграмме изменения выходного напряжения ПОМТЭ исчезают колебания $U_{\text{ПОМТЭ}}$.

Для стабилизации работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки предлагается в структуру ГЭК добавить дополнительный отдельный источник для питания вентиляторов, подающих воздух в топливный элемент. Мощность, потребляемая вентиляторами, будет задаваться в зависимости от тока нагрузки.

Для диаграмм изменения $U_{\text{ПОМТЭ}}$, относящихся к группам 1 и 3, определены значения U_{MIN} , U_{MAX} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} . На основе диаграмм из группы 2 можно определить только значения характеристик U_{MIN} и U_{MAX} . На рис. 14 показаны зависимости значений U_{MIN} и ΔU_{UN} от I_{KON} . При динамическом увеличении нагрузки выходное напряжение ПОМТЭ опускается тем ниже, чем больше конечное значение тока нагрузки I_{KON} . При одинаковых I_{KON} напряжение опускается ниже при меньших значениях $I_{\text{НАЧ}}$. Так, при увеличении нагрузки от 0 до 22 А ($I_{\text{НАЧ}} = 0$ А; $I_{\text{KON}} = 22$ А) $U_{\text{ПОМТЭ}}$ уменьшилось до 35 В, и произошло отключение ПОМТЭ. Полученные результаты подтверждают, что наиболее опасными являются динамические увеличения нагрузки до максимальных значений при работе ПОМТЭ в режиме, близком к холостому ходу. Значения ΔU_{UN} характеризуют восстановление выходного напряжения ПОМТЭ после переходного процесса. При одинаковых I_{KON} значения ΔU_{UN} тем больше, чем меньше значение начального тока нагрузки $I_{\text{НАЧ}}$. На рис. 15 показаны зависимости значений U_{MAX} и ΔU_{OV} от $I_{\text{НАЧ}}$. При динамическом уменьшении нагрузки, в целом наблюдаются зависимости характеристик ПОМТЭ, аналогичные тем, что и при увеличении нагрузки. Выходное напряжение ПОМТЭ увеличивается при увеличении разницы между I_{KON} и $I_{\text{НАЧ}}$. Наибольшие значения выходного напряжения наблюдаются при уменьшении нагрузки от 22 до 0 А.

Зависимости U_{MIN} и ΔU_{UN} , а также U_{MAX} и ΔU_{OV} использованы при определении параметров входного конвертора в составе УКЗУ. Входное напряжение конвертора должно предусматривать возможность изменения выходного напряжения ПОМТЭ от наименьшего значения U_{MIN} до наибольшего значения U_{MAX} .

V. Заключение

Среди типов топливных элементов для электроснабжения стационарных потребителей мощностью до 50 кВт наиболее эффективными считаются ПОМТЭ. Однако, ПОМТЭ характеризуются недостаточной маневренностью при динамически изменяющихся нагрузках. Эта проблема решается путем сочетания ПОМТЭ с аккумуляторными батареями в едином гибридной энергетическом комплексе (ГЭК).

В НГТУ разработан экспериментальный образец ГЭК на основе ПОМТЭ и литий-железо-фосфатных АБ для питания стационарных потребителей железнодорожной отрасли. Проведены экспериментальные исследования работы ПОМТЭ в установившихся и динамических режимах работы. Для используемого в ГЭК ПОМТЭ построены вольт-амперная и мощностная характеристики, которые показали, что фактические значения выходного напряжения ПОМТЭ во всех областях потерь на 5-10 В меньше значений напряжения для паспортной ВАХ. На основе аппроксимации резуль-

татов измерений для области омических потерь определено значение внутреннего сопротивления ПОМТЭ ($R_{\text{ПОМТЭ}} = 1,211 \text{ Ом}$), которое использовано для определения емкости фильтровых компенсаторов УКЗУ в составе ГЭК.

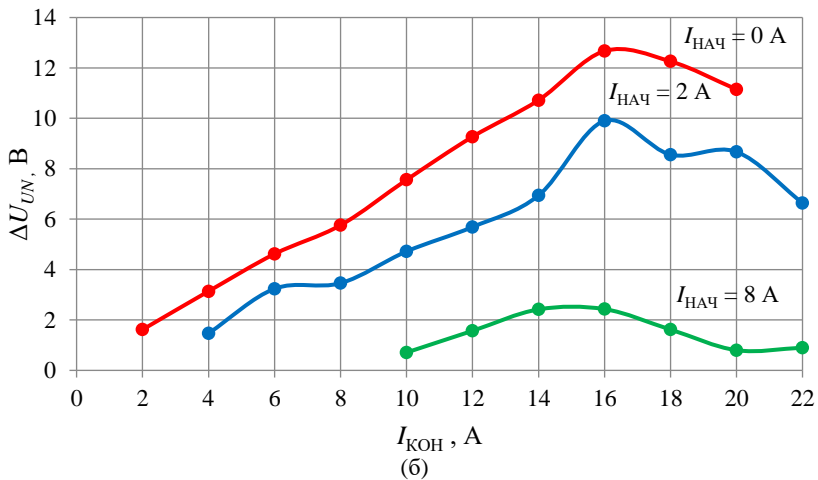
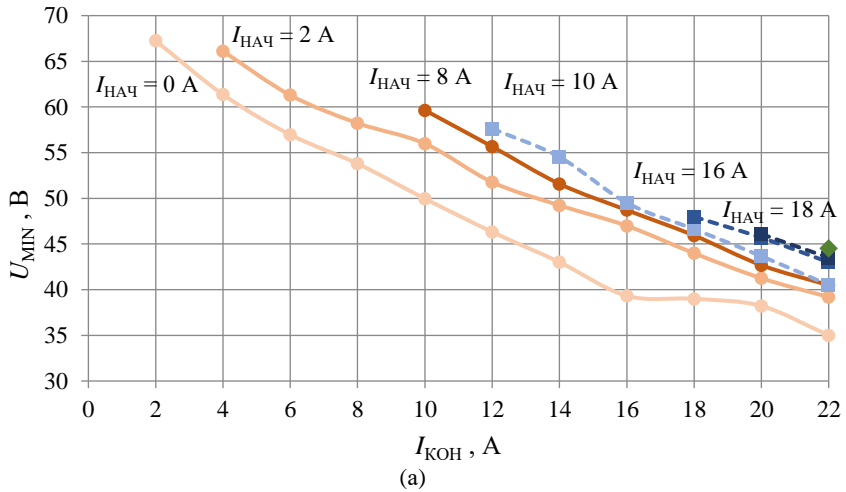


Рис. 14. Зависимости характеристик ПОМТЭ при динамическом увеличении нагрузки: U_{MIN} от $I_{\text{КОН}}$ (а); ΔU_{UN} от $I_{\text{КОН}}$ (б)

Fig. 14. Dependences of the characteristics of PEMFC with a dynamic increase in load: U_{MIN} от $I_{\text{КОН}}$ (а); ΔU_{UN} от $I_{\text{КОН}}$ (б)

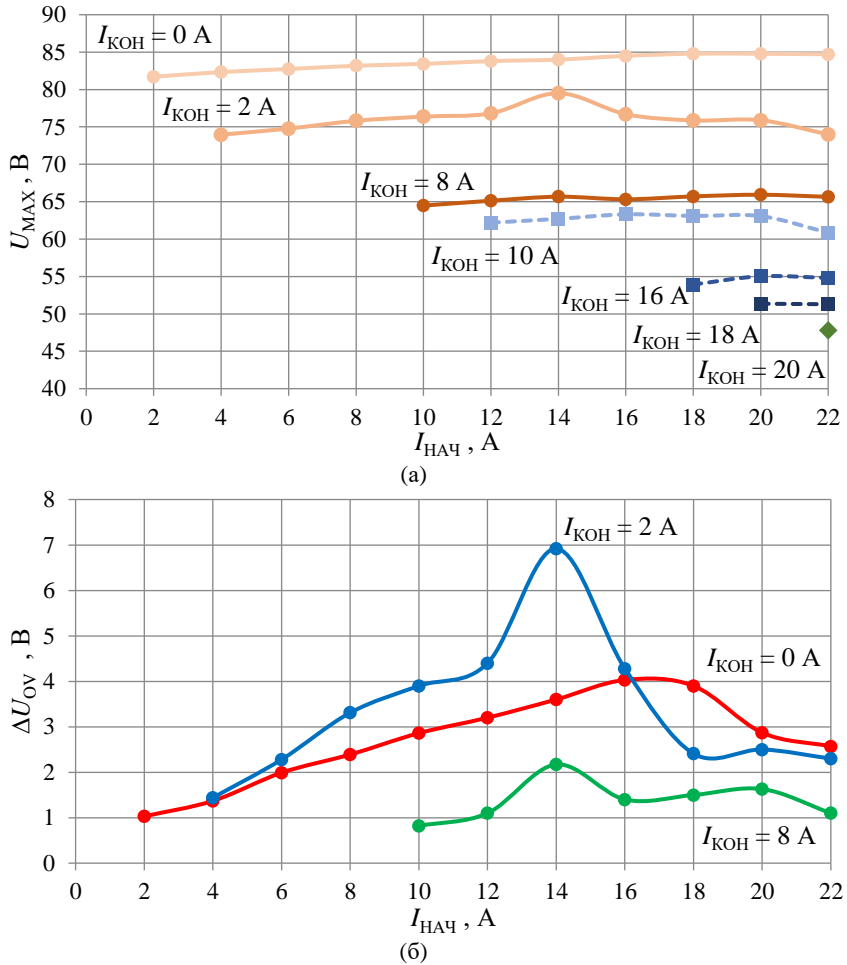


Рис. 15. Зависимости характеристик ПОМТЭ при динамическом уменьшении нагрузки: U_{MAX} от $I_{НАЧ}$ (а); ΔU_{OV} от $I_{НАЧ}$ (б)

Rice. 15. Dependences of the characteristics of PEMFC with dynamic load reduction: U_{MAX} от $I_{НАЧ}$ (а); ΔU_{OV} от $I_{НАЧ}$ (б)

Установлено, что наибольший КПД (около 45 %) достигается при работе ПОМТЭ в области омических потерь. Результаты экспериментальных

исследований характеристик ПОМТЭ при работе в установившихся режимах будут использованы для корректировки системы управления ГЭК:

- продолжительная работа ПОМТЭ в области активационных потерь характеризуется завышенным расходом водорода на производство электроэнергии и низким КПД (не более 25 %), поэтому питание потребителей при малых нагрузках предлагается переводить на аккумуляторные батареи;
- при работе ПОМТЭ в области концентрационных потерь КПД составляет около 35 %, поэтому для повышения КПД работы ПОМТЭ и ГЭК в целом при больших токах нагрузки предлагается совместное использование ПОМТЭ и АБ.

Проведены исследования характеристик ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки. На характеристики работы ПОМТЭ оказывает влияние работа вентиляторов, которые подают воздух. При работе ПОМТЭ в диапазоне нагрузки от 10 до 18 А при динамических изменениях нагрузки наблюдаются существенные колебания выходного напряжения ПОМТЭ. Для стабилизации работы ПОМТЭ при динамических изменениях нагрузки предлагается в структуру ГЭК добавить дополнительный отдельный источник для питания вентиляторов, подающих воздух в топливный элемент. Выполнен анализ зависимостей характеристик U_{\min} , U_{\max} , ΔU_{UN} , ΔU_{OV} от начального и конечного токов нагрузки. Полученные зависимости использованы при определении параметров входного конвертора в составе УКЗУ ГЭК.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-38-51016.

© Лоскутов А.Б., 2022

© Липужин И.А., 2022

© Бедретдинов Р.Ш., 2022

Поступила в редакцию 30.09.2022

Received 30.09.2022

Библиографический список

- [1] Zhou D., Ravey A., Al-Durra A., Gao F. A comparative study of extremum seeking methods applied to online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 151. P. 778-790. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.079
- [2] Meng X., Li Q., Zhang G., Wang T., Chen W., Cao T. A dual-mode energy management strategy considering fuel cell degradation for energy consumption and fuel cell

- efficiency comprehensive optimization of hybrid vehicle // IEEE Access. 2019. No. 7. P. 134475-134487. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939047
- [3] Kulikov A., Loskutov A., Shalukho A., Bedretdinov R., Lipuzhin I., Kryukov E., Kurkin A., Kozelkov A., Dar'enkov A., Vanyaev V., Shahov A. Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply // Sustainability. 2021. No. 13 (16). DOI: 10.3390/su13169355
- [4] Hsu S., Liang S. Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management // proc. 2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Nov. 26-29, 2012, Saigon, Vietnam. P. 231-235. DOI: 10.1109/IC-CAIS.2012.6466593
- [5] Xie C., Xu X., Bujlo P., Shen D., Zhao H., Quan S. Fuel cell and lithium iron phosphate battery hybrid powertrain with an ultracapacitor bank using direct parallel structure // Journal of Power Sources. 2015. No. 279. P. 487-494. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.029
- [6] Yu Y., Li Q., Chen W., Su B., Liu J., Ma L. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2019. No. 66 (8). P. 6065-6076. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871792
- [7] Sharma M., Pachauri R.K., Goel S.K. MATLAB/Simulink modeling and analysis of parametric effects on PEMFC performance // proc. 2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), Mar. 12-13, 2015, Noida, India. P. 226-231. DOI: 10.1109/RDCAPE.2015.7281400
- [8] Belmokhtar K., Hammoudi M., Doumbia M.L. and Agbossou K. Modelling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell // proc. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey. P. 415-420. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635643
- [9] Pandian M.S., Anwari M., Husodo B.Y., Hiendro A. Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell // proc. 2010 Conference Proceedings IPEC, Oct. 13-17, 2010, Singapore. P. 875-880. DOI: 10.1109/IPE-CON.2010.5697089
- [10] Adegnon K.M., Dube Y., Agbossou K. Experimental evaluation of PEM Fuel Cell systems efficiency // proc. 2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 03-06, 2009, St. John's, NL, Canada. P. 716-719. DOI: 10.1109/CCECE.2009.5090223
- [11] Guaitolini S.V.M., Yahyaoui I., Fardin J.F., Encarnação L.F., Tadeo F. A review of fuel cell and energy cogeneration technologies // proc. 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Mar. 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362573
- [12] Chaudhary S., Chauhan Y.K. Studies and performance investigations on fuel cells // 2014 International Conference on Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR-2014), Aug. 01-02, 2014, Unnao, India: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ICAETR.2014.7012957
- [13] Edwards R.L., Demuren A.O. Regression analysis of PEM fuel cell transient response // International Journal of Energy and Environmental Engineering 7 (3). 2016. No. 329-341. DOI: 10.1007/S40095-016-0209-1

- [14] Barbir F., Gomez T. Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cell // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1997. No. 22 (10-11). P. 1027-1037. DOI: 10.1016/S0360-3199(96)00175-9

References

- [1] D. Zhou, A. Ravey, A. Al-Durra, and F. Gao, "A comparative study of extremum seeking methods applied to online energy management strategy of fuel cell hybrid electric vehicles", *Energy Conversion and Management*, vol. 151, pp. 778-790, Nov. 2017. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.079
- [2] X. Meng, Q. Li, G. Zhang, T. Wang, W. Chen and T. Cao, "A dual-mode energy management strategy considering fuel cell degradation for energy consumption and fuel cell efficiency comprehensive optimization of hybrid vehicle", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134475-134487, Sep. 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2939047
- [3] A. Kulikov, A. Loskutov, A. Shalukho, R. Bedretinov, I. Lipuzhin, E. Kryukov, A. Kurkin, A. Kozelkov, A. Dar'enkov, V. Vanyaev and A. Shahov, "Development and operation modes of hydrogen fuel cell generation system for remote consumers' power supply", *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021. DOI: 10.3390/su13169355
- [4] S. Hsu and S. Liang, "Optimal efficiency of fuel cell/battery hybrid power management", in proc. *2012 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Nov. 26-29, 2012, Saigon, Vietnam, pp. 231-235. DOI: 10.1109/ICCAIS.2012.6466593
- [5] C. Xie, X. Xu, P. Bujlo, D. Shen, H. Zhao, and S. Quan, "Fuel cell and lithium iron phosphate battery hybrid powertrain with an ultracapacitor bank using direct parallel structure", *Journal of Power Sources*, vol. 279, pp. 487-494, 2015. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.029
- [6] Y. Yu, Q. Li, W. Chen, B. Su, J. Liu, and L. Ma, "Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 6065-6076, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871792
- [7] M. Sharma, R.K. Pachauri and S.K. Goel, "MATLAB/Simulink modeling and analysis of parametric effects on PEMFC performance", in proc. *2015 International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, Mar. 12-13, 2015, Noida, India, pp. 226-231. DOI: 10.1109/RDCAPE.2015.7281400
- [8] K. Belmokhtar, M. Hammoudi, M.L. Doumbia and K. Agbossou, "Modelling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell", in proc. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, May 13-17, 2013, Istanbul, Turkey, pp. 415-420. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635643
- [9] M.S. Pandian, M. Anwari, B.Y. Husodo and A. Hiendro, "Efficiency and economics analysis of proton exchange membrane fuel cell", in proc. *2010 Conference Proceedings IPEC*, Oct. 13-17, 2010, Singapore, pp. 875-880. DOI: 10.1109/IPE-CON.2010.5697089

- [10] K.M. Adegnon, Y. Dube and K. Agbossou, “Experimental evaluation of PEM Fuel Cell systems efficiency”, in proc. *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, May 03-06, 2009, St. John's, NL, Canada, pp. 716-719. DOI: 10.1109/CCECE.2009.5090223
- [11] S.V.M. Guaitolini, I. Yahyaoui, J.F. Fardin, L.F. Encarnação and F. Tadeo, “A review of fuel cell and energy cogeneration technologies”, in proc. *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Mar. 20-22, 2018, Hammamet, Tunisia. DOI: 10.1109/IREC.2018.8362573
- [12] S. Chaudhary and Y.K. Chauhan, “Studies and performance investigations on fuel cells”, in proc. *2014 International Conference on Advances in Engineering and Technology Research (ICAETR-2014)*, Aug. 01-02, 2014, Unnao, India. DOI: 10.1109/ICAETR.2014.7012957
- [13] R.L. Edwards and A.O. Demuren, “Regression analysis of PEM fuel cell transient response”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 7 (3), pp. 329-341, May 2016. DOI: 10.1007/S40095-016-0209-1
- [14] F. Barbir and T. Gomez, “Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cell”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 22, no. 10-11, pp. 1027-1037, Oct. 1997. DOI: 10.1016/S0360-3199(96)00175-9

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexey B. Loskutov, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Липужин Иван Алексеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Ivan A. Lipuzhin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Бедретдинов Рустам Шамилевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Rustam Sh. Bedretdinov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.Л. Осокин

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет
Княгинино, Россия

Представлен анализ задач повышения эффективности использования электроэнергии, в том числе, в системах с распределенной генерацией и накопителями электроэнергии. Показан принцип подбора объектов, управление режимом работы которых при аварийных ситуациях в электроэнергетической системе (ЭЭС) минимизирует экономические потери.

На этапе динамического развития теории надежности систем энергетики и ее практических приложений показана необходимость и востребованность регулярных исследований систем электроэнергетического комплекса. Обоснована необходимость сохранения имеющихся возможностей ЭЭС по обеспечению надежного электроснабжения потребителей, поскольку, несмотря на усилия исследователей, вопрос об экономических принципах отбора вариантов развития ЭЭС с учетом экономической оценки надежности остается открытым и требует дальнейшей разработки.

Рассмотрены элементы оснований процесса управления надежностью и эффективностью электроснабжения на ее многоэтапной организации, где показан смысл в периодической адаптации перспективных планов к постоянно уточняемым условиям развития ЭЭС. Проведенные исследования показали зависимость того, что реальные возможности снижения нагрузок потребителей при условии сохранения выпуска продукции на запланированном (договорном) уровне не всегда перекрывают потребности ЭЭС в снижении мощности при отказах основного оборудования и позволяют перейти к их учету при обосновании принятия решений в задачах прогнозирования развития и эксплуатации современных систем электроснабжения. Обоснована необходимость принятия решений, связанных с кибербезопасностью в энергетическом секторе, из-за увеличения количества успешных кибератак злоумышленников. Показана необходимость анализа не только вертикальной иерархии, но и горизонтальных связей, которые, по сути, и формируют энергетический рынок региона.

Ключевые слова: надежность, отказ, решение по управлению режимами, уязвимость, энергетический рынок.

Для цитирования: Осокин В.Л. Проблемы оценки надежности и эффективности в современных системах электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 78-94. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_78

PROBLEMS OF RELIABILITY AND EFFICIENCY ASSESSMENT IN MODERN POWER SUPPLY SYSTEMS

V.L. Osokin

ORCID: 0000-0001-8772-4252 e-mail: osokinvl@mail.ru

Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University

Knyaginino, Russia

Abstract. An analysis of the tasks devoted to improving the efficiency of the use of electricity, including distributed generation and energy storage system is carried out. The selection principle of objects the control of operating mode of which in emergency situations in electric power system (EPS) leads to a minimum of economic losses is shown.

At the stage of dynamic development of reliability theory of energy systems and its practical applications, the necessity and demand for regular researches of electric power complex is shown. The necessity of preserving the existing EPS capabilities to ensure reliable power supply to consumers is justified. Despite the efforts of researchers, the issue of economic principles for selection of EPS development options, taking into account the economic assessment of reliability, remains open and requires further refinement.

The elements of foundation for the process of managing the reliability and efficiency of power supply at its multi-stage organization are considered, which shows the meaning in periodic adaptation of long-term plans to constantly refined conditions for the development of EPS. The conducted researches showed the dependence that the real possibilities of reducing the loads of consumers (provided that the output of products is maintained at planned (contractual) level) do not always overlap the needs of EPS in reducing power in case of failures of main equipment and allow them to be taken into account when justifying decision-making in the tasks of predicting the development and operation of modern power supply systems. The article presents the problems of load management representing the complexity of execution. The necessity of making decisions related to cybersecurity in the energy sector is justified due to increase in number of successful cyberattacks. The necessity of analyzing not only the vertical hierarchy, but also the horizontal links, which, in fact, form the energy market of the region, is shown.

Keywords: energy market, failure, mode control solution, reliability, vulnerability.

For citation: Osokin V.L. "Problems of reliability and efficiency assessment in modern power supply systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 78-94, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_78

I. Введение

При выработке технических решений, связанных с прогнозированием, проектированием, развитием и эксплуатацией больших технических систем, к которым, в первую очередь, относятся электроэнергетическая система (ЭЭС) и системы электроснабжения (СЭС) потребителей, приходится

учитывать, что подобные системы незамкнуты и не могут, как правило, проектироваться в целом. Их эксплуатация и развитие происходят с учетом взаимосвязей с другими энергетическими, технологическими, экологическими и социальными системами. При этом проектные решения, решения по их эксплуатации и развитию часто принимаются при недостатке, неоднозначности и неопределенности исходной информации, достоверность и точность которой не удовлетворяет современным требованиям функционирования ЭЭС и СЭС. В таких условиях классические оптимизационные расчеты нецелесообразны, так как в большинстве случаев неэффективны или невозможны. С особой остротой эти проблемы встают в задачах принятия решений с учетом надежности и эффективности работы потребителей электроэнергии.

Наиболее крупными проблемами управления надежностью в ЭЭС (СЭС), решение которых требует учета как технологических, так и экономических аспектов, являются:

- 1) принятие решений по развитию ЭЭС и СЭС потребителей с учетом фактора надежности;
- 2) принятие решений по управлению работой ЭЭС и СЭС при отказах их элементов в процессе эксплуатации;
- 3) исследование возможностей ЭЭС, СЭС и потребителей в задачах управления режимами электропотребления;
- 4) исследование уязвимостей и проблем кибербезопасности в системах ЭЭС и СЭС;
- 5) оценка критериев экономической эффективности альтернативных вариантов управления режимами при изменении структуры, иерархии, усиления экономической, социальной и политической независимости субъектов энергетического рынка при возможном несовпадении их интересов.

II. Материалы и методы

Исследования по первым двум проблемам проводятся авторскими коллективами и отдельными исследователями уже много лет, однако до сих пор они весьма актуальны. Одна из первых отечественных работ, содержащих экономическую оценку уровня надежности электроснабжения потребителей, появилась в середине 1950-х гг. [1], в ней приведены средние показатели ущерба от нарушений электроснабжения разных отраслей промышленности. После этого опубликованы многочисленные исследования, связанные с экономической оценкой последствий, возникающих при нарушениях электроснабжения, произведенной на основе отбора составляющих последствий с выделением плановых ограничений и внезапных отключений всего или части объектов потребителя [2-6].

Третья проблема во всем мире существовала и развивалась одновременно с первыми двумя, но в энергетике России она стала актуальной в 1990-х гг., когда начались изменения в социально-экономической сфере страны. Однако в связи с ее чрезвычайным значением, связанным с обеспечением всех видов безопасности государства, развитие исследований и внедрение результатов по ней пошло довольно быстрыми темпами. Появился ряд разработок и публикаций [3, 7, 8], где анализируются экономические задачи надежности систем электроснабжения (СЭС) при формировании рыночных отношений.

Четвертая из отмеченных выше проблем появилась относительно недавно и связана с обеспечением кибербезопасности ЭЭС (СЭС). Все возрастающий рост количества компьютеров, развитие информационных технологий, типа облачных систем хранения данных и вычислений, и использование их в управлении режимами генерирующих установок и потребителей приводит к появлению задач не только защиты данных и информации, но и обеспечения безопасности человека и объектов критической инфраструктуры. Возникли такие понятия как киберугроза, кибератака, кибертерроризм, кибервойна.

Пятая проблема связана с переходом к рыночной экономике, имеющей склонность на сегодняшнем этапе жертвовать интересами будущего ради прибыльных, популистских краткосрочных мероприятий, увеличивается опасность рассогласования интересов субъектов рыночных отношений с макроэкономическими и социальными целями всей системы хозяйствования. Поэтому растет роль стратегического планирования экономических эффектов надежного электроснабжения потребителей и прогнозирования состояния ЭЭС, которые должны опираться на комплекс исследований, проводимых на всех уровнях территориальной и временной иерархии. Основная цель – выявление связей систем энергетики, экономики и потребления энергии. При этом особо следует учитывать возможность изменения критериев экономической эффективности альтернативных вариантов управления энергетикой, изменения структуры и иерархии управления, усиления экономической, социальной и политической независимости субъектов энергетического рынка и возможные несовпадения их интересов.

III. Результаты и обсуждение

Развитие систем распределенной генерации (РГ) с включением в их состав возобновляемых источников энергии (ВИЭ), систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), при специфических особенностях собственников, систем коммерческого и технологического учета электроэнергии, контроля, управления, телемеханики, релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) существенно усложнили задачи принятия решений по управлению режимами ЭЭС и СЭС при отказах их элементов и необходимости

изменения структуры и конфигурации схем электроснабжения потребителей [9]. Обеспечение нормируемых показателей надежности требует контроля пропускной способности ЛЭП, ограничения перегрузок, согласования и селективности функционирования устройств РЗ и ПА [10]. Возник новый тип ЭЭС (СЭС), требующих расширения спектра услуг (резервирование, организация ремонтно-эксплуатационного обслуживания, децентрализованного управления режимом) и изменения моделей рынка. В связи с этим, оценка последствий отказов элементов электрооборудования и управления режимами СЭС еще более усложняется, так как становится необходимым учет целого ряда дополнительных факторов и показателей, влияющих на надежность элементов СЭС и источников РГ [11, 12].

В соответствии с постановкой третьей проблемы анализ экономических задач надежности СЭС показал недопустимость рассмотрения ее как замкнутой системы без учета связей с потребителями. Но поскольку адекватно учесть все реальные связи невозможно, важно правильно ввести ряд ограничений – границ рациональности, в пределах которых затухают возмущения, возникающие в ЭЭС. Это вынуждает максимально эквивалентировать и обобщать требования к надежности энергоснабжения потребителей. Но чем выше уровень иерархии решаемой задачи, тем сложнее учесть требования потребителя к надежности, с одной стороны, и тем выше затраты на повышение надежности ЭЭС – с другой.

Одна из широко применяемых во многих исследованиях [2, 6, 7, 13] методик обобщенной оценки ожидаемых потерь потребителя от недостаточного уровня надежности электроснабжения сводилась к допущению, что недополученная при возникновении дефицитов мощности в ЭЭС энергия безвозвратно потеряна и неизбежно ведет к невыпуску продукции. Плановое хозяйство и жесткое централизованное управление распределением и потреблением энергоресурсов позволяло ориентировочно оценить такие ожидаемые потери, связанные с недополучением электроэнергии. При этом создавалась иллюзия объективности оценки потерь от недостаточного уровня надежности и возможности реализации метода приведенных затрат. При переходе к «активным» СЭС такой подход неэффективен. Системы активного потребления электроэнергии в подавляющем большинстве обладают избыточностью (структурной, нагрузочной, временной, информационной), за счет которой ликвидируется или значительно уменьшается недовыпуск продукции из-за нарушения нормального режима работы и не допускается разрыв внешних производственных связей с поставщиками сырья и потребителями готовой продукции предприятий, участвующих в процессе регулирования энергопотребления [4].

Исследования, проведенные с учетом технологических особенностей промышленных производств разных отраслей промышленности, показали,

что реальные потери (ущерб) конкретных потребителей определяются основными составляющими [14]:

- фактором внезапности нарушения электроснабжения потребителя;
- неуправляемым останом объектов производства вследствие отключения электроприемников;
- непроизводительным расходом энергоресурсов во время наладки технологического процесса после восстановления электроснабжения;
- незапланированными остановами и пуском объектов производства;
- незапланированными ремонтными работами;
- разрушением технологических связей между отключенным и другими объектами производственной системы.

Предложения по использованию агрегированных оценок последствий ненадежного энергоснабжения потребителей заключались в допущении, что состав отключаемых присоединений произволен. Это позволяло ограничиться оценкой лишь математического ожидания ущерба по совокупности питаемых потребителей. Однако объективная оценка указанных потерь по агрегированным на уровне ЭЭС моделям для совокупностей потребителей, практически не представляется возможным. Анализ имевших место аварий, сопровождающихся отключением нагрузки потребителей, и прогнозирование аналогичных ситуаций, показывает, что для недопущения нарушения устойчивости ЭЭС и полной утраты работоспособности достаточно отключать около 20 % суммарной нагрузки системы. Это обеспечивается большим количеством способов, реализация которых определяется выбором состава отключаемых присоединений. Изменение его, при сохранении величины отключаемой мощности, существенно влияет на потери потребителя, которые различаются на порядок и более. Поэтому к ликвидации возможных дефицитов в ЭЭС должна проводиться соответствующая подготовка, что позволит сократить ожидаемые потери до минимума. Разумеется, построение функции минимальных ущербов по всей совокупности потребителей для задач прогнозирования развития ЭЭС на отдаленную перспективу, не могло быть осуществлено. Поэтому и принималось допущение о произвольном составе отключаемой нагрузки.

Второй путь принятия решений при прогнозировании развития ЭЭС с учетом надежности заключается в принятии и использовании нормативных требований. При этом затраты на надежность рассматривались как один из ограничивающих факторов, влияющих на принимаемые решения [15] и максимально приближающиеся к пределу, диктуемому требованиями потребителей. Поскольку создание эффективных моделей для оценки количественных показателей нормативов для каждого потребителя практически нереально, предлагалось использование методов экспертного опроса специ-

алистов, которые в состоянии более или менее объективно судить о возможных и целесообразных значениях требуемых нормативов для совокупности потребителей. Особо отметим, что и на современном этапе вряд ли можно предложить какой-либо другой способ установления нормативных показателей надежности энергоснабжения. Однако необходимо учитывать, что эксперты, привлекаемые для выработки разрабатываемых нормативов, в настоящее время имеют значительно меньшую информированность и компетентность, чем это было ранее, поскольку возросла неопределенность технико-экономического состояния и развития как ЭЭС, так и потребителей. Поэтому разработка методических принципов решения рассматриваемых задач резко усложнилась. Это связано с непрогнозируемым изменением спроса мощности и энергии потребителями и нестационарными режимами работы ВИЭ. Кроме того, ретроспективный анализ энергопотребления в настоящее время не может обеспечить получения достоверных оценок, ожидаемых в ближайшие годы нагрузок. Аналогичная ситуация сложилась и с прогнозированием возможных ущербов как от нарушений электроснабжения, так и от принудительного управления электропотреблением.

На основании изложенного становится очевидным, что необходимо удержаться на имеющихся возможностях ЭЭС по обеспечению надежного электроснабжения потребителей. Поэтому, несмотря на усилия исследователей, вопрос об экономических принципах отбора вариантов развития ЭЭС с учетом экономической оценки надежности пока остается открытым. Реализация процесса управления надежностью и эффективностью электроснабжения должна основываться на его многоэтапной организации. Смысл ее состоит в периодической адаптации перспективных планов к постоянно уточняемым условиям развития ЭЭС (СЭС). Таким образом, все предлагаемые мероприятия по перспективам развития ЭЭС должны многократно фильтроваться с точки зрения влияния на изменение показателей ее надежности и эффективности в ближайшей и отдаленной перспективе, пересматриваться по составу и корректироваться по срокам реализации по мере уточнения условий их осуществления [16].

Другая задача связана с возможным нарушением баланса между генерируемой и потребляемой мощностью при отказах элементов и объектов ЭЭС. Известно, что задержка с восстановлением соответствия выработки и потребления мощности приводит к нарушению устойчивости, возможному каскадному развитию аварии, т.е. «развалу» системы и, как следствие, полному нарушению нормального хода технологического процесса и жизнедеятельности всей совокупности питаемых потребителей. Единственный путь избежать столь катастрофических последствий – отключить часть нагрузок и (или) выделить часть генерирующих источников. Поэтому обоснован-

ность создания и использования АВР, АПВ [10], САОН, АЧР, графиков отключений и ограничений в ЭЭС [17] не вызывает сомнения. Естественно также стремление оперативных служб ЭЭС решать задачи отключения присоединений наиболее удобным способом, т. е. отключением минимального числа наиболее доступных присоединений. Разумеется, это может приводить к глубокому разрушению систем потребления вплоть до возникновения опасности жизнеобеспечению, что, естественно, должно быть оценено в какой-либо количественной форме. Однако, как в директивных указаниях [18], так и в ряде литературных источников отмечается, что выбор отключаемых присоединений должен обеспечивать минимальный ущерб. Потребителям предлагается выявлять электроприемники, которые необходимы для завершения технологического процесса (технологическая броня), и электроприемники, внезапное отключение которых может сопровождаться катастрофическими последствиями (аварийная броня). При этом считается вполне допустимым отключение всей нагрузки потребителя, за исключением аварийной, а в критических ситуациях – и технологической брони. Вместе с тем, проведенными исследованиями [17, 19] установлено, что и в задачах сохранения живучести ЭЭС при крупных системных авариях, связанных с отключением большого количества потребителей возможны рациональные решения, принятие которых позволяет минимизировать возможные технико-экономические последствия. Одним из условий допустимости ожидаемых или возможных вариантов отключения потребителей должна быть минимизация вероятности разрыва внешних производственно-технологических связей.

Для объективной оценки последствий нарушений энергоснабжения наиболее часто требуются сведения о последствиях частичных нарушений электроснабжения потребителей, а также о влиянии нарушений электроснабжения на работу участков производства, связанных с отключенным единством технологического процесса. Такие методики были представлены рядом исследователей [2, 13, 14, 17]. Разработка их велась в двух направлениях:

- моделирование последствий для конкретных видов производства и отдельных отраслей промышленности;
- создание универсальных моделей общих закономерностей влияния нарушений электроснабжения на ход производственного процесса потребителей.

При этом принятие решений по управлению энергопотреблением сопровождается появлением возможности повысить достоверность прогнозируемых показателей за счет увеличения объема используемой информации что обеспечивает большую уверенность в правомерности принимаемых ре-

шений по ликвидации дефицитов в ЭЭС за счет ограниченной группы различных потребителей. Для определения экономических последствий нарушений электроснабжения необходимо построение экономико-математических моделей срыва производственного процесса с учетом влияния вероятностных факторов и неполноты исходной информации на конечный результат расчета – величину ожидаемого ущерба. Проблема исследования ущерба формулируется как:

- задача априорного анализа, которая заключается в оценке ожидаемых последствий нарушения электроснабжения и их составляющих;
- задача синтеза, заключающаяся в минимизации ущерба за счет правильной организации работы потребителя и энергоснабжающей организации.

Результаты проведенных исследований показали, что реальные возможности снижения нагрузок потребителей, при условии сохранения выпуска продукции на запланированном (договорном) уровне, во многих случаях перекрывают потребности ЭЭС в снижении мощности при отказах основного оборудования и позволяют перейти к их учету при обосновании принятия решений в задачах прогнозирования развития и эксплуатации современных СЭС. Естественно, что разрешение поставленных проблем управления нагрузкой представляет большие трудности из-за недостатка исходной информации о параметрах, входящих в расчетные выражения для вычисления составляющих и суммарной величины ожидаемого ущерба [3, 7, 14]. Это связано с многообразием и особенностями технологических процессов производства, пренебрежением к метрологическому обеспечению. Поэтому технологическая и экономико-математическая сложность и практическое отсутствие заинтересованности в управлении электропотреблением как энергоснабжающей, так и потребляющих систем, пока не создают условий для ее успешного решения.

Определенные сложности связаны с несогласованностью интересов ЭЭС и потребителей. Поскольку основные потери несет потребитель, у ЭЭС не было прямой заинтересованности в их снижении. Кроме того, руководство ЭЭС опасалось, что выявление сведений об ущербах приведет к требованиям потребителей максимально возместить их потери [20]. Руководство систем, потребляющих энергию, также не было заинтересовано в выявлении экономических и технических возможностей снижения потребляемой мощности. По их мнению, решение этой задачи позволяло диспетчерским службам ЭЭС более часто, более длительно и более глубоко отключать нагрузку потребителя. Поскольку возникновение рассматриваемых видов ущерба происходит по вине ЭЭС, потребитель не испытывал острой необходимости в его сокращении. Оплата труда как в ЭЭС, так и у потребителей с возникающим ущербом не увязывалась. И хотя работы, направленные на

выработку решений по ликвидации возможных дефицитов мощности в ЭЭС велись в ряде научных коллективов [2, 3, 6, 14, 21], их практическая реализация была недопустимо низкой. Она тормозилась отсутствием гарантий со стороны ЭЭС на показатели надежности энергоснабжения, при этом потребитель не мог предъявить практически никаких претензий, а ЭЭС вправе была принимать любые решения, ущемляющие потребителей. Расширение хозяйственной самостоятельности предприятий, развитие систем РГ с учетом ВИЭ и СНЭЭ обусловило необходимость создания эффективных систем технико-экономической поддержки решений по обеспечению их надежного функционирования. Полномасштабное использование регулировочной способности потребителей требует изменения существующей системы взаимоотношений между энергопредприятием-поставщиком и предприятием-потребителем энергии на основе рыночных отношений. Степень участия потребителей в управлении режимом электропотребления должна задаваться не директивно, а приниматься добровольно, самими потребителями, на основе анализа их технической возможности и сравнения увеличения издержек производства при регулировании с экономическими льготами, предлагаемыми ЭЭС [22].

На основании формулировки четвертой проблемы очевидно, что системообразующая отрасль экономики и жизнеобеспечивающая роль электроэнергетики, развитие цифровых технологий, интеллектуальных сетей (*Smart Grid*) и устройств делают энергетику привлекательной мишенью для атак со стороны террористов, хакеров и других злоумышленников. На данном этапе развития ЭЭЭ (СЭС) компьютерные технологии контроля, управления, измерений и передачи данных, используемые для мониторинга режимов и управления ими, хотя и имеют целый ряд преимуществ перед традиционными технологиями, увеличивают и их уязвимость при кибератаках.

Решение проблем, связанных с кибербезопасностью в энергетическом секторе, важно не только для энергетической безопасности, но и для стабильного состояния экономики страны, так как количество успешных кибератак злоумышленников год от года возрастает [23]. Киберугрозы стали одним из приоритетов при решении задач проектирования и эксплуатации как ЭЭС (СЭС), в том числе, систем РГ, т. е. на всех иерархических и территориальных уровнях их функционирования. Переход к современным ИЭС ААС создает условия создания и развития систем РГ с относительно большим количеством, различающихся по номенклатуре, мощности и параметрам ВИЭ и СНЭЭ. Этот процесс сопровождается широким внедрением микропроцессорных систем защиты, управления, контроля и связи в электрических сетях разных иерархических и территориальных уровней; ожидается рост киберугроз для объектов электроэнергетики – «мишеней» воз-

возможных кибератак. Очевидно, что энергетический сектор должен, по возможности, оценить уязвимости и киберриски по всей цепи электроснабжения, улучшая защиту объектов ЭЭС (СЭС) и предотвращая возможность каскадного развития аварийной ситуации, вызванной преднамеренным сбоем в одном из элементов.

Таким образом, построение эффективной системы обеспечения кибербезопасности – сложный, многоступенчатый и достаточно длительный процесс, связанный с выявлением «критических точек» как в технологических системах производства, передачи и распределения электроэнергии, так в инфраструктуре энергообъекта. В разработке систем обеспечения кибербезопасности и выборе средств защиты элементов, объектов и подсистем электроэнергетики должно быть учтено, что основным активом защищаемого объекта является не только информация, но и технологический процесс потребителя. И речь при этом идет даже не столько о защите от утечек информации, сколько о защите от нарушений (срывов) технологического процесса при возможной реализации киберугроз.

На основании изложенного очевидно, что научно-исследовательские и проектные организации, энергетические компании и потребители должны постоянно контролировать состояние энергообъекта, разрабатывая и внедряя элементы безопасности, так как кибератаки представляют угрозу, соизмеримую с техногенными катастрофами (наводнениями, пожарами, внезапными полными погашениями потребителей, экстремальными погодными условиями). Разработка и принятие общих и индивидуальных нормативов кибербезопасности может помочь локализовать ключевые области управления киберрисками и выявить системы и их элементы, которые должны быть защищены любой ценой.

Постановка пятой проблемы приводит к необходимости анализа не только вертикальной иерархии, но и горизонтальных связей, которые, по сути, и формируют энергетический рынок региона, включающий:

- выработку законодательных актов, регулирующих и ограничивающих действие рыночных механизмов (нормативы, цены, антимонопольные меры);
- экономическое воздействие на производителей и потребителей энергии (тарифы, налоги, кредиты, дотирование).

Рыночная экономика в энергетике выдвигает ряд задач, связанных с совершенствованием учета экономических аспектов надежности. Соответственно, определен круг задач, требующих объективных оценок последствий возможных изменений режимов электроснабжения и энергопотребления, включающих:

- разработку условий договорных отношений производителей, продавцов и потребителей энергии;

- поиск путей и методов энергосбережения на всех уровнях производства, распределения, преобразования и потребления энергии;
- разработку условий заключения договоров со страховыми компаниями и обоснований величин страховых взносов;
- разработку территориально дифференцированных по уровням напряжения, надежности, сезонам года, дням недели и времени суток тарифов;
- выбор источника электроснабжения в условиях рынка электроэнергии (мощности) и создаваемых региональных энергетических рынков;
- обоснование использования ВИЭ;
- учет использования систем РГ;
- разработку организационно-технических мероприятий по управлению киберрисками в целях обеспечения кибербезопасности элементов ЭЭС (СЭС);
- разработку организационно-технологических мер по изменению режимов энергопотребления;
- справедливое распределение прибыли между субъектами управления нагрузкой, возникающей при изменении режимов энергопотребления.

По мере развития энергетического рынка становится невозможным принуждение потребителей к поддержанию необходимых ЭЭС режимов энергоиспользования. Для этого (за исключением критических ситуаций) должны использоваться только экономические методы, стимулирующие потребителей к участию в повышении как уровня надежности ЭЭС, так и своего собственного. Один из таких стимулов – разработка системы льгот по оплате потребляемой энергии потребителям, согласным на отключение (ограничение) нагрузки при возникновении дефицитов мощности в ЭЭС. Аналогичная система льгот предлагается при добровольном снижении заявленного максимума. При выработке шкалы тарифных скидок и надбавок, предоставляемых ЭЭС потребителям возможны два направления:

- плата за электроэнергию возрастает с ростом требований потребителя к надежности его энергоснабжения;
- плата снижается, если потребитель при заключении договора дает согласие на управление нагрузкой в заранее оговоренных пределах.

Следовательно, можно идти либо от минимальной надежности для всех потребителей, повышая тарифную ставку при повышении требований потребителя, либо – от существующей, снижая ставку, если потребитель согласен на дополнительное принудительное регулирование нагрузки со стороны ЭЭС [14]. Модели повышения эффективности ЭЭС составляют задачи ценообразования на рынке энергии и мощности. Они должны учитывать варьируемую во времени суток цену спроса – предложения на энергию и мощность, для чего необходимо моделирование в реальном времени процессов,

протекающих в ЭЭС и у потребителя, учитывающих все экономически значимые особенности поставщиков электроэнергии на оптовый рынок, возможности сети, требования потребителей. Особо отметим, что решение задачи управления электропотреблением в нормальных и аварийных режимах ЭЭС включает выяснение величины ожидаемого экономического эффекта и выработку решений о распределении его между ЭЭС и потребителями. При этом прибыль потребителей от изменения режимов должна не только покрывать потери (ущерб), но и создавать стимулирующие условия для оперативного персонала, непосредственно занятого в изменении режимов энергоиспользования.

Широкое применение выдвинутых предложений возможно лишь при максимально глубоко исследовании возможностей потребителя по управлению нагрузкой. Если ЭЭС определит условия по обеспечению тех или иных показателей надежности, потребитель осуществит проверку их выполнения с технико-экономической оценкой последствий их реализации. Анализ предельных параметров и состояний производств позволяет выработать требования к надежности внешнего энергоснабжения с учетом длительности режима регулирования, периодичности, глубины ограничения. Это основа согласованного графика нагрузки с одновременной минимизацией последствий изменения нормального режима энергопотребления. Знание технологических особенностей производственных систем и условий функционирования ЭЭС (СЭС) позволит находить взаимосогласованные варианты решений, удовлетворяющие и ЭЭС и потребителей.

Естественно, что решать такие задачи возможно лишь при наличии информации о технико-экономических последствиях, связанных с управлением объектами энергетики в нормальных, аварийных и послеаварийных условиях эксплуатации, наличия базы данных показателей энергоиспользования, соответствующих различным режимам работы производства, формируемых на единой методической основе [14]. Это позволяет приступить к решению следующих задач:

- формирования состава показателей контроля и управления режимами энергопотребления;
- разработки процедур сбора, установления источников и способов получения информации;
- разработки способов обработки, форм и средств представления, методов использования;
- переноса имеющейся информации на объекты-аналоги;
- уточнения исходной информации по мере реализации мероприятий по управлению режимами энергоиспользования;
- расчета ожидаемых и (или) фактических последствий введения режимов управления нагрузкой;

- обеспечения максимальной кибербезопасности объектов ЭЭС (СЭС);
- прогнозирования показателей по ожидаемым последствиям реализаций управления режимами энергопотребления.

Наличие подобной базы данных подготовит условия для заключения с каждым потребителем трехстороннего договора с участием производителя и оператора регионального рынка.

IV. Заключение

В рамках комплексных задач создания, размещения и использования мощностей в системах энергетики, прежде чем говорить о необходимости введения дополнительных генерирующих мощностей, необходимо решить задачу рационального использования имеющихся, включая РГ, СНЭЭ и резервы потребителей энергии. Совместное и рациональное использование избыточности ЭЭС и потребителей основано на рациональном подборе таких объектов, управление режимом работы которых при аварийных ситуациях в ЭЭС приводит к минимуму экономических потерь.

В настоящее время интерес к регулярным исследованиям систем электроэнергетического комплекса чрезвычайно велик и еще более значим, чем в 1970-1980-х гг. – на этапе динамического развития теории надежности систем энергетики и ее практических приложений. Следовательно, изменения в организационных формах управления энергетикой должны учитываться как в методических, так и в практических разработках, направленных на принятие рациональных решений в области управления развитием и эксплуатацией ЭЭС и СЭС потребителей.

Выявление, оценка и обоснование предельных величин отключаемых мощностей и параметров технологических процессов позволит так априорно планировать возможные отключения нагрузки, что они не отразятся (или минимально отразятся) на результатах работы потребителя.

Возникла настоятельная необходимость исследования системных проблем, связанных с оценкой последствий агрессивных кибератак и оптимизацией киберрисков по всей цепи от производителя электроэнергии до ее потребителя. Это позволит предотвратить (минимизировать) возможность каскадного развития последствий кибератак, повысить информированность технологического и оперативно-диспетчерского персонала энергообъектов, создать эффективные стратегии и выработать критерии киберустойчивости.

Реализация предлагаемых правил принятия решений для конкретных потребителей позволит обоснованно установить договорные значения максимумов мощности и управлять фактической нагрузкой, а также устанавливать допустимую и целесообразную степень участия потребителей в разгрузке ЭЭС при возникновении в ней аварийных ситуаций и при прохождении суточных и сезонных максимумов.

Поступила в редакцию 24.10.2022

Received 24.10.2022

Библиографический список

- [1] Афонин Н.С. Надежность электроснабжения промышленных предприятий. М.: Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. – 296 с.
- [2] Михайлов В.В. Тарифы и режимы электропотребления. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 214 с.
- [3] Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. М.: МЭИ, 2010. – 188 с.
- [4] Червонный Е.М., Папков Б.В. Влияние отказов в энергосистеме на состоянии промышленных объектов // Надежность и Контроль Качества. 1992. № 11. С. 29-37.
- [5] Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю. Модели оценки показателей балансовой надежности при управлении развитием электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2014. – 207 с.
- [6] Эдельман В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка. М.: Экономика, 1988. – 151 с.
- [7] Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы. Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
- [8] Папков Б.В. Электроэнергетический рынок и тарифы. Н.Новгород: НГТУ, 2002. – 252 с.
- [9] Куликов А.Л., Осокин В.Л., Папков Б.В. Проблемы и особенности распределенной электроэнергетики // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11 (90). С. 123-136.
- [10] Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н.Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.
- [11] Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети // Библиотечка электротехника. 2020. № 8 (260). С. 1-116.
- [12] Илюшин П.В., Ковалев С.П., Куликов А.Л., Небера А.А., Непша Ф.С. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы // Библиотечка Электротехника. 2021. № 8 (272). С. 1-116.
- [13] Чокин Ш.Ч., Лойтер Э.Э. Управление нагрузкой электроэнергосистем. Алмата: Наука, 1985. – 288 с.
- [14] Папков Б.В., Куликов А.Л. Теория систем и системный анализ для электроэнергетиков. М.: Юрайт, 2019. – 470 с.
- [15] Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.
- [16] Кучеров Ю.Н. [и др.]. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. М.: ООО ИД «Энергия», 2013. – 304 с.
- [17] Воропай Н.И. Надежность систем энергетики: Достижения. Проблемы. Перспективы. Новосибирск: Наука, 1999. – 433 с.
- [18] Копытов Ю.В., Крылова Н.А. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 68-77.

- [19] Антонов Г.Н., Черкасов Г.Н., Криворучский Л.Д. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1990. – 285 с.
- [20] Папков Б.В., Савельев В.А. Об анализе последствий от нарушений электроснабжения // Вестник ИГЭУ. 2016. № 3. С. 46-50. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.046-050
- [21] Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. Новосибирск: НГТУ, 2003. – 256 с.
- [22] Шарьгин М.В. Оценка последствий отключений потребителей электроэнергии. Методы и модели. Н.Новгород: НГТУ, 2014. – 201 с.
- [23] Папков Б.В., Куликов А.Л., Осокин В.Л. Проблемы кибербезопасности электроэнергетики // Библиотечка Электротехника. 2017. № 9 (225). С. 1-96.

References

- [1] N.S. Afonin, *Nadyozhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij [Reliability of power supply of industrial enterprises]*. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1958 (in Russian).
- [2] V.V. Mikhailov, *Tarifny i rezhimy elektropotrebleniya [Tariffs and power consumption modes]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [3] V.A. Nepomnyaschiy, *Ekonomicheskie poteri ot narushenij elektrosnabzheniya potrebitel'ev [Economic losses from power supply failures of consumers]*. Moscow: MPEI, 2010 (in Russian).
- [4] E.M. Chervonnoy and B.V. Papkov, “Vliyaniye otказov v energosisteme na sostoyaniye promyshlennykh ob"ektov [Impact of failures in the power system on the state of industrial facilities]”, *Nadezhnost' i kontrol' kachestva [Reliability and quality control]*, no. 11, pp. 29-37, 1992 (in Russian).
- [5] Yu.Ya. Chukreev and M.Yu. Chukreev, *Models for assessing balance reliability indicators in managing the development of electric power systems [Models for assessing balance reliability indicators in managing the development of electric power systems]*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014 (in Russian).
- [6] V.I. Edelman, *Nadyozhnost' tekhnicheskikh sistem: ekonomicheskaya ocenka [Reliability of technical systems: economic assessment]*. Moscow: Economics, 1988 (in Russian).
- [7] V.G. Kitushin, *Nadyozhnost' energeticheskikh sistem. Chast' 1. Teoreticheskie osnovy [Reliability of energy systems. Part 1. Theoretical foundations]*. Novosibirsk: NSTU, 2003 (in Russian).
- [8] B.V. Papkov, *Elektroenergeticheskij rynek i tarify [Electric power market and tariffs]*. N. Novgorod: NNSTU, 2002 (in Russian).
- [9] A.L. Kulikov, V.L. Osokin and B.V. Papkov, “The problems and peculiarities of distributed electricity”, *Bulletin NGIEI*, no. 11 (90), pp. 123-136, 2018.
- [10] P.V. Ilyushin and A.L. Kulikov, *Avtomatika upravleniya normal'nymi i avarijnymi rezhimami energorajonov s raspredelyonnoy generaciej [Automation of control of normal and emergency modes of power energy districts with distributed generation]*. N. Novgorod: NRU RANEPa, 2019 (in Russian).

- [11] P.V. Ilyushin, “Prospects for application and problematic issues of integration of distributed energy sources into electrical networks”, *Library of Electrician*, no. 8 (260), pp. 1-116, 2020.
- [12] P.V. Ilyushin, S.P. Kovalev, A.L. Kulikov, A.A. Nebera and F.S. Nepsha, “Smart control of distributed energy resources on the basis of the digital platform”, *Library of Electrician*, no. 8 (272), pp. 1-116, 2021.
- [13] Sh.Ch. Chokin and E.E. Loiter, *Upravlenie nagruzkoy elektroenergosistem [Power system loads management]*. Alma-Ata: Science, 1985 (in Russian).
- [14] B.V. Papkov, and A.L. Kulikov, *Teoriya sistem i sistemnyj analiz dlya elektroenergetikov [Systems theory and systems analysis for electric power industry]*. Moscow: Urait, 2019 (in Russian).
- [15] Yu.N. Rudenko and I.A. Ushakov, *Nadezhnost' sistem energetiki [Reliability of energy systems]*. Novosibirsk: Science. Sib. Department, 1989 (in Russian).
- [16] Yu.N. Kucherov et al., *Koncepciya obespecheniya nadyozhnosti v elektroenergetike [The concept of ensuring reliability in electric power industry]*. Moscow: LLC Publishing House “Energy”, 2013 (in Russian).
- [17] N.I. Voropay, *Nadyozhnost' sistem energetiki: Dostizheniya. Problemy. Perspektivy [Reliability of energy systems: achievements, problems, prospects]*. Novosibirsk: Science, 1999 (in Russian).
- [18] Yu.V. Kopytov and N.A. Krylova, *Instruktivnye materialy Glavgosenergonadzora [Guidance materials of Glavgosenergonadzor]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986, pp. 68-77 (in Russian).
- [19] G.N. Antonov, G.N. Cherkasov and L.D. Krivorutsky, *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems]*. Novosibirsk: Science, Sib. Department, 1990 (in Russian).
- [20] B.V. Papkov and V.A. Savelyev, “Analysis of power supply interruption consequences”, *Vestnik IGEU*, no. 3, pp. 46-50, 2016. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.046-050
- [21] V.G. Kitushin, *Nadezhnost' energeticheskikh sistem [Reliability of energy systems]*. Novosibirsk: NGTU, 2003 (in Russian).
- [22] M.V. Sharygin, *Ocenka posledstviy otklyuchenij potrebitelej elektroenergii. Metody i modeli [Assessment of the consequences of electricity blackouts of consumers. Methods and models]*. Nizhny Novgorod: NNSTU, 2014 (in Russian).
- [23] B.V. Papkov, A.L. Kulikov and V.L. Osokin, “Problemy kiberbezopasnosti elektroenergetiki [Problems of cybersecurity of electric power industry]”, *Library of Electrician*, no. 9 (225), pp. 1-96, 2017 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Осокин Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижегородская область, Российская Федерация

Vladimir L. Osokin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation

УДК 621.311.23

DOI 10.46960/2658-6754_2022_4_95

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ НА СВАЛОЧНОМ ГАЗЕ

А.А. Жидков

e-mail: alexeyzhidkov@list.ru

Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

А.З. Абасс

ORCID: [0000-0003-1836-3435](https://orcid.org/0000-0003-1836-3435) e-mail: theking.amir@mail.ru

Университет Васит
Васит, Ирак

Х.Т. Аль Рикаби

e-mail: hdhiyab@uowasit.edu.iq

Университет Васит
Васит, Ирак

Факторы, препятствующие вводу в эксплуатацию электростанций, функционирующих на свалочном газе, проанализированы с точки зрения элементов распределенной генерации. Выполнена оценка эффективности использования таких объектов генерации для снижения потерь электроэнергии и выравнивания графика нагрузки в распределительных электрических сетях. Проведенный расчет подтверждает эффективность применения объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электроэнергии даже в сети незначительной протяженности. При этом эффективность объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии растет тем сильнее, чем дальше она подключается в сеть от центра питания. Технико-экономическая оценка также показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки в распределительной электрической сети более чем в пять раз выгоднее классической системы накопления энергии при технически сопоставимых параметрах.

Ключевые слова: выравнивание графика нагрузки, потери электроэнергии, распределенная генерация, свалочный газ.

Для цитирования: Жидков А.А., Абасс А.З., Аль Рикаби Х.Т. Оценка эффективности использования объектов генерации на свалочном газе // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 95-111. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_95

EFFICIENCY ASSESSMENT OF USING GENERATION FACILITIES WITH LANDFILL GAS

A.A. Zhidkov

e-mail: alexeyzhidkov@list.ru
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

A.Z. Abass

ORCID: [0000-0003-1836-3435](https://orcid.org/0000-0003-1836-3435) e-mail: theking.amir@mail.ru
Wasit University
Wasit, Iraq

H.Th. Al Rikabi

e-mail: hdhiyab@uowasit.edu.iq
Wasit University
Wasit, Iraq

Abstract. The article presents the factors that prevent the commissioning of power plants operating on landfill gas as an element of distributed generation and evaluates the efficiency of using such generation facilities to reduce electricity losses and level the load balancing in distributed electrical networks. The results of the calculation confirm the effectiveness of the use of a landfill gas generation facility to reduce electricity losses even in a network of small length. At the same time, the efficiency of the landfill gas generation facility to reduce the losses of electrical energy increases more strongly when it is connected to the network further from the power feeder. A feasibility study also showed that the use of a landfill gas generation facility to equalize the load curve in a distributed electrical network is more than five times more profitable than the use of a classical energy storage system with technically comparable parameters.

Keywords: load curve leveling, power losses, distributed generation, landfill gas.

For citation: A.A. Zhidkov, A.Z. Abass and H.Th. Al Rikabi, "Efficiency assessment of using generation facilities with landfill gas", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 95-111, 2022. DOI: [10.46960/2658-6754_2022_4_95](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2022_4_95)

I. Введение

Одним из перспективных способов сокращения негативного влияния твердых коммунальных отходов (ТКО) на экологию является использование систем дегазации полигонов ТКО с дальнейшей утилизацией свалочного газа с помощью газопоршневых установок (ГПУ). Данный вид генерации относится к генерации, функционирующей на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

Механизм поддержки объектов ВИЭ на розничном рынке электроэнергии (в том числе, генерирующих объектов на свалочном газе) вступил в силу в 2015 г. с принятием соответствующего Постановления Правительства РФ [2]. Основной принцип механизма поддержки ВИЭ заложен в федеральном законе (ФЗ) [3], где зафиксирована норма об обязательной покупке в приоритетном порядке электрической энергии, выработанной генерирующими объектами, функционирующими на основе использования ВИЭ, сетевыми компаниями в целях компенсации потерь в сетях. Также уточняется, что государственному регулированию подлежат цены (тарифы) на электрическую энергию (мощность), произведенную на функционирующих на основе использования ВИЭ квалифицированных генерирующих объектах.

Однако, несмотря на то, что все нормативные условия по развитию генерации на свалочном газе сформированы, в период с 2015 г. и по настоящее время в нашей стране введен только один такой объект (электростанция 2,4 МВт на базе полигона твердых бытовых отходов «Новый Свет-Эко» в Гатчинском районе Ленинградской области). При этом, несмотря на то, что генерация на попутном газе [4] (в России достаточно широко распространенная), является ближайшим аналогом генерации на свалочном газе, она не квалифицируется как объект ВИЭ.

Использованию электростанций, функционирующих на свалочном газе, как элемента распределенной генерации (РГ), препятствуют некоторые факторы, свойственные для РГ, подключаемой к развитой электрической сети, а именно:

- усложнение управляемости и наблюдаемости сети;
- возможный выход некоторых технических показателей за пределы допустимых значений (токовая перегрузка, рост токов короткого замыкания, динамическая устойчивость генерирующего оборудования);
- необходимость существенного изменения и перестроения систем релейной защиты (РЗ), автоматики, систем управления, связи и пр.;
- влияние качества газа на режим работы газопоршневой установки (ГПУ);
- субъективное мнение многих технических специалистов о негативном влиянии на распределительную электрическую сеть таких объектов генерации.

Большинство перечисленных негативных факторов можно решить традиционными и инновационными, техническими и организационными мероприятиями, которые, хоть и весьма затратны либо сложны, но технически реализуемы, и при этом имеется богатый опыт их применения. Например, разработаны организационные решения по планированию режимов ра-

боты энергоустановок и энергосистем [5-7] и более инновационные решения, в том числе, с использованием искусственного интеллекта [8-9] и различных методов оптимизации [10-14]. При этом рекомендуемый авторами способ обеспечения динамической устойчивости также подробно описан в других статьях [15-16]. Оценка влияния качества газа на режим работы ГПУ, обзор других особенностей генерации на свалочном газе приведены в отдельных работах [17-19].

В настоящей статье оценен потенциал использования объектов генерации на свалочном газе для повышения энергоэффективности за счет снижения потерь электрической энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети, и она направлена на изменение мнения специалистов о негативном влиянии на распределительную электрическую сеть объектов генерации, функционирующих на свалочном газе.

II. Материалы и методы

Для исследования режимов работы ГПУ на свалочном газе в составе электроэнергетической системы (ЭЭС) рассмотрена перспективная электростанция проектной установленной мощностью 1,25 МВт на территории полигона ТКО в Новосибирской области. В качестве топлива на электростанции будет использоваться газ, выделяемый в теле полигона ТКО, который с помощью системы сбора свалочного газа подается на площадку, где установлено блочно-модульное оборудование. Для обеспечения ГПУ топливом планируется к использованию комплекс специализированного оборудования для добычи, очистки и подачи свалочного газа. В состав комплекса войдут:

- газосборная станция, подключенная к скважинам, пробуренным в теле полигона;
- газокompрессорная станция, обеспечивающая подачу газа;
- высокотемпературная факельная установка для сжигания излишних объемов газа;
- установки очистки газа (УОГ).

Работа комплекса по добыче и подаче свалочного газа выглядит следующим образом: газ, добываемый из тела полигона с помощью газосборной и газокompрессорной станций, проходит очистку в УОГ и затем подается на ГПУ, излишки газа сжигаются на факельной установке. Во время обслуживания генерирующего оборудования электростанции весь объем добываемого газа сжигается на факельной установке. В состав электростанции войдет 5 установок ГПУ производства Тутаевского моторного завода установленной мощностью 250 кВт каждая. Как показано в [19], располагаемая мощность каждого агрегата, в силу низкой калорийности свалочного газа, будет значительно ниже номинальных параметров и составит порядка 200 кВт. Планируемый режим работы электростанции – круглогодичный

круглосуточный. По умолчанию планируется, что в течение суток электростанция будет работать ровным графиком, загружаясь до своей располагаемой мощности. В течение года режим работы электростанции аналогичный – загрузка ровным графиком до располагаемой мощности, за исключением периодов останова оборудования для целей обслуживания.

В табл. 1 приведен расчет выработки электростанции.

Таблица 1.
Расчет выработки электростанции

Table 1.
Calculation of power plant generation

| №ГГ | $P_{уст},$ кВт | $P_{расп},$ кВт | Число часов использования $P_{расп},$ ч/год | Выработка max/min, млн кВт.ч/год |
|-------|-------------------|--------------------|---|-------------------------------------|
| Г1 | 250 | 200 | 8000 | 1,600 |
| Г2 | 250 | 200 | 8000 | 1,600 |
| Г3 | 250 | 200 | 8000 | 1,600 |
| Г4 | 250 | 200 | 8000 | 1,600 |
| Г5 | 250 | 200 | 8000 | 1,600 |
| ИТОГО | 1250 | 1000 | 8000 | 8,000 |

Район расположения электростанции находится на расстоянии около 2 км от РП-490. РП-490 подключен к ПС 110 кВ Пашино кабельными линиями – I с.ш. кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена сечением 500 мм² протяженностью 3,66 км (ф.10212), II с.ш. двумя кабельными линиями сечением АСБ-120 и АСБ-150 протяженностью 2,2 км и 2,3 км соответственно (ф.10227/ф.10229). От РП-490 осуществляется электроснабжение жилых районов и садовых обществ. В непосредственной близости от площадки ГПУ проходят два фидера 10 кВ – фидер 2 и фидер 7, отходящие от РП-490. Они выполнены в кабельно-воздушном исполнении. По фидеру 2 осуществляется электроснабжение села и ряда дачных обществ. Головной участок фидера выполнен кабелем сечением АСБ 3х95 протяженностью 0,25 км, магистральная линия фидера выполнена проводами марок АС-95 и А-70. По фидеру 7 осуществляется электроснабжение нескольких сел и ряда дачных обществ. Головной участок фидера выполнен кабелем сечением АСБ 3х240 протяженностью 0,05 км, и проводом АС-95 протяженностью 0,15 км, магистральная линия фидера выполнена проводами марок А-70 и А-50. На площадке электростанции предусматривается сооружение трансформаторной подстанции (ТП), включающей распределительное устройство (РУ) с двумя трансформаторами мощностью по 1600 кВА (ТП ГПУ) с подключением трех ГПУ на одну секцию РУ 0,4 кВ и двух ГПУ на другую.

Рассмотрено два варианта подключения ТП ГПУ к сети 10 кВ ПС 110 кВ Пашино:

- *вариант 1*: подключение ТП ГПУ к ф. 2 и ф. 7 посредством строительства отпаяк протяженностью около 0,05 км, выполненных самонесущим изолированным проводом СИП-3 сечением 70 мм².
- *вариант 2*: подключение ТП ГПУ к шинам 10 кВ РП-490 посредством строительства двух ЛЭП 10 кВ от ТП ГПУ до РП-490 протяженностью около 2 км, выполненных самонесущим изолированным проводом СИП-3 сечением 70 мм².

Схема присоединения ТП ГПУ к сети 10 кВ ПС 110 кВ Пашино для варианта 1 и 2 приведена на рис. 1.

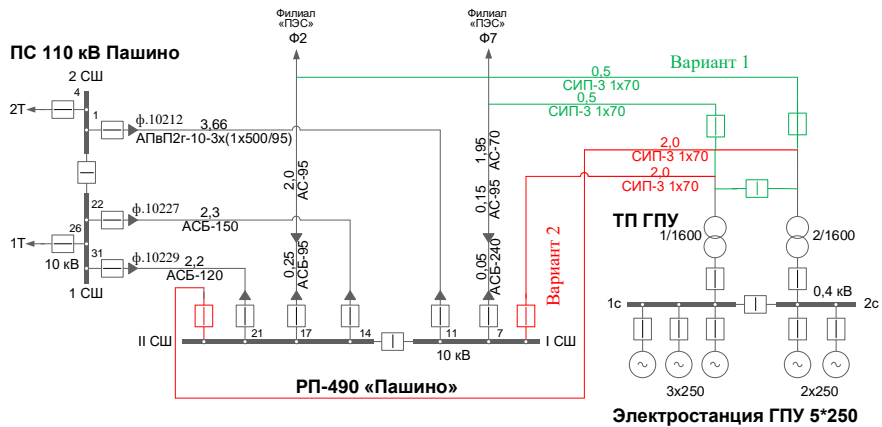


Рис. 1. Схема присоединения ГПУ к сети

Fig. 1. Scheme of connecting the gas piston units (GPU) to the grid

Расчеты проводятся в программном комплексе *RastrWin*, при этом учитываются особенности задания генерации и нагрузки, влияющие на результаты исследования.

Располагаемая реактивная мощность моделируемых генераторов ограничивается сверху двумя факторами:

1) ток статора не должен превышать максимально допустимого значения:

$$Q_{\max i} = \sqrt{\left(k_i \frac{P_{\text{НОМ}}}{\cos \varphi_{\text{НОМ}}} \frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2 - P^2}; \quad (1)$$

2) ток возбуждения не должен превышать максимально допустимого значения (при номинальной частоте этому соответствует ограничение величины ЭДС, генерируемой в статоре):

$$Q_{\max E} = k_E \frac{E_{q, \text{НОМ}} U}{X_d} \cos \delta_\Gamma + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos 2\delta_\Gamma - \frac{U^2}{2} \frac{X_d + X_q}{X_d X_q}. \quad (2)$$

Потребители заданы с учетом статических характеристик нагрузки, которые имеют следующий вид:

$$P(V, \Delta f) = P_{\text{НОМ}} \left[\alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right) + \alpha_2 \text{РПЕ} \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right)^2 + K^P \Delta f^{\text{о.е.}} \right]; \quad (3)$$

$$Q(V, \Delta f) = Q_{\text{НОМ}} \left[b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right) + b_2 \left(\frac{V}{V_{\text{НОМ}}} \right)^2 + K^Q \Delta f^{\text{о.е.}} \right], \quad (4)$$

где $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ – коэффициенты полинома статических характеристик нагрузки по активной и реактивной мощности; условия $P = P_{\text{НОМ}}, Q = Q_{\text{НОМ}}$ при $V = V_{\text{НОМ}}$ выполняются, если $a_0 + a_1 + a_2 = 1$ и $b_0 + b_1 + b_2 = 1$. Нагрузка в обобщенной характеристике соответствует ситуации:

- $a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = 1, b_0 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянные сопротивления;
- $a_0 = 0, a_1 = 1, a_2 = 0, b_0 = 0, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянный ток;
- $a_0 = 1, a_1 = 0, a_2 = 1, b_0 = 1, b_1 = 1, b_2 = 0$ – постоянная мощность.

Исследование режимов работы сети показало, что для обоих вариантов при ремонте ф. 10212 и аварийном отключении ф.10229 загрузка ф. 10227 составит 254-269 А (121,5-128,7 % от длительно допустимого тока КЛ и 108,1-114,5 % от аварийнодопустимого тока КЛ). Результат расчета данного режима приведен на рис. 2.

III. Оценка влияния объекта генерации на свалочном газе на снижение потерь электрической энергии в распределительной электрической сети

Исследования [20-21] показали положительное влияние РГ на снижение потерь в распределительной электрической сети. Поэтому одним из положительных эффектов подключения объекта генерации на свалочном газе к электроэнергетической системе можно считать снижение потерь электрической энергии при передаче мощности. Для количественной оценки снижения потерь выполним расчеты с учетом и без учета объекта генерации на свалочном газе.

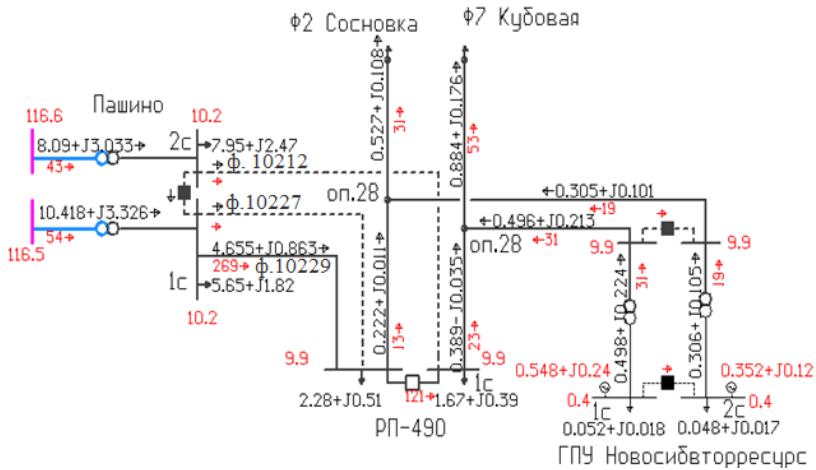


Рис. 2. Результат расчета режима – ремонт ф.10212 и отключение ф.10229

Fig. 2. The result of the calculation of the mode – the repair of feeder 10212 and the shutdown of feeder 10229

Результаты расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 3 и 4.

Таблица 2.

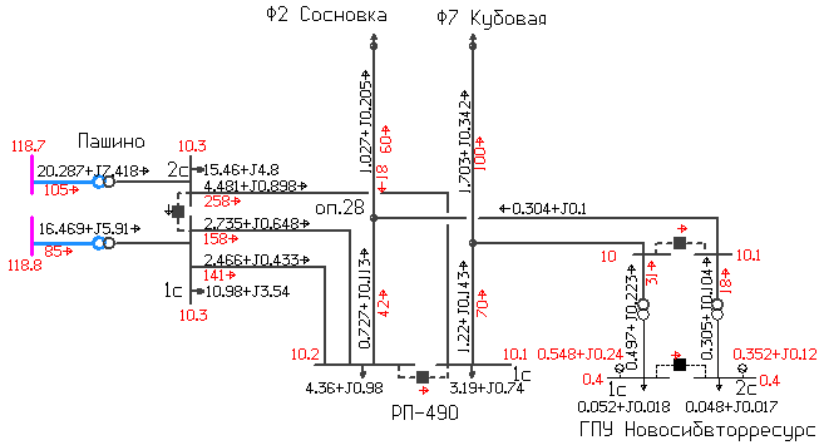
Расчетные значения мощности при оценке потерь

Table 2.

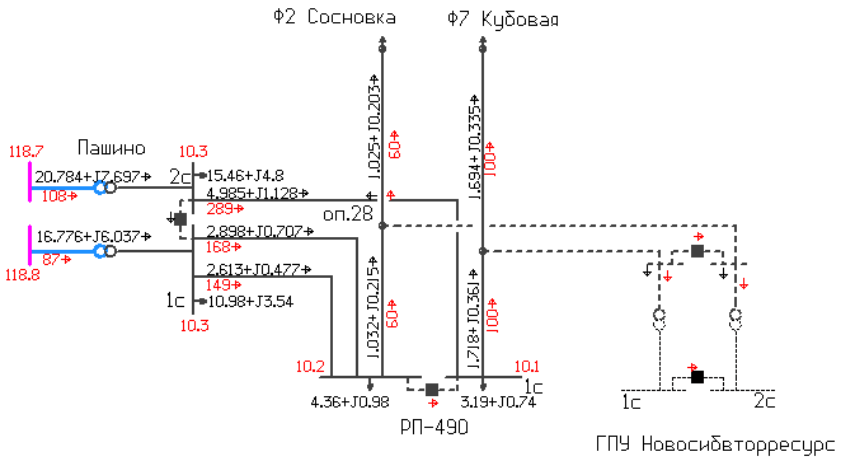
Estimated power values for loss estimation

| | $P_{\text{потр}}$, МВт | ΔP , МВт | ΔP , % | Снижение потерь, % |
|----------------------------|-------------------------|------------------|----------------|--------------------|
| Существующая схема | 37,563 | 0,319 | 0,85 | - |
| После ввода ГПУ. Вариант 1 | 37,658 | 0,282 | 0,75 | 12 |
| После ввода ГПУ. Вариант 2 | 37,671 | 0,303 | 0,8 | 6 |

Результаты расчета подтверждают эффективность применения объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь даже в сети незначительной протяженности. Также выявлено, что для варианта 1, в котором объект генерации подключен дальше от центра питания, снижение потерь в два раза больше, чем в варианте 2. Таким образом, эффективность объекта генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической энергии растет тем сильнее, чем дальше она подключается в сеть от центра питания.



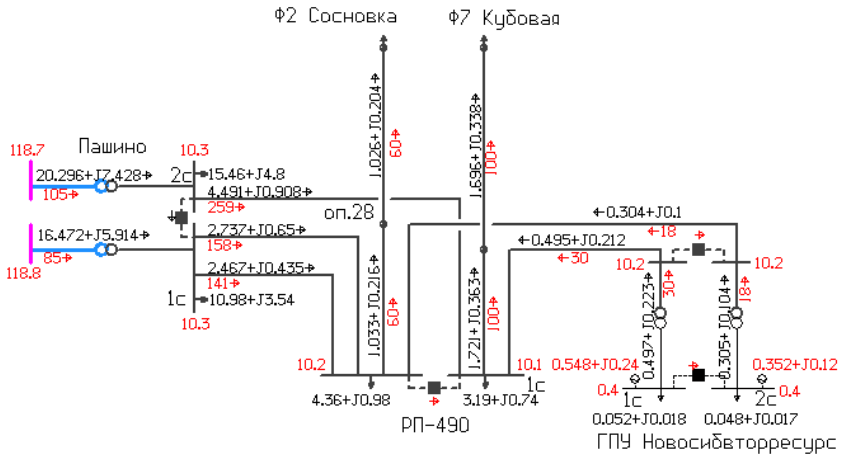
(a)



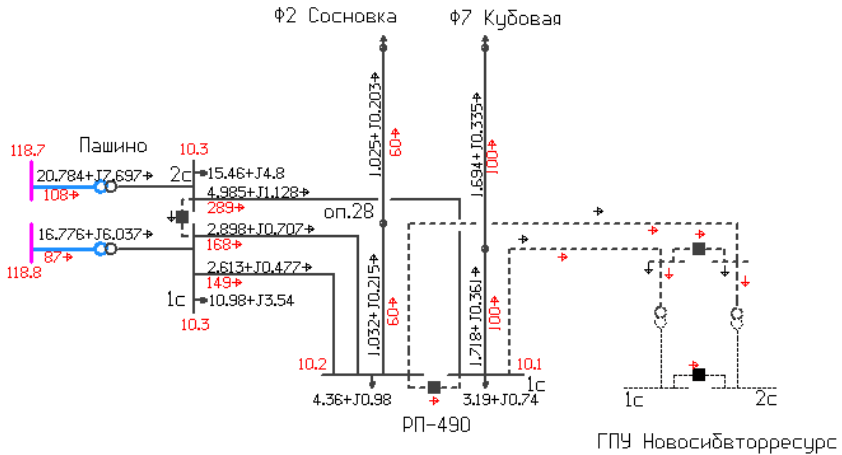
(б)

Рис. 3. Нормальный режим. Вариант 1:
с учетом ввода ГПУ (а); без учета ввода ГПУ (б)

Fig. 3. Normal mode. Option 1:
taking into account the input of the GPU (a); without GPU (б)



(a)



(б)

Рис. 4. Нормальный режим. Вариант 2:
с учетом ввода ГПУ (а); без учета ввода ГПУ (б)

Fig. 4. Normal mode. Option 2:
taking into account the input of the GPU (a); without GPU (б)

IV. Использование объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки в распределительной электрической сети

Режим работы объектов генерации на свалочном газе может быть принят не равномерным графиком, а повторять кривую потребления мощности потребителей, тем самым покрывая пики потребления и разгружая сетевое оборудование. Так, например, для рассматриваемого примера в пик потребления недопустим ремонт питающих РП-490 кабельных линий электропередачи – ф. 10229, ф. 10227, ф.10212, так как загрузка оставшихся в работе кабельных линий электропередачи – ф. 10229 и ф. 10227 – может превышать длительно допустимую и аварийно-допустимую величину (максимальная загрузка ф.10227 299 А, что составляет 121,6 % от длительно допустимого тока КЛ). Таким образом, в настоящее время для обеспечения возможности ремонта линий электропередачи требуется реконструкция сети с увеличением пропускной способности кабельных линий. Однако, анализируя график загрузки по ф. 10227 (рис. 5), можно сделать вывод, что ток нагрузки превышает допустимый ток только 4-5 часов в сутки, и проблему перегрузки можно решить не глобальной реконструкцией сети, а локальными мероприятиями в виде накопителя энергии, который будет отдавать запасаемую за сутки мощность в течение 4-5 пиковых часов.

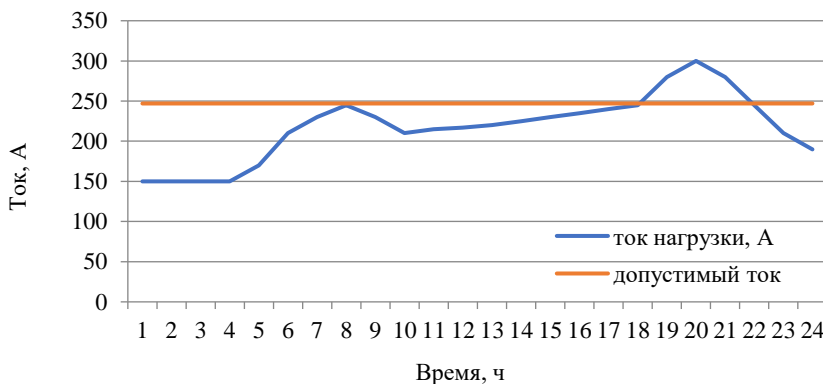


Рис. 5. Суточный график нагрузки по перегружаемой ЛЭП

Fig. 5. Daily load schedule for overloaded power lines

При этом электростанция на свалочном газе также может выполнять роль такого накопителя, поскольку в течение суток может выкачивать газ из тела полигона и сжигать его, вырабатывая электроэнергию не равномерным графиком, а в режиме работы накопителя – т.е. в ночные часы мини-

мума потребления снижать выдаваемую мощность, а в пиковые часы – увеличивать. Так, в рассматриваемом примере для обеспечения возможности ремонта сетевого оборудования требуется увеличение количества ГПУ с 5 до 8 единиц. Расчеты загрузки сети для разного количества ГПУ приведены в табл. 3.

Таблица 3.
Максимальная загрузки сети для разного количества ГПУ

Table 3.
Maximum load in network for different number of GPU

| Элементы сети | Переток, МВА | Загрузка, А | I _{доп} , А | % |
|--|--------------|-------------|----------------------|--------------|
| Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 5 блоков | | | | |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10212) | 4.491+J0.908 | 259 | 602 | 43,0 |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10229) | откл. | - | 280 | - |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10227) | 5.227+J1.105 | 300 | 247 | 121,6 |
| КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.17) – оп.28 (ф.2) | 1.023+J0.209 | 60 | 242 | 24,8 |
| КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.7) – оп.28 (ф.7) | 1.721+J0.363 | 100 | 342 | 29,3 |
| ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №1 | 0.495+J0.212 | 30 | 375 | 8,0 |
| ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №2 | 0.304+J0.1 | 18 | 375 | 4,8 |
| Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 8 блоков | | | | |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10212) | 4.978+J1.115 | 300 | 602 | 50 |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10229) | откл. | - | 280 | - |
| КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино – РП-490 (ф.10227) | 4.229+J0.656 | 244 | 247 | 99 |
| КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.17) – оп.28 (ф.2) | 1.023+J0.209 | 60 | 242 | 24,8 |
| КВЛ 10 кВ РП-490 (яч.7) – оп.28 (ф.7) | 1.721+J0.363 | 100 | 342 | 29,3 |
| ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №1 | откл. | 30 | 375 | 8,0 |
| Отключение КЛ 10 кВ ПС 110 кВ Пашино - РП-490 (ф.10229). ГПУ 8 блоков | | | | |
| ВЛ 10 кВ РП-490 – ТП ГПУ ООО «НВР» №2 | 1.294+J0.524 | 18 | 375 | 4,8 |

Проведенный расчет показал, что добавление трех ГПУ и перевод их всех на одну СШ полностью решают проблемы токовой перегрузки кабельных линий и обеспечивают возможность проведения ремонта.

Таким образом, с технической точки зрения использование объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки и увеличения пропускной способности сети является эффективным. Для оценки экономической эффективности сравним затраты на увеличение количества ГПУ с 5 до 8 единиц с затратами на строительство классической системы накопления электрической энергии с использованием преобразователей энергии и аккумуляторных батарей. Оценка стоимости расширения электростанции приведена в табл. 4.

Таблица 4.
Максимальная загрузки сети для разного количества ГПУ

Table 4.
Maximum network load for different number of GPUs

| Наименование | Кол-во | Цена, тыс. руб. | Капитальные затраты, тыс. руб. |
|--|--------|-----------------|--------------------------------|
| ГПУ GazEcos ТМЗ 250 кВт | 3 | 3 950 | 11 850 |
| Глушитель низкошумный | 3 | 150 | 450 |
| Контейнер с технологическими системами | 3 | 715 | 2 145 |
| Пуско-наладочные работы | 3 | 150 | 450 |
| Итого | | | 14 895 |

Для получения сопоставимого эффекта при использовании классической системы накопления электрической энергии с использованием преобразователей энергии и аккумуляторных батарей требуется система накопления мощностью 500 кВт и емкостью не менее 1500 кВтч. Приближенные капитальные затраты на реализацию такой системы накопления составят порядка 85 млн руб. (17500 тыс. руб. за преобразователь (принята удельная стоимость 35 тыс. руб. за кВт) и 67500 тыс. руб. за накопитель (принята удельная стоимость 45 тыс. руб. за кВтч).

Таким образом, технико-экономическая оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки электрической сети более чем в 5 раз выгоднее применения классической системы накопления энергии при технически сопоставимых параметрах.

V. Заключение

В рамках проведенного исследования выполнена оценена эффективности использования объектов генерации на свалочном газе для повышения энергоэффективности за счет снижения потерь электрической энергии и выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети, которая подтвердила положительное влияние объектов генерации на свалочном газе на энергоэффективность. Подтверждена эффективность применения объектов генерации на свалочном газе для снижения потерь электрической

энергии в распределительной электрической сети. Показано, что снижение потерь может составлять порядка 12 % даже в сети незначительной протяженности. При этом: чем дальше объект генерации устанавливается от центра питания, тем его эффективность выше.

Доказана эффективность использования объектов генерации на свалочном газе для выравнивания графика нагрузки распределительной электрической сети. Оценка показала, что применение объекта генерации на свалочном газе для этих целей экономичнее классической системы накопления электрической энергии более чем в пять раз.

© Жидков А.А., 2022

© Абасс А.З., 2022

© Аль Рикаби Х.Т., 2022

Поступила в редакцию 17.10.2022

Received 17.10.2022

Библиографический список

- [1] Постановление Правительства РФ от 03.06.2008 № 426 (ред. от 02.04.2021) “О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии”.
- [2] Постановление Правительства РФ от 17.02. 2014 № 117 “О некоторых вопросах, связанных с сертификацией объемов электрической энергии, производимой на функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии квалифицированных генерирующих объектах”.
- [3] Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 27.12.2018) “Об электроэнергетике” (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2019).
- [4] Bishnoi D., Prakash O., Chaturvedi H. Utilizing flared gas for distributed generation: An optimization based approach // AIP Conference Proceedings. 2019. 020007. DOI: 10.1063/1.5096498
- [5] El-Khattam W., Hegazy Y.G., Salama M.M.A. An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. № 20 (2). P. 1158-1165. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846114
- [6] Payasi R., Singh A. and Singh D. Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. № 3 (3). P. 133-153. DOI: 10.4314/ijest.v3i3.68430
- [7] Viral R., Khatod D.K. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. № 16 (7). P. 5146–5165. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.020
- [8] Microturbines // WBDG. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines> (дата обращения 28.11.2022).
- [9] Nath R.P., Balaji V.N. Artificial intelligence in power systems // IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE). 2014. DOI: 10.23883/ijrter.2018.4234.eywih

- [10] Reddy S.V., Swathi S. Optimal allocation and sizing of multiple distributed generation in distribution network by ant colony search algorithm // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2014. № 3 (1). P. 59-63.
- [11] Kaur P., Kaur S., Khanna R. Optimal placement and sizing of DG comparison of different techniques of DG placement // proc. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), July 4-6, 2016, Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853653
- [12] Talaat H.E.A., Al-Ammar E. Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms // proc. 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Oct. 17-19, 2011, Lisbon, Portugal. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128840
- [13] Heidari M., Nekoubin A., Heidari R., Jafari M. Optimum locating and sizing of DGs based on artificial ant colony algorithm // Research Journal of Recent Sciences. 2013. № 2 (12). P. 1-5.
- [14] Dezaki H., Abyaneh H., Agheli A., Mazlumi K. Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems // Journal of Electrical Engineering. 2012. № 63 (1). P. 47-52. DOI: 10.2478/v10187012-0007-9
- [15] Zhidkov A.A. Using electromagnetic continuously variable transmission in gas reciprocating power plant to ensure dynamic stability // proc. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), May 18-22, 2020, Sochi, Russia. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111923
- [16] Ачитаев А.А., Жидков А.А., Митрофанов С.В., Русина А.Г. Исследование управляемой гибкой связи турбины и генератора микроГЭС в автономной электроэнергетической системе // Электричество. 2020. № 1. С. 25-31. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31
- [17] Ачитаев А.А., Русина А.Г., Жидков А.А., Евсеенко П.Н. Реализация проектов генерации на свалочном газе // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3 (43). С. 67-77.
- [18] Zhdanovich A.A., Zhidkov A.A. Analysis on the possibility for construction of a power plant using landfill gas in Novosibirsk Oblast // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Oct. 6-9, 2020, Vladivostok, Russia. P. 1-7. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271216
- [19] Achitaev A.A., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Zhidkov A.A., Evseenkov P.N. Landfill gas generation projects implementation // proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia. P. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [20] Dulău L.I., Abrudean M., Bică D. Optimal location of a distributed generator for power losses improvement // proc. 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, Jan., 2016, Tirgu-Mures, Romania. P. 734-739. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.032
- [21] Civanlar S., Grainger J.J., Yin H., Lee S.S.H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction // IEEE Transactions on Power Delivery. 1988. № 3 (3). P. 1217-1223. DOI: 10.1109/61.193906

References

- [1] Decree of the Government of the Russian Federation of 03.06.2008 no. 426 (as amended on 02.04.2021) “*O kvalifikacii generiruyushchego ob"ekta, funkcioniruyushchego na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii [On the qualification of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources]*” (in Russia).
- [2] Decree of the Government of the Russian Federation of 17.02.2014 no. 117 “*O nekotorykh voprosakh, svyazannykh s sertifikaciej ob"emov elektricheskoy energii, proizvodimoy na funkcioniruyushchih na osnove ispol'zovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii kvalificirovannykh generiruyushchih ob"ektakh [On some issues related to the certification of volumes of electrical energy produced at qualified generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources]*” (in Russia).
- [3] Federal Law no. 35-FZ of March 26, 2003 (as amended on December 27, 2018) (red. ot 27.12.2018) “*Ob elektroenergetike [On the electric power industry]*” (as amended and supplemented from Jan. 1, 2019) (in Russia).
- [4] D. Bishnoi, O. Prakash and H. Chaturvedi, “Utilizing flared gas for distributed generation: An optimization based approach”, in proc. *AIP Conference Proceedings*, 020007, Apr. 2019. DOI: 10.1063/1.5096498
- [5] W. El-Khattam, Y.G. Hegazy and M.M.A. Salama, “An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1158-1165, May 2005. DOI: 10.1109/TPWRS.2005.846114
- [6] R. Payasi, A. Singh and D. Singh, “Review of distributed generation planning: objectives, constraints, and algorithms”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 133-153, Jul. 2011. DOI: 10.4314/ijest.v3i3.68430
- [7] R. Viral and D.K. Khatod, “Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 5146-5165, Sep. 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.020
- [8] Microturbines [Online]. Available at: <https://www.wbdg.org/resources/microturbines> [Accessed: Nov. 28, 2022].
- [9] R.P. Nath and V.N. Balaji, “Artificial intelligence in power systems”, *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2014. DOI: 10.23883/ijrter.2018.4234.eywih
- [10] S.V. Reddy and S. Swathi, “Optimal allocation and sizing of multiple distributed generation in distribution network by ant colony search algorithm”, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 59-63, 2014.
- [11] P. Kaur, S. Kaur and R. Khanna, “Optimal placement and sizing of DG comparison of different techniques of DG placement”, in proc. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, July 4-6, 2016, Delhi, India, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853653
- [12] H.E.A. Talaat and E. Al-Ammar, “Optimal allocation and sizing of Distributed Generation in distribution networks using Genetic Algorithms”, in proc. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Oct. 17-19, 2011, Lisbon, Portugal. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128840

- [13] M. Heidari, A. Nekoubin, R. Heidari and M. Jafari, "Optimum locating and Sizing of DGs based on artificial ant colony algorithm", *Research Journal of Recent Sciences*, vol. 2, no. 12, pp. 1-5, Dec. 2013.
- [14] H. Dezaki, H. Abyaneh, A. Agheli, and K. Mazlumi, "Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 47-52, Feb. 2012. DOI: 10.2478/v10187-012-0007-9
- [15] Zhidkov A.A., "Using Electromagnetic Continuously Variable transmission in gas reciprocating power plant to ensure dynamic stability", in proc. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 18-22, 2020, Sochi, Russia, pp. 1-6.
- [16] A.A. Achitaev, A.A. Zhidkov, C.V. Mitrofanov and A.G. Rusina, "Studying the controlled flexible coupling of the micro HPP turbine and generator operating in a self-contained electric power system", *Elektrichestvo*, no. 1, pp. 25-31, 2020. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31
- [17] A.A. Achitaev, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, "The implementation of the projects of generation on landfill gas", *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*, vol. 11, no. 3 (43), pp. 67-77, 2019.
- [18] A.A. Zhdanovich A.A. and A.A. Zhidkov, "Analysis on the possibility for construction of a power plant using landfill gas in Novosibirsk Oblast", in proc. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 6-9, 2020, Vladivostok, Russia, pp. 1-7.
- [19] A.A. Achitaev, S.A. Eroshenko, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, "Landfill gas generation projects implementation", in proc. *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [20] L.I. Dulău, M. Abrudean and D. Bică, "Optimal location of a distributed generator for power losses improvement", in proc. *9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, Jan. 2016, Tirgu-Mures, Romania, pp. 734-739. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.032
- [21] S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin and S.S.H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no.3, pp. 1217-1223, 1988. DOI: 10.1109/61.193906

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Жидков Алексей Александрович, аспирант Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск, Россия

Абасс Ахмед Зкеар Абасс, кандидат технических наук, доцент Университета Васит в Эль-Куте, Васит, Ирак

Хайдер Т. Салим Аль Рикаби, доцент Университета Васит в Эль-Куте, Васит, Ирак

Alexey A. Zhidkov, graduate student of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abass Ahmed Zkear Abass, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Wasit University, Wasit, Iraq

Haider Th. Salim Al Rikabi, associate professor of the Wasit University, Wasit, Iraq

МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ СИНХРОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ И УСЛОВИЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.А. Сулайманова

ORCID: 0000-0001-7430-7492 e-mail: venera20@tpu.ru

Томский политехнический университет

Томск, Россия

А.С. Гусев

ORCID: 0000-0003-0814-2356 e-mail: gusev_as@tpu.ru

Томский политехнический университет

Томск, Россия

Р.А. Уфа

ORCID: 0000-0002-8975-2748 e-mail: hecn@tpu.ru

Томский политехнический университет

Томск, Россия

С.А. Литвинов

e-mail: litvinovsa95@mail.ru

ООО «Газпром добыча Ямбург»

Новый Уренгой, Россия

Предложены средства всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электроснабжения на основе комплексного подхода к моделированию. Данный подход объединяет методы математического и физического моделирования, а также способ непрерывного неявного параллельного интегрирования дифференциальных уравнений. Представлена методика всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования, необходимая для проведения исследований процессов функционирования двигательной нагрузки и другого оборудования систем электроснабжения, участвующего в обеспечении надежной работы двигателей. Проведен всережимный анализ устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электроснабжения в соответствии с представленной методикой. Предложенные средства и методика обеспечивают получение информации о процессах торможения, успешного и неуспешного самозапуска синхронных двигателей, что позволяет выявлять конкретные причины нарушения устойчивости, условия работы оборудования и меры по сохранению устойчивой работы. Представ-

ленные результаты исследований устойчивости на примерах узлов синхронной двигательной нагрузки системы электроснабжения Томского нефтехимического комбината демонстрируют воспроизведение процессов и режимов в синхронных двигателях и другом оборудовании, а также необходимость применения конкретных мер для сохранения надежной работы синхронных двигателей и другого оборудования систем электроснабжения.

Ключевые слова: достоверность, моделирование, самозапуск, синхронные двигатели, системы электроснабжения, устойчивость узлов двигательной нагрузки.

Для цитирования: Сулайманова В.А., Гусев А.С., Уфа Р.А., Литвинов С.А. Методика и средства всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условия работы оборудования систем электроснабжения // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 112-125.
DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_112

METHODOLOGY AND TOOLS OF COMPREHENSIVE ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MOTOR LOAD NODES STABILITY AND EQUIPMENT OPERATION CONDITION OF POWER SUPPLY SYSTEMS

V.A. Sulaymanova

ORCID: **0000-0001-7430-7492** e-mail: **venera20@tpu.ru**
Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

A.S. Gusev

ORCID: **0000-0003-0814-2356** e-mail: **gusev_as@tpu.ru**
Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

R.A. Ufa

ORCID: **0000-0002-8975-2748** e-mail: **hecn@tpu.ru**
Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

S.A. Litvinov

e-mail: **litvinovsa95@mail.ru**
LLC «Gazprom Dobycha Yamburg»
Novy Urengoy, Russia

Abstract. The behavior of synchronous motor load nodes of power supply systems in various operating modes affects the efficiency and safety of the functioning of industrial enterprises. Therefore, a reliable analysis of the processes in synchronous motors, taking into account the driven mechanisms, relay protection and automation, as well as in other equipment of power supply systems that occur with various short-term power supply failures, is relevant task. In this paper the tools of the comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition based on an integrated approach to simulation are proposed. This approach combines methods of mathematical and physical simulation, as well as unlimited implicit parallel integration method of differential equation systems. The methodology of the comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition is presented which is necessary for research of the processes of functioning of the motor load and other equipment involved in ensuring reliable operation of the motors.

The purpose: comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operating condition of power supply systems in accordance with the presented methodology. The practical significance: the proposed tools and methodology provide sufficiently complete and reliable information about the processes of braking, successful and unsuccessful self-start of synchronous motors, which allows to identify specific causes of stability violations, operating conditions of equipment and measures to maintain stable operation. The presented results of the stability research using examples of synchronous motor load nodes of the Tomsk petrochemical combine demonstrate the reproduction of processes and modes in synchronous motors and other equipment, as well as the need to apply specific measures to preserve the reliable operation of synchronous motors and other equipment of power supply systems.

Keywords: reliability, simulation, self-start, synchronous motors, power supply system, motor load nodes stability.

For citation: V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, R.A. Ufa and S.A. Litvinov, "Methodology and tools of comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operation condition of power supply systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 112-125, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_112

I. Введение

Применяемые в настоящее время методики и различные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС) при проектировании, исследовании и эксплуатации для анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки часто не обеспечивают необходимой полноты и достоверности данного анализа. Вместе с тем, данный анализ в значительной мере определяет технологическую, экономическую эффективность и нередко безопасность функционирования предприятий, особенно нефте-, газо-, химической и энергетической отраслей [1, 2]. Главной причиной этого являются неизбежно используемые во всех современных ПВК декомпозиция режимов и процессов, а также существенные упрощения математических моделей оборудования систем

электрооборудования (СЭС) ЭЭС. Согласно теории методов дискретизации, для обыкновенных дифференциальных уравнений [3-6] применение декомпозиции и упрощений обусловлены ограничительными условиями их применимости. Кроме этого, неотъемлемым является неопределимая методическая ошибка, присущая численным методам интегрирования дифференциальных уравнений [3]. Все это указывает на проблему полноты и достоверности получаемой с помощью ПВК информации о процессах в двигателях, другом оборудовании и СЭС ЭЭС в целом, а соответственно выполняемого на основе этой информации указанного анализа.

Для решения обозначенной проблемы предлагается комплексный подход к моделированию, позволяющий применять эффективные методы, способы и средства, обеспечивающие достаточно полное воспроизведение процессов на неограниченном интервале в двигателях и СЭС ЭЭС в целом при различных нормальных и аномальных режимах работы.

II. Средства всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования систем электрооборудования

Комплексный подход объединяет аналоговое, цифровое и физическое моделирование, которые в совокупности исключают следующие ограничения, влияющие на надежное решение проблемы.

1. Применение всережимных бездекомпозиционных моделей, достаточно полно и достоверно описывающих спектр нормальных, аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в двигателях с учетом приводимых механизмов (ПМ), релейной защиты и автоматики (РЗА) в СЭС ЭЭС.

2. Способ методически точного непрерывного неявного параллельного интегрирования систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования на неограниченном интервале в реальном времени.

3. Естественное взаимодействие моделируемого оборудования и адекватное воспроизведение всевозможных коммутаций осуществляется на физическом уровне.

4. Цифровой уровень используется для управления параметрами, настройками, состоянием оборудования и информационного взаимодействия в среде моделирования.

В соответствии с данным подходом, создан экспериментальный образец – Всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС [7, 8], прошедший опытную эксплуатацию в Тюменской и Томской ЭЭС. Данный комплекс обеспечивает:

- достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале непрерывного спектра нормальных,

анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в электрических машинах, другом оборудовании и СЭС ЭЭС в целом;

- решение задач исследования, проектирования и эксплуатации, включая анализ устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования СЭС.

Основу ВМК РВ ЭЭС составляют совокупность специализированных процессоров (СП), которые специализированы по виду моделируемого силового трехфазного оборудования (электрическая машина [9], трансформатор, линия электропередачи и др.), и информационно-управляющая система:

- СП обеспечивают моделирование процессов, протекающих в оборудовании и СЭС ЭЭС в целом и методически точное решение на неограниченном интервале в реальном времени систем дифференциальных уравнений;
- коммутатор трехфазных узлов обеспечивает соединение всех СП согласно моделируемой схеме;
- микропроцессоры СП соединены с сервером для информационного обмена посредством центральных процессоров, сетевых коммутаторов и локальной компьютерной сети;
- на сервере установлено специализированное программное обеспечение, в котором реализуются все информационно-управляющие возможности.

III. Методика и исследования всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий работы оборудования

Для проведения исследований сформулированы основные положения методики всережимного анализа устойчивости узлов синхронной двигательной нагрузки и условий ее обеспечения.

1. Воспроизводится исходный квазиустановившийся режим конкретной схемы СЭС ЭЭС при наличии данных оперативно-информационного комплекса (ОИК) с их учетом, позволяющий оценить параметры всех типов двигательной нагрузки.
2. Выявляются уровень снижения или исчезновения и время восстановления напряжения, влияющие на устойчивость узлов двигательной нагрузки в конкретной схеме СЭС ЭЭС, а также максимальные токи короткого замыкания (КЗ) и самозапуска с учетом действия РЗ, автоматического повторного включения (АПВ), автоматического включения резервного питания (АВР).
3. Анализируются аварийные условия работы оборудования, участвующего в обеспечении устойчивости узлов двигательной нагрузки, главным образом термическая стойкость кабелей ввода и присоединений двигателей.

4. Моделируются мероприятия для сохранения устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы другого оборудования в конкретной схеме СЭС ЭЭС.

Исследования проведены на примерах узлов синхронных двигателей (СД) насосов оборотного водоснабжения СЭС Томского нефтехимического комбината (ТНХК) Томской ЭЭС (рис. 1).

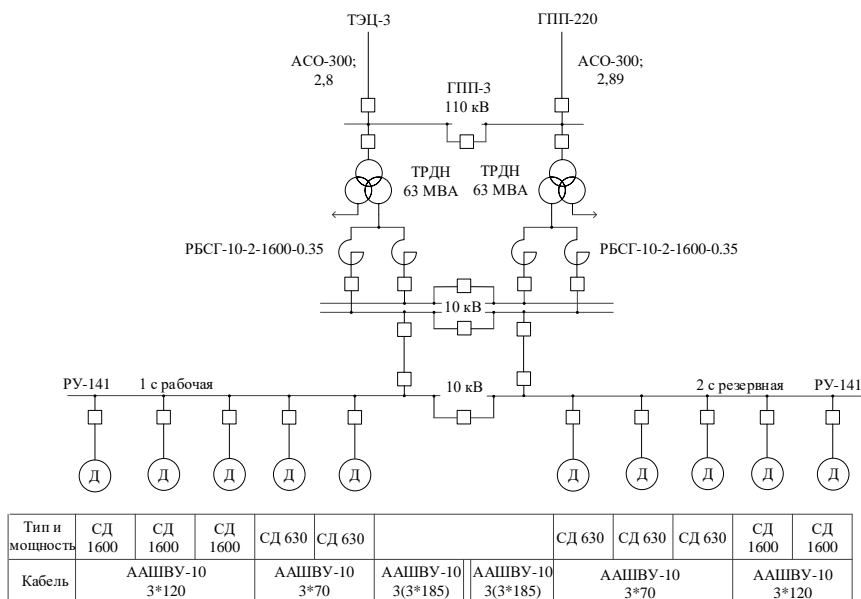


Рис. 1. Схема узла СД насосов оборотного водоснабжения СЭС ТНХК:
*ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ГПП – главная понизительная подстанция;
 РУ – распределительное устройство; Д – двигатель*

Fig. 1. Scheme of the synchronous motors of pumps for recycling water supply of power supply systems of the Tomsk petrochemical plant:

*CHPP – combined heat and power plant; GPP – main step-down substation;
 RU – switchgear; D – engine*

Режимные параметры СД, а также приведенные осциллограммы нормального пуска (рис. 2) позволяют оценить и подтвердить соответствие моделируемых СД данным технического паспорта завода-изготовителя.

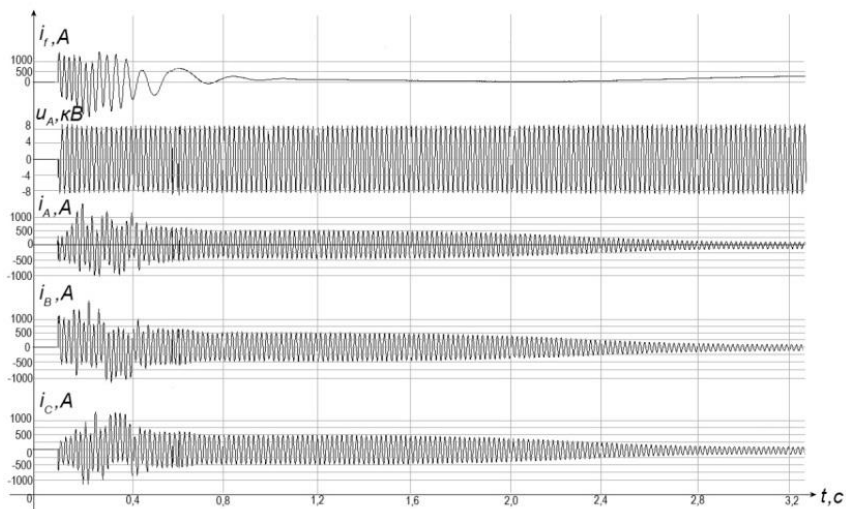
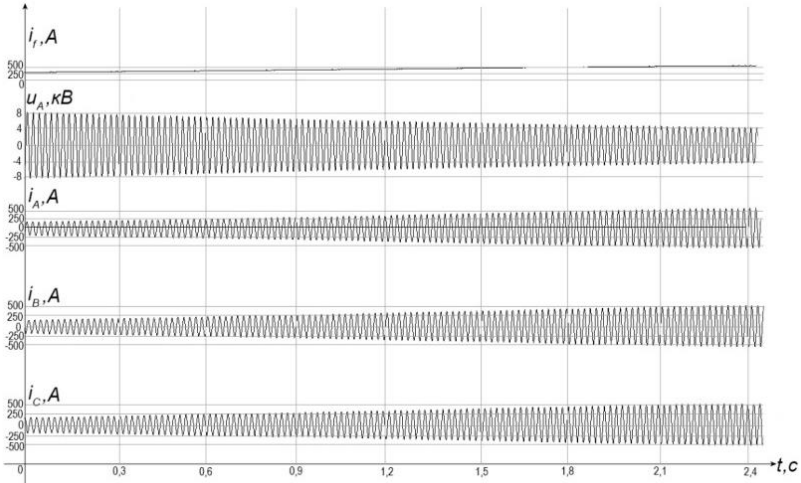


Рис. 2. Осциллограммы нормального пуска СД

Fig. 2. Oscillograms of synchronous motor normal start

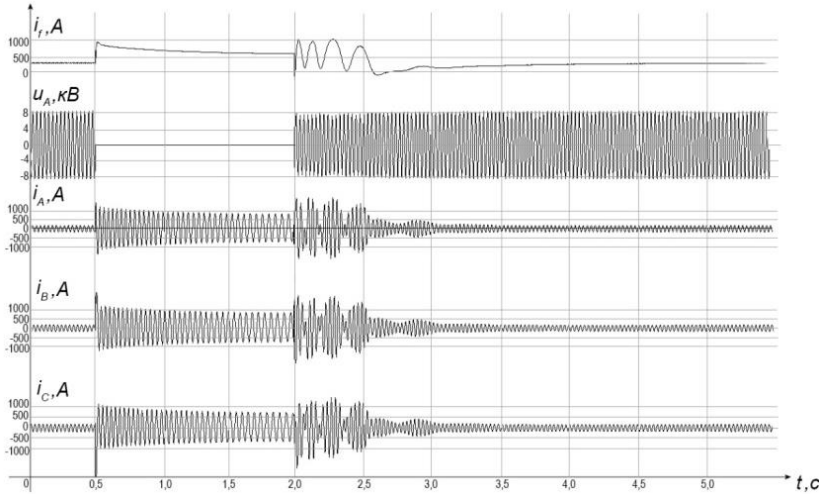
При снижении напряжения на шинах до $0,7U_n$ и $0,5U_n$ (рис. 3) токи статора СД увеличиваются, при этом синхронный режим СД сохраняется, а термические условия эксплуатации обмоток не превышают допустимых значений. Пусковые органы защит от перегрузок СД срабатывают, токи срабатывания 160 А и 75 А. Однако отключение в течение уставок времени данных защит $t_{cp} = 10$ с не происходит, так как удаленное КЗ за это время устраняется соответствующими средствами РЗА. Максимальная токовая защита (МТЗ) ввода не срабатывает, так как уставка защиты равна 2800 А, а суммарные токи всех СД составляют 874 А и 1539 А. Кроме этого, контроль снижения напряжения обеспечивает защита минимального напряжения (ЗМН), действующая на отключение всех СД, у которой стандартный расчет уставок $U_{cp} = 0,7U_{ном}$, $t_{cp} = 0,5$ с и подлежит корректировке.

При исчезновении напряжения на шинах рабочей секции (рис. 4) все СД начинают тормозиться. После восстановления напряжения в течение 1,5 с происходит успешный самозапуск всех СД с различными токами самозапуска в зависимости от степени торможения и длительности аварийного режима.



**Рис. 3. Осциллограммы процессов в СД при снижении
Напряжения на шинах питания до $0,5U_n$**

**Fig. 3. Oscillograms of synchronous motor processes
with a voltage reduction on power bus to $0,5U_n$**



**Рис. 4. Осциллограммы процессов в СД при трехфазном КЗ
на шинах питания**

**Fig. 4. Oscillograms of synchronous motor processes
with three-phase short circuit on power bus**

Успешная ресинхронизация СД при работе АВР (рис. 5, 6) возможна при $t_{\text{АВР}} < 2,5$ с. Однако в зависимости от уровней напряжения СД и резервной секции и угла δ между ними, самозапуски происходят с различными значениями токов самозапуска, в том числе, превышающими ток срабатывания МТЗ ввода [10]. Также необходимо учесть, что максимально допустимые токи включения СД превышают пусковые в 1,7 раза и определяют условия эксплуатации обмоток СД [11]. Согласно результатам моделирования, АВР необходимо производить с $t_{\text{АВР}} < 0,1$ с. Данное условие обеспечивают современные устройства АВР с силовым тиристорным коммутатором, управляемым микропроцессорным блоком (ТАВР).

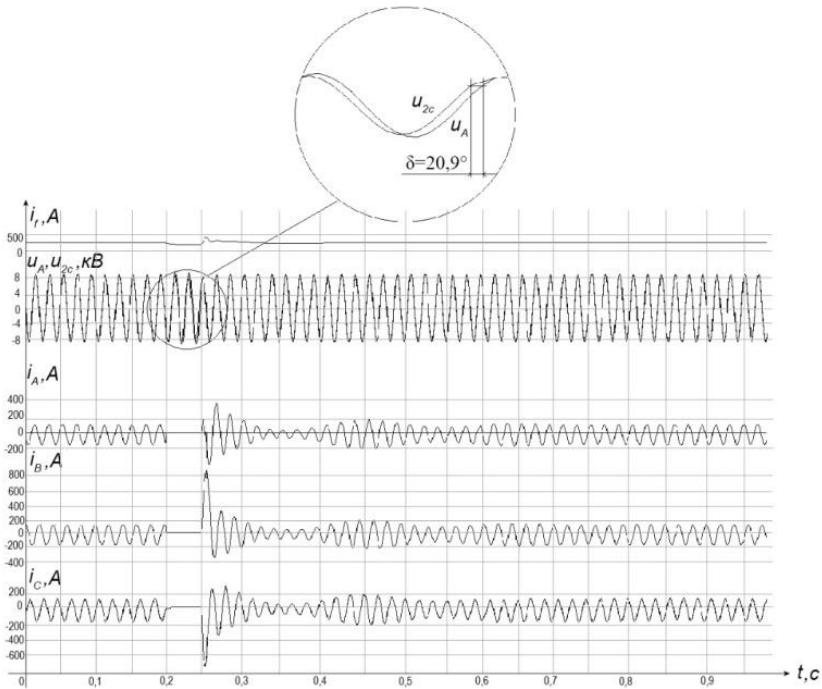


Рис. 5. Осциллограммы процессов в СД при действии АВР между секциями РУ $t_{\text{АВР}} = 0,05$ с

Fig. 5. Oscillograms of synchronous motor processes with action of automatic to reserve source between switchgear sections $t_{\text{ARS}} = 0,05$ s

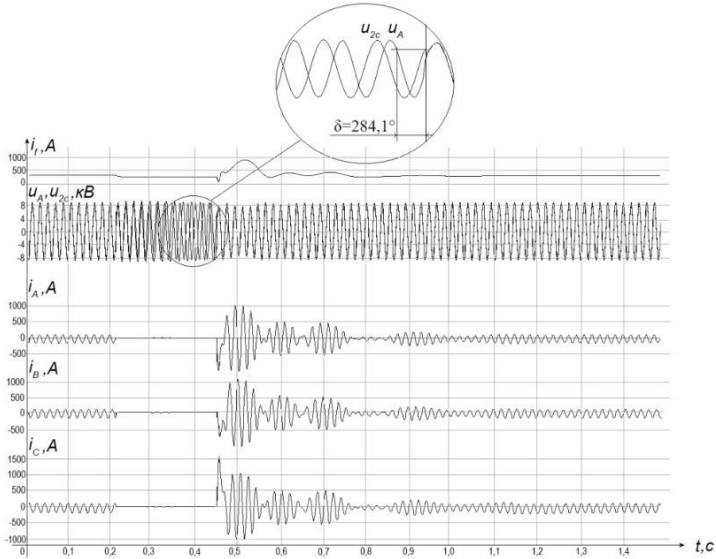


Рис. 6. Осциллограммы процессов в СД при действии АВР между секциями РУ $t_{ABP} = 0,26$ с

Fig. 6. Oscillograms of synchronous motor processes with action of automatic to reserve source between switchgear sections $t_{ARS} = 0,26$ s

Для определения термической стойкости кабеля ввода и присоединений СД рассмотрены токи трехфазного КЗ на шинах рабочей секции РУ и создаваемые ими тепловые импульсы. Тепловой импульс определяется:

$$B = \int_0^{t_u} i^2 dt, \quad (1)$$

где i – мгновенное значение тока; t_u – длительность протекания тока.

Минимальное сечение жилы кабеля по условию термической стойкости определяется:

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B}}{C}, \quad (2)$$

где $C = 90$ – коэффициент соответствующий максимально допустимой температуре $T = 200$ °C для рассматриваемого типа кабелей, т.е. с алюминиевыми жилами, бумажной изоляцией и до 10 кВ включительно [12].

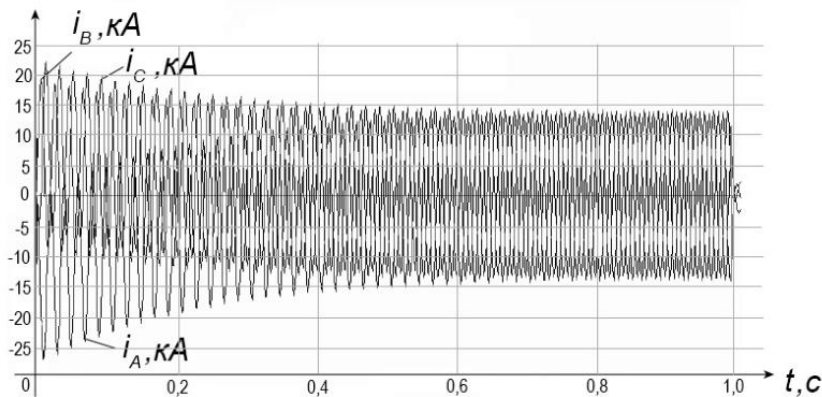


Рис. 7. Оциллограммы токов в кабеле ввода

Fig. 7. Oscillograms of currents in the input cable

Результаты моделирования КЗ и расчеты тепловых импульсов демонстрируют соответствие кабеля ввода ААШВУ $3(3 \cdot 185)$ мм² условию термической стойкости в течение 7 с, что не препятствует разрешению самозапусков СД. Для присоединений СД минимально допустимое сечение составляет 70 мм², кабели присоединений ААШВУ-10 (3 · 120) и ААШВУ-10 (3 · 70) удовлетворяют этому условию. Основными мероприятиями по обеспечению надежной работы СД СЭС ТНХК являются изменение существующих уставок ЗМН $U_{\text{ср}} \leq 0,5U_{\text{ном}}$, $t_{\text{ср}} \geq 10$ с и замена АВР на ТАВР $t_{\text{БАВР}} < 0,1$ с.

IV. Выводы

Предложены средства гибридного моделирования ВМК РВ ЭЭС, позволяющие получать достаточно полную и достоверную информацию о спектре нормальных, анормальных квазиустановившихся и переходных процессов в узлах двигательной нагрузки с учетом приводимых механизмов, средств РЗА, другого оборудования и СЭС ЭЭС в целом. Результаты могут быть использованы для проведения всережимного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы оборудования СЭС ЭЭС.

На основе предложенного подхода сформулирована методика всережимного адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий работы другого оборудования. Полученные результаты реализации методики демонстрируют адекватное воспроизведение процессов торможения, успешного или неуспешного самозапуска СД с учетом приводимых механизмов, АВР, РЗА в СЭС ЭЭС, а также определение токов самозапуска и

трехфазных КЗ, оказывающих влияние на электродинамические и термические условия эксплуатации оборудования СЭС ЭЭС.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание НАУКА НОВОЕ, № FSWW-2020-0017.

© Сулайманова В.А., 2022

© Гусев А.С., 2022

© Уфа Р.А., 2022

© Литвинов С.А., 2022

Поступила в редакцию 27.09.2022

Received 27.09.2022

Библиографический список

- [1] Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Элекс-КМ, 2005. – 407 с.
- [2] Носов К.Б., Дворак Н.М. Способы и средства самозапуска электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.
- [3] Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1979. – 312 с.
- [4] Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Оникс 21 век, 2005. – 400 с.
- [5] Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1969. – 368 с.
- [6] Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1972. – 400 с.
- [7] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. 2017. № 5 (752). С. 18-27.
- [8] Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 94-104.
- [9] Сулайманова В.А., Гусев А.С., Киевец А.В., Андреев М.В. Проблема адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки систем электроснабжения, условий ее обеспечения и средства ее решения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 172-182.
- [10] Слударж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М.: Энергия, 1977. – 216 с.
- [11] Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
- [12] Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов. М.: Академия, 2013. – 320 с.

References

- [1] Yu.E. Gurevich and K.V. Kabikov, *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovanogo na bespereboynuyu raboty promyshlennogo potrebitelya* [Features of power supply focused on the uninterrupted operation of the industrial consumer]. Moscow: Eleks-KM, 2005 (in Russian).
- [2] K.V. Nosov and N.M. Dvorak, *Sposoby i sredstva samozapuska elektrodvigately* [Methods and means of self-starting electric motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1992 (in Russian).
- [3] J. Hall and J. Watt, *Sovremennye chislennyye metody resheniya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Modern numerical methods for solving ordinary differential equations]. Moscow: Mir, 1979 (in Russian).
- [4] V.M. Verzhbitskiy, *Chislennyye metody (matematicheskiy analiz i obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)* [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow: Onyx 21st century, 2005 (in Russian).
- [5] I. Babuska, M. Prager and E. Vitasek, *Chislennyye protsessy resheniya differentsial'nykh uravneniy* [Numerical processes in differential equations]. Moscow: Mir, 1969 (in Russian).
- [6] R.W. Hamming, *Chislennyye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Numerical methods for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1972 (in Russian).
- [7] M.V. Andreev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, "Concept and basic structure of the all-mode modeling complex", *Gas Industry*, no. 5 (752), pp. 18-27, 2017.
- [8] M.V. Andreev, Yu.S. Borovikov, A.S. Gusev, A.O. Sulaimanov, A.A. Suvorov, N.Yu. Ruban and R.A. Ufa, "Practical application of the hybrid real-time power system simulator", *Gas Industry*, no. 6 (753), pp. 94-104, 2017.
- [9] V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, A.V. Kievets and M.V. Andreev, "Problem of adequate analysis of pss motor load node stability, its provision conditions and solution tools", *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, vol. 22, no. 4, pp. 172-182, 2018. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-172-182
- [10] M.I. Slodarch, *Rezhimy raboty, releynaya zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigately* [Operating modes, relay protection and automation of synchronous electric motors]. Moscow: Energiya, 1977 (in Russian).
- [11] Yu.M. Golodnov, *Samozapusk elektrodvigately* [Self-starting of electric motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1985 (in Russian).
- [12] E.A. Koniukhova, *Elektrosnabzhenie ob"ektov* [Power supply of objects]. Moscow: Academy, 2013 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Сулайманова Венера Алмазовна, ассистент Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

Venera A. Sulaymanova, assistant of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Гусев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

Aleksandr S. Gusev, D. Sci. (Eng.), professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Уфа Руслан Александрович, кандидат технических наук, доцент Томского политехнического университета, г. Томск, Российская Федерация

Ruslan A. Ufa, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

Литвинов Сергей Андреевич, электро-монтер Нефтегазодобывающего управления ООО «Газпром добыча Ямбург», Новый Уренгой, Российская Федерация

Sergey A. Litvinov, electrician of the Oil and Gas Production Administration, LLC «Gazprom Dobycha Yamburg», Novy Urengoy, Russian Federation

О ПРИМЕНЕНИИ ТВЕРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БИОГАЗЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е.Н. Соснина

ORCID: 0000-0001-6207-9103 e-mail: sosnina@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.В. Шалухо

ORCID: 0000-0002-8235-0658 e-mail: shaluho@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Ворошилов

e-mail: alejandro.voroshilov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Утилизация отходов – острейшая проблема современной цивилизации. В России существенная доля отходов приходится на сельскохозяйственное производство, в том числе 56 % – на животноводческие предприятия. Вместе с тем, широкое внедрение высокотехнологичного оборудования на современных сельскохозяйственных объектах предъявляет повышенные требования к надежности их электрооборудования, качеству электрической энергии и ее эффективному использованию. В статье рассмотрен подход к повышению экологической и энергетической безопасности животноводческих предприятий за счет применения собственных источников энергии, работающих на биогазе из переработанных отходов. Дана характеристика биомассы и приведены результаты сравнительного анализа энергоустановок на биогазе. Преимущества твердооксидных топливных элементов обуславливают перспективность их использования для электрооборудования сельскохозяйственных объектов. Определены проблемы и поставлены задачи, которые необходимо решить при интеграции твердооксидных топливных элементов на биогазе в системы электрооборудования животноводческих предприятий.

Ключевые слова: биогаз, животноводческие предприятия, производственные отходы, твердооксидные топливные элементы, экологическая безопасность, энергетическая безопасность.

Для цитирования: Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Ворошилов А.А. О применении твердооксидных топливных элементов на биогазе для электрооборудования животноводческих предприятий // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 126-134. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_126

ON APPLICATION OF SOLID OXIDE FUEL CELLS ON BIOGAS FOR POWER SUPPLY OF LIVESTOCK ENTERPRISES

E.N. Sosnina

ORCID: **0000-0001-6207-9103** e-mail: sosnina@nntu.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

A.V. Shalukho

ORCID: **0000-0002-8235-0658** e-mail: shaluho@nntu.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

A.A. Voroshilov

e-mail: alejandro.voroshilov@yandex.ru
Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhniy Novgorod, Russia

Abstract. Waste disposal is the most acute problem of modern civilization. In Russia, a significant share of waste comes from agricultural production, including 56% from livestock enterprises. At the same time, the widespread introduction of high-tech equipment at modern agricultural facilities imposes increased requirements on the reliability of their power supply, the quality of electrical energy and its efficient use. The article considers an approach to improving the environmental and energy safety of livestock enterprises through the use of their own energy sources that run on biogas from recycled waste. The characteristics of biomass are given and the results of a comparative analysis of biogas power plants are presented. The advantages of solid oxide fuel cells determine the prospects for their use for the power supply of agricultural facilities. Problems are identified and tasks are set that need to be solved when integrating solid oxide fuel cells on biogas into the power supply systems of livestock enterprises.

Keywords: industrial waste, livestock enterprises, environmental safety, energy security, biogas, solid oxide fuel cells.

For citation: E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and A.A. Voroshilov, "On application of solid oxide fuel cells on biogas for power supply of livestock enterprises", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 126-134, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_126

I. Введение

Для России острейшая проблема связана с превышением темпов накопления отходов над их переработкой и утилизацией. Ежегодный рост накопления отходов оценивается около 4 млрд т, что крайне отрицательно сказывается на экологии и здоровье населения [1].

На рис. 1 представлена классификация отходов по агрегатному состоянию, месту возникновения, составу и возможности повторного применения.



Рис. 1. Классификация отходов

Fig. 1. Waste classification

В суммарном количестве всех отходов существенную долю составляет сельскохозяйственное производство [2]. По данным Министерства сельского хозяйства РФ, в агропромышленном комплексе ежегодно генерируется более 770 млн т отходов. По разным источникам, общее количество сельскохозяйственных отходов достигает 630-650 млн т, к ним относятся органические отходы отраслей растениеводства, животноводства и перерабатывающей промышленности. Наибольшая часть сельскохозяйственных отходов приходится на животноводство (56 %), отходы растениеводства составляют 35,6 % [3].

По степени негативного влияния на окружающую среду отходы разделяются на пять классов: от чрезвычайно опасных (1 класс) до практически безопасных (5 класс) [4]. В отходах животноводческих предприятий преобладают навоз и помет. В соответствии с классификацией эти отходы относятся к III-V классам опасности и требует особого порядка обращения (лицензирования деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и др.) [5].

Повышение эффективности переработки отходов требует создания современных перерабатывающих комплексов и технологий. При этом следует опираться на передовые и перспективные решения в смежных отраслях. Так, для сельскохозяйственной отрасли проблема утилизации отходов должна решаться с учетом других важных проблем, в частности, вопроса обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей электроэнергии.

II. Характеристика потребителей электроэнергии животноводческих предприятий

Среди животноводческих предприятий наиболее крупными потребителями электрической энергии являются:

- 1) птицефабрики (до 1350 кВт);
- 2) комбикормовые заводы (до 1290 кВт);
- 3) фермы по выращиванию и откорму крупного рогатого скота (до 450 кВт);
- 4) птицефермы (до 280 кВт).

К основным потребителям предприятий животноводства относятся: системы вентиляции и отопления, компрессоры, освещение, кормоприготовительные машины (дробилки и кормосмесители), транспортеры, кормораздатчики. По категории бесперебойности электроснабжения электроприемники относятся к I и II категориям. Наибольшее количество электроприемников I категории установлено на предприятиях молочного животноводства, где отключение электропитания грозит серьезным технологическим и экономическим ущербом.

Проблемы низкого качества электроснабжения животноводческих предприятий связаны с рядом факторов: значительная удаленность от электростанций, высокий износ имеющейся электросетевой инфраструктуры, неравномерность нагрузки, экономические потери (хищения и потери на транспорт) и пр. Эффективный подход к повышению качества и надежности электроснабжения заключается в применении собственных (распределенных) источников электроэнергии. Это позволит увеличить уровень энергетической безопасности предприятий (соответственно, уровень продовольственной безопасности).

Применительно к животноводческим предприятиям наиболее эффективным решением представляется использование собственных источников электроэнергии, работающих на топливе из биомассы, преимуществом которых является возможность решения с их помощью проблем утилизации отходов.

III. Характеристика биомассы и анализ энергоустановок, работающих на биогазе

К биомассе относят все виды веществ растительного и животного происхождения, продукты жизнедеятельности организмов, а также органические отходы, образующиеся в процессе производства и потребления продукции [6]. Современный вариант использования биомассы заключается в ее переработке и получении биотоплива на основе эффективных технологий конверсии, позволяющих производить биотопливо в твердой (топливные пеллеты и брикеты), жидкой (биоэтанол, биометанол и биодизель) и газообразной (биогаз) формах. Относительно высокая энергетическая ценность и простота добычи делают биогаз наиболее перспективным топливом для

применения в электрогенерирующих установках [7]. Он представляет собой смесь, состоящую на 50-87 % из метана, 13-50 % из CO_2 , а также включает незначительные примеси H_2 (1-1,5 %) и H_2S (0,2-0,2 %) [8]. Теплота сгорания $1,0 \text{ м}^3$ биогаза составляет 20-25 МДж, что может быть сопоставлено с $0,60 \text{ м}^3$ природного газа, 0,74 л нефти, 0,65 л дизельного топлива или 0,48 л бензина [9]. Сырьем для производства биогаза могут служить навоз, птичий помет, фекальные осадки, отходы забойного цеха, бытовые отходы, отходы молокозаводов и т.д.

Для производства электрической энергии на основе биогаза требуется комплексное применение специальных установок для получения биогаза и энергоустановок, работающих на нем. В зависимости от применяемого сырья выделяют три вида установок для получения биогаза:

- 1) сельскохозяйственные биогазовые установки, использующие зеленую массу, не подвергшуюся первичной переработке, или отходы жизнедеятельности сельскохозяйственных животных;
- 2) конферментационные биогазовые установки, использующие смесь сельскохозяйственного сырья и органических отходов, подвергшихся первичной переработке;
- 3) утилизационные биогазовые установки, использующие различные биологические отходы, ферментация которых не противоречит санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Для производства электрической и тепловой энергии на основе биогаза могут использоваться различные типы энергоустановок: газотурбинные (ГТУ), газопоршневые (ГПУ), парогазовые (ПГУ), топливные элементы (ТЭ). В табл. 1 представлен сравнительный анализ энергоустановок, работающих на биогазе. Энергоустановки на топливных элементах (ЭУ на ТЭ) имеют наибольший показатель по сравниваемым характеристикам и, следовательно, позволяют наиболее эффективно использовать биогаз. К таким топливным элементам относятся твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ).

IV. Энергоустановки на ТОТЭ, работающие на биогазе

ТОТЭ являются топливными элементами с наибольшей рабочей температурой (от 650 до 1000 °С). Они наименее чувствительны к содержанию в биогазе примесей, поскольку биогаз выступает в электрохимической реакции катализатором, а не топливом, которое высвобождает энергию в процессе сгорания.

Таблица 1.
Сравнительный анализ энергетических установок малой генерации

Table 1.
Comparative analysis of power plants of small generation

| Характеристики эффективности | ГТУ | ГПУ | ПГУ | ЭУ на ТЭ |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| Электрический КПД первичного двигателя, % | 25-35 | 40-45 | 38 | 50-55 |
| Коэффициент использования топлива, % | до 90 | 70-92 | 75-80 | до 95 |
| Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии без учета утилизации тепла, г/кВт·ч | 300- 615 | 360- 610 | 297- 370 | 210- 340 |

Применение ТОТЭ позволяет получить высокий электрический КПД (до 60 %) и экологически чистый состав продуктов реакции (водяной пар, азот, углекислый газ). Вследствие низкой деградации материалов срок службы ТОТЭ оценивается более 20 000 ч. Высокая температура также позволяет использовать топливо без специальной предварительной обработки и осуществлять комбинированное производство электрической и тепловой энергии. Техническую и экономическую целесообразность применения ТОТЭ показывает проект *DEMOSOFC* [10]. В рамках проекта для питания установки по очистке сточных вод использованы три модуля ТОТЭ по 58 кВт. Топливом является биогаз, который производится на месте путем анаэробного сбраживания осадка из очищенных сточных вод.

Однако из-за высоких рабочих температур ТОТЭ характеризуется значительным временем для выхода на оптимальный режим работы и низкой маневренностью [11]. Это снижает эффективность применения ТОТЭ при частых запусках и остановках энергоустановок на их основе (например, в периоды недоступности биогаза) и существенно затрудняет применение ТОТЭ в системах электроснабжения.

Энергоустановки с ТОТЭ, работающие на биогазе из производственных отходов, являются перспективным решением автономного источника энергии для питания животноводческих предприятий. Высокая энергетическая эффективность и отсутствие высоких требований к качеству топлива выделяют их по сравнению с другими типами источников энергии. Однако интеграция энергоустановок на ТОТЭ в системы электроснабжения предприятий требует решения целого ряда задач, связанных с разработкой схемотехнических решений их подключения, методов выбора их оптимальных параметров, алгоритмов управления.

В. Выводы

1. Для животноводческих предприятий проблема утилизации отходов должна решаться в сочетании с обеспечением надежного и качественного электроснабжения использованием собственных источников электроэнергии, работающих на топливе из биомассы.

2. Наиболее перспективным топливом, получаемым из биомассы, для применения в локальных источниках является биогаз. На биогазе могут работать многие типы энергоустановок (ГТУ, ГПУ, ПГУ и др.) Однако наибольшими преимуществами (высокой энергетической эффективностью и отсутствием завышенных требований к качеству топлива) обладают ТОТЭ.

3. Значительное время выхода на оптимальный режим работы и низкая маневренность затрудняют интеграцию ТОТЭ в системы электроснабжения животноводческих предприятий.

© Соснина Е.Н., 2022

© Шалухо А.В., 2022

© Ворошилов А.А., 2022

Поступила в редакцию 01.11.2022

Received 01.11.2022

Библиографический список

- [1] Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Основные технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2016. – 220 с.
- [2] Сельское хозяйство в России. 2021. М.: Росстат, 2021. – 100 с.
- [3] Ветошкин А.Г. Техника и технология обращения с отходами жизнедеятельности. Часть 2. Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 381 с.
- [4] Приказ Росприроднадзора № 242 от 22.05.2017. Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов (редакция от 02.11.2018).
- [5] Федеральный закон № 89-ФЗ от 24 июня 1998 г. Об отходах производства и потребления (редакция от 17.07.2022).
- [6] ГОСТ Р 52808-2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. Введ. 2007-12-27. М.: Стандартинформ, 2008. – 15 с.
- [7] Achitayev A.A., Eroshenko S.A., Rusina A.G., Zhidkov A.A., Evseenkov P.N. Land-fill gas generation projects implementation // proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [8] Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика. М.: Колос, 1982. – 148 с.
- [9] Курманов А.К. Совершенствование технологии производства биогаза // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. №3. С. 170-176.

- [10] Gandiglio M., Lanzini A., Santarelli M., Acri M., Hakala T., Rautanen M. Results from an industrial size biogas-fed SOFC plant (the DEMOSOFC project) // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. № 45. P. 5449-5464. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.022
- [11] Sosnina E.N., Shalukho A.V., Veselov L.E. Multi-agent approach to sofc-based generation system control // *proc. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sept. 24-26, 2021, Magnitogorsk, Russia, pp. 603-607. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559521

References

- [1] L.B. Khoroshavin, V.A. Belyakov and E.A. Svalov, *Osnovnye tehnologii pererabotki promyshlennyh i tverdyh kommunal'nyh othodov [Basic technologies for the processing of industrial and municipal solid waste]*. Yekaterinburg: Ural University publishing house, 2016 (in Russian).
- [2] *Sel'skoye khozyaystvo v Rossii. 2021 [Agriculture in Russia. 2021]*. Moscow: Rosstat, 2021 (in Russian).
- [3] A.G. Vetoshkin, *Tehnika i tehnologiya obrashheniya s othodami zhiznedejatel'nosti. Chast' 2 [Technique and technology for waste management. Part 2]*. Vologda: Infra-Engineering, 2019 (in Russian).
- [4] Order of Rosprirodnadzor No. 242 dated May 22, 2017 “Ob utverzhdenii Federal'nogo klassifikatsionnogo kataloga othodov [On the approval of the Federal classification catalog of waste]” (as amended on November 2, 2018).
- [5] Federal Law No. 89-FZ dated June 24, 1998 “Ob othodah proizvodstva i potrebleniya [On production and consumption waste] (as amended on July 17, 2022).
- [6] Non-traditional technologies. Energy of biowaste. Terms and Definitions, GOST R 52808-2007, Dec. 2007.
- [7] A.A. Achitaev, S.A. Eroshenko, A.G. Rusina, A.A. Zhidkov and P.N. Evseenkov, “Land-fill gas generation projects implementation”, in *proc. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*, Nov. 13-15, 2020, Ekaterinburg, Russia, pp. 138-142. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281152
- [8] Baader V., Done E., Brenderfer M. *Biogaz: teoriya i praktika [Biogas: theory and practice]*. Moscow: Kolos, 1982 (in Russian).
- [9] A.K. Kurmanov, “Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva biogaza [Improvement of biogas production technology]”, *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mehanizatsii zhivotnovodstv [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Livestock Mechanization]*, no. 3, pp. 170-176, 2014 (in Russian).
- [10] M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, M. Acri, T. Hakala and M. Rautanen, “Results from an industrial size biogas-fed SOFC plant (the DEMOSOFC project)”, *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 45, pp. 5449-5464, 2019. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.022
- [11] E.N. Sosnina, A.V. Shalukho and L.E. Veselov, “Multi-agent approach to SOFC-based generation system control”, in *proc. 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Sep. 24-26, 2021, Magnitogorsk, Russia, pp. 603-607, DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559521

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Соснина Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Elena N. Sosnina, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Шалухо Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Andrey V. Shalukho, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

Ворошилов Александр Андреевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Alexander A. Voroshilov, postgraduate student of the Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

ХРОНИКА



МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС CIGRE-2022 В ПАРИЖЕ

С 28 августа по 2 сентября 2022 г. в Париже прошла 49-я Сессия международного конгресса CIGRE-2022.

В состав российской делегации от Молодежной секции РНК СИГРЭ вошли шесть молодых ученых – членов Молодежной секции Российского национального комитета (РНК) СИГРЭ с разных концов России.

Среди делегатов РНК СИГРЭ был представитель НГТУ, к.т.н., доцент кафедры «ЭССЭ» **Антон Алексеевич Лоскутов**, представивший основной и постерный доклады на заседании исследовательского комитета D1 на тему: «Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей для распознавания витковых замыканий в силовых трансформаторах».

Делегаты РНК СИГРЭ приняли участие в международном молодежном форуме, семинарах, круглых столах, посетили объекты электроэнергетики, оснащенные передовым оборудованием. Также на технической выставке СИГРЭ была организована работа молодежного стенда.

В рамках мероприятий Молодежной секции *CIGRE 2022* состоялась торжественная церемония награждения молодых ученых, занимающихся перспективными исследованиями в электроэнергетике. В церемонии награждения приняли участие Председатель РНК СИГРЭ **Андрей Евгеньевич Муров** и Председатель Правления АО «СО ЕЭС» **Федор Юрьевич Опадчий**.



Международный Совет по большим электрическим системам (СИГРЭ) образован в 1921 г., наша страна сотрудничает с организацией с 1923 г. Российский национальный комитет (РНК) СИГРЭ входит в десятку крупнейших в мире.

ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ЖИЗНЬ НГТУ 2022

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева вышло в свет учебное пособие «Проектирование районной понизительной подстанции» (авторы: канд. техн. наук Юртаев С.Н., Крюков Е.В., Лоскутов А.А., старший преподаватель А.Н. Фитасов и канд. техн. наук Липужин И.А.).



В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования районных понизительных подстанций в электроэнергетических системах и сетях различного класса напряжений. Рассмотрены вопросы расчета электрических нагрузок, токов короткого замыкания, молниезащиты и заземления подстанции, выбора аппаратов, шин, кабелей, главных понизительных трансформаторов, источников оперативного тока и приборов учета электроэнергии.

Приводятся типовые бланки оперативных переключений, выполняемых на подстанциях, порядок организации работ в действующих электроустановках, а также технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ, выполняемых со снятием напряжения.

Учебно-практическое пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника».

Более подробная информация: iurtaev@nntu.ru

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV**

SMART ELECTRICAL ENGINEERING

№ 4

Nizhny Novgorod 2022

The journal is issued 4 times in year

Editor-in-Chief A.B. Loskutov

EDITORIAL STAFF

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

| | |
|---------------------------------|--|
| Gennadiy Yakovlevich Vagin | Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Leonid Abramovich German | Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Valery Gennadievich Goldstein | Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia) |
| Igor Vasilevich Gulyaev | Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia) |
| Anatoly Viktorovich Kuznetsov | Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia) |
| Pavel Vladimirovich Ilyushin | Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia) |
| Alexander Leonidovich Kulikov | Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Viktor Nikolaevich Mescheryakov | Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia) |
| Georgy Borisovich Onishchenko | Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia) |
| Aleksandr Sergeevich Plekhov | Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Aleksandr Yur'evich Smirnov | Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Vitezslav Styskala | Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic) |
| Vladimir Georgievich Titov | Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Oleg Stanislavovich Khvatov | Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Yuriy Ivanovich Khokhlov | Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIH SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia) |
| Alexandr Ivanovich Chivenkov | Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia) |
| Roustiam Chakirov | Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany) |

Electronic version:
<http://www.ie.nntu.ru>

ISSN 2658-6754

*Periodic printed edition registered by Roskomnadzor
III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2022

CONTENT

| | |
|--|------------|
| ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS | 4 |
| I.V. Alexandrov, O.V. Nos, I.A. Bahovtsev, N.A. Sevostyanov. Control system design of grid-connected converter with limited output impedance in a-b-c reference frame..... | 4 |
| N.V. Chuprina, A.A. Pugachev. Traction permanent magnet synchronous motor direct torque control system with power losses minimization..... | 22 |
| K.E. Kononenko, A.V. Kononenko, Methodology of course design of asynchronous motors with a short-circuited rotor..... | 38 |
| POWER INDUSTRY..... | 43 |
| G.Y. Vagin, A.L. Kulikov, A.A. Sevostyanov. Requirements for quality of power supply to industrial enterprises in connection with transfer of Russian electric power industry to smart grid technology..... | 43 |
| A.B. Loskutov, I.A. Lipuzhin, R.Sh. Bedretdinov. Study of of PEMFC characteristics in steady and dynamic modes | 53 |
| Osokin V.L. Problems of reliability and efficiency assessment in modern power supply systems..... | 78 |
| A.A. Zhidkov, A.Z. Abass, H.Th. Al Rikabi. Efficiency assessment of using generation facilities with landfill gas..... | 95 |
| V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, R.A. Ufa, S.A. Litvinov. Methodology and tools of comprehensive analysis of synchronous motor load nodes stability and equipment operation condition of power supply systems..... | 112 |
| E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, A.A. Voroshilov. On application of solid oxide fuel cells on biogas for power supply of livestock enterprises..... | 126 |
| CHRONICLE..... | 135 |
| International congress CIGRE-2022 in Paris..... | 135 |
| NNSTU 2022 publishing news | 137 |

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 4

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
smart_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 15.12.2022. Дата выхода в свет: 22.12.2022

Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24