

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.05

УДК 621.31

Н.В. Павлов, А.Б. Петроченков, Н.Л. Бачев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ПОПУТНЫЙ НЕФТЯНОЙ ГАЗ

Важной задачей государственной политики в области энергетики при добыче полезных ископаемых является минимизация объемов сжигания попутного нефтяного газа на факелах. Наиболее подходящим способом утилизации попутного нефтяного газа на отраслевых предприятиях считается применение генерирующих установок. К особенностям большинства электротехнических комплексов нефтегазодобывающих предприятий следует отнести распределенную структуру и территориальную отдаленность от централизованных систем электроснабжения. Востребованным видится использование известного в теории систем, математического моделирования и программной инженерии мультиагентного подхода, основанного на децентрализованных методах обработки информации и принятии решений. **Цель:** разработка мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации для обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия. **Результаты:** разработана и верифицирована цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой и средней мощности. **Практическая значимость:** при помощи физической модели были проведены эксперименты для проверки адекватности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети; проверки адекватности моделирования управляющих воздействий цифровой мультиагентной модели на реальном физическом объекте; проверки адекватности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, нефтегазодобывающее предприятие, мультиагентная модель, газотурбинная установка, физическое моделирование электрических режимов.

N.V. Pavlov, A.B. Petrochenkov, N.L. Bachev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ENSURING POWER BALANCE IN THE ELECTRICAL GRID OF AN OIL AND GAS PRODUCING ENTERPRISE WITH MICROGRID USING ASSOCIATED PETROLEUM GAS

An important task of the state policy in the field of energy in the extraction of minerals is to minimize the volume of associated petroleum gas flaring. The most appropriate way to utilize associated petroleum gas at industrial enterprises is the use of generating plants. The features of most electrotechnical complexes of oil and gas producing enterprises include a distributed structure and territorial remoteness from centralized power supply systems. The use of a multi-agent approach known in systems theory, mathematical modeling and software engineering, based on decentralized methods of information processing and decision making, seems to be in demand. The investigation **purpose** is development a multi-agent model of an oil and gas producing enterprise electrotechnical complex with microgrid to ensure power balance in the electrical grid. **Results:** digital multi-agent model of an oil and gas producing enterprise electrotechnical complex with low and medium power generating units was developed and verified. **Practical relevance:** the physical model allows experiments were carried out to verify the adequacy of the developed methodology for ensuring the power balance in the electrical grid; checking the adequacy of modeling the control actions of a digital multi-agent model on a real physical object; verification of the calculation adequacy of electrical power, based on the heat output, when developing a methodology for ensuring the balance of power in the electrical grid.

Keywords: electrotechnical complex, oil and gas producing enterprise, multi-agent model, gas turbine plant, physical modeling of electrical modes.

Введение

Важной задачей государственной политики в области энергетики при добыче полезных ископаемых является минимизация объемов сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на факелах. Согласно «Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» вызовами электроэнергетической отрасли являются повышение уровня автоматизации технологических процессов, повышение надежности электроэнергетических объектов, усложнение систем и алгоритмов управления этими объектами и процессами. Технологии, применение которых может повлечь за собой организационные и технологические изменения в управлении и функционировании электротехнических комплексов (ЭТК) и способствовать переходу энергетики на новый технологический базис, – это сетевые технологии в электроэнергетике, в том числе мультиагентные подход к моделированию ЭТК.

В настоящий момент в электроэнергетической отрасли развиваются концепция малой распределенной генерации (MicroGrid) и самый эффективный с точки зрения энергетики способ утилизации ПНГ – это

внедрение распределенной генерации (РГ) на базе газотурбинных электростанций в ЭТК нефтегазодобывающего предприятия (НГДП). Для обеспечения надежности функционирования должны применяться новые подходы к управлению, одним из таких подходов является мультиагентный подход, позволяющий рассматривать задачу обеспечения надежности функционирования как задачу баланса электроэнергии и топлива в ЭТК НГДП [1–8].

**Агенты мультиагентной модели электротехнического
комплекса нефтегазодобывающего предприятия
с объектами распределенной генерации**

В табл. 1 представлены функции агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ. Функция предполагает обработку в реальном времени наблюдаемых параметров, т.е. работу с потоками данных [9–13].

Таблица 1

Функции агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Множество агентов	Используемые потоки данных	Функция агента
$G = \{\dot{S}_0^G, \dot{S}_1^G, \dot{S}_2^G \dots \dot{S}_n^G\}$, n – количество агентов генерации	G_n – расход топлива n -го агента, м ³ /ч; \dot{S}_n^G – генерируемая мощность n -го агента, кВА \dot{S}_0^G – генерируемая мощность, без переработки топлива (внешняя энергосистема), кВА	$\dot{S}_n^G = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G$, где $f_n(G_n)$ – функция, отражающая процесс преобразования топлива в электроэнергию, кВА
$R = \{\dot{S}_1^R, \dot{S}_2^R \dots \dot{S}_i^R, G^R\}$ i – количество объектов СЭС месторождения; G^R – баланс топлива, параметр объекта технологического процесса, отвечающего за баланс топлива (ДКС)	\dot{S}_i^{ex} – мощность на выходе i -го агента, кВА; \dot{S}_i^{ex} – мощность на входе i -го агента, кВА; \dot{S}_i^R – мощности потребителей собственных нужд и (или) потери мощности в i -м объекте СЭС месторождения, кВА; $\sum G_n$ – суммарный расход топлива, м ³ /ч; $\sum H_m$ – суммарный дебит жидкости, м ³ /ч	$\dot{S}_i^{ex} = \dot{S}_i^{ex} - \dot{S}_i^R$ $G^R = f_R(\sum H_m) - \sum G_n - G_0$, где G_0 – поток газа, не задействованный в генерации электроэнергии, м ³ /ч; $f_R(\sum H_m)$ – функция, отражающая процесс сепарации ПНГ, м ³ /ч

Окончание табл. 1

Множество агентов	Используемые потоки данных	Функция агента
$H = \{\dot{S}_0^H, \dot{S}_1^H, \dot{S}_2^H \dots \dot{S}_m^H\}$ m – количество агентов потребления	H_m – H дебит жидкости m -го агента, м ³ /ч; \dot{S}_m^H – потребляемая мощность m -го агента, кВА; \dot{S}_0^H – мощность, не затрачиваемая непосредственно на добычу нефтегазовой смеси, кВА	$\begin{cases} \dot{S}_m^H = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, \\ G_m = f_R(\Sigma H_m), \end{cases}$ где $f_m(H_m)$ – функция, отражающая процесс электропотребления при добыче нефтегазовой смеси, кВА

Классификация агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ внутри множеств агентов проводится по характеристическому признаку, учитывающему используемые потоки данных.

Агенты генерации делятся на два типа: агент ПС и агенты ГТУ:

$$\sum \dot{S}_{n+1}^G = \dot{S}_0^{G1} + \sum \dot{S}_n^{G2}. \quad (1)$$

Если агент генерации не использует поток данных о расходе топлива $f_n(G_n)=0$, значит, этот агент соответствует агенту ПС (внешней энергосистемы), его функция записывается так:

$$\dot{S}^{G1} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } f_n(G_n) = 0, \quad (2)$$

где \dot{S}_0^G – выдача мощности в сеть из внешней энергосистемы, кВА.

Функция агента генерации, соответствующего ГТУ, записывается как

$$\dot{S}_n^{G2} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } \dot{S}_0^G = 0, \quad (3)$$

где $f_n(G_n)$ соответствует рабочей характеристики ГТУ, индивидуальной для каждого типа ГТУ и типа используемого топлива.

Агенты потребления делятся на 3 типа: агенты добычи, агенты технологического процесса и агенты дополнительной нагрузки:

$$\sum \dot{S}_m^H = \sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3}, \quad (4)$$

где b – количество объектов добычи, t – количество объектов технологического процесса, d – количество объектов дополнительной нагрузки, не входящей в ЭТК НГДП.

Если агент потребления использует поток данных о дебите жидкости $f_m(H_m)$, значит, этот агент соответствует объекту механизированной добычи, его функция записывается как:

$$\begin{cases} \dot{S}_b^{H1} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, \\ G_m = f_R(\sum H_m), \end{cases} \text{ при } f_R(\sum H_m) = 0. \quad (5)$$

В случае, если объект механизированной добычи – УЭЦН, тогда слагаемое $f_m(H_m)$ будет равно активной мощности, подводимой к насосу, необходимой для поддержания заданных технологических параметров.

$$\dot{S}_b^{H1} = P_b^{H1} + \dot{S}_0^{H1} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(\frac{P_{\text{буф}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + H_{\text{ЭЦН}} \right) \cdot Q_{\text{ЭЦН}}}{\eta \cdot K_{\text{нв}} \cdot 86400} + \dot{S}_0^{H1}, \quad (6)$$

где P_b^{H1} – активная мощность потребляемая УЭЦН, кВт; \dot{S}_0^{H1} – полная мощность, не затрачиваемая непосредственно на добычу нефтегазовой смеси, кВА, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность поднимаемой жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, принимается равным 9,81 м²/с; $P_{\text{буф}}$ – буферное давление, Па; $H_{\text{ЭЦН}}$ – динамический уровень жидкости в скважине, м; $Q_{\text{ЭЦН}}$ – заданный дебит насоса, м³/сут; η – КПД насоса в заданной рабочей точке, о.е.; $K_{\text{нв}}$ – коэффициент учета изменения КПД насоса при работе на вязких жидкостях, о.е.

Если агент потребления использует поток данных о расходе топлива G_m , значит, этот агент соответствует объекту технологического процесса, и его функция записывается как:

$$\begin{cases} \dot{S}_t^{H2} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, \\ G_m = f_R(\sum H_m), \end{cases} \text{ при } f_m(H_m) = 0, \quad (7)$$

где \dot{S}_0^H – мощность, подводимая к объекту, спроектированной на работу с определенными объемами нефтегазовой смеси, кВА, $f_R(\sum H_m)$ – функция, отражающая процесс сепарации газа, в упрощенном виде эту зависимость можно выразить так:

$$G_m = J \cdot H_m, \quad (8)$$

где J – газовый фактор, количество растворённого в нефти газа, м³/м³.

Если агент потребления не использует потоки данных о дебите жидкости и расходе топлива $H_m = 0$, $G_m = 0$, значит, этот агент соответствует дополнительной нагрузке:

$$\begin{cases} \dot{S}_b^{H3} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, \\ G_m = f_R(\sum H_m), \end{cases} \text{ при } f_m(H_m) = 0, f_R(\sum H_m) = 0. \quad (9)$$

Агенты множества R делятся на два типа: агенты СЭС месторождения и агенты технологического процесса, отвечающие за баланс топлива. Агенты СЭС месторождения используют потоки данных о входной $\dot{S}_i^{\text{вх}}$ и выходной $\dot{S}_i^{\text{вых}}$ мощности:

$$\dot{S}_i^{\text{вых}} = \dot{S}_i^{\text{вх}} - \dot{S}_i^R. \quad (10)$$

Агенты ДКС используют потоки данных о суммарном дебите жидкости $f_R(\sum H_m)$, суммарном расходе топлива $\sum G_n$ и потоке газа, не задействованного в генерации электроэнергии G_0 :

$$G^R = f_R(\sum H_m) - \sum G_n - G_0. \quad (11)$$

Методика обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия

Разработана методика обеспечения баланса мощности, позволяющая учитывать возможные управляющие воздействия, предусмотренные в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ [14–19].

Уравнение баланса мощности в электрической сети НГДП:

$$\sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H + \sum \dot{S}^R, \quad (12)$$

где $\sum \dot{S}^G$ – суммарная генерируемая мощность, кВА, $\sum \dot{S}^H$ – суммарная мощность потребителей, кВА, $\sum \dot{S}^R$ – мощность, затрачиваемая на функционирование СЭС месторождения (потери, собственные нужды и прочее), кВА.

Оценить баланс мощности можно по величине небаланса мощности:

$$\Delta \dot{S} = \sum \dot{S}^G - \sum \dot{S}^H - \sum \dot{S}^R. \quad (13)$$

Уравнение баланса мощности в рамках мультиагентной модели описывает правила взаимодействия агентов, то есть среду взаимодействия агентов. Общее уравнение среды взаимодействия агентов записывается так:

$$(\dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_n^{G2}) = (\sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R), \quad (14)$$

где \dot{S}^{G1} – мощность, поступающая из внешней энергосистемы, кВА, \dot{S}_n^{G2} – генерируемая мощность n -го агента генерации, кВА, \dot{S}_b^{H1} – мощность, затрачиваемая на добычу нефтегазовой смеси b -м агентом добычи, кВА, \dot{S}_t^{H2} – мощность, затрачиваемая на обеспечение технологического процесса t -м агентом технологического процесса, кВА, \dot{S}_d^{H3} – мощность, потребляемая d -м агентом дополнительной нагрузки, кВА, \dot{S}_i^R – мощность, затрачиваемая на функционирование СЭС i -м агентом СЭС, кВА.

Учитывая уравнение баланса топлива при использовании ПНГ для генерации электроэнергии, уравнение среды взаимодействия агентов можно записать как:

$$\dot{S}^{G1} = \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_b^{G2} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R, \quad (15)$$

где \dot{S}_b^{G2} – мощность, генерируемая за счет использования ПНГ, добываемом b -м агентом добычи, кВА. Учитывая топологию электрической сети НГДП с объектами РГ, к уравнению среды взаимодействия агентов добавляются следующие ограничения на активную мощность:

$$\begin{cases} \sum P_b^{G2} - \sum P_b^{H1} - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0, \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

Ограничения означают, что для обеспечения требуемой категории электроснабжения объектов технологического процесса питание должно быть подведено из внешней энергосистемы, в то время как питание объектов механизированной добычи, собственных нужд СЭС месторождения и дополнительной нагрузки допускается от объектов РГ. Задача обеспечения баланса мощности сводится к задаче поиска минимума функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_b^{G2} - \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_t^{H2} - \sum \dot{S}_d^{H3} - \sum \dot{S}_i^R \rightarrow \min, \\ \text{где } \dot{S} = \sqrt{P^2 + jQ^2}, \\ \sum P_b^{G2} - \sum P_b^{H1} - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0, \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0, \\ P_{\max}^{G1} \geq \sum P^{G1} \geq P_{\min}^{G1}, \\ P_{\max}^{G2} \geq \sum P_n^{G2} \geq P_{\min}^{G2}, \\ P_{\max}^{H1} \geq \sum P_b^{H1} \geq P_{\min}^{H1}, \\ P_{\max}^{H2} \geq \sum P_t^{H2} \geq P_{\min}^{H2}, \\ P_{\max}^{H3} \geq \sum P_d^{H3} \geq P_{\min}^{H3}, \\ P_{\max}^R \geq \sum P_i^R \geq P_{\min}^R, \end{array} \right. \quad (17)$$

где P_{\min}^{G1} , P_{\min}^{G2} , P_{\min}^{H1} , P_{\min}^{H2} , P_{\min}^{H3} , P_{\min}^R – минимально допустимые по условиям нормального электрического режима ЭТК значения активной мощности; P_{\max}^{G1} , P_{\max}^{G2} , P_{\max}^{H1} , P_{\max}^{H2} , P_{\max}^{H3} , P_{\max}^R – максимально допустимые по условиям нормального электрического режима ЭТК значения активной мощности.

Значения мощности агентов составляют множество E_z , определяющее электрический режим на пространстве E всех возможных режимов:

$$E_z = \{ \dot{S}^{G1}, \dot{S}_n^{G2}, \dot{S}_b^{H1}, \dot{S}_t^{H2}, \dot{S}_d^{H3}, \dot{S}_i^R \}, \quad (18)$$

где z – номер электрического режима.

Задача в данной постановке является задачей нелинейного программирования с ограничением в виде неравенства. Для решения таких задач оптимизации используется метод решения, относящийся к группе непрямых методов, – метод штрафных функций.

Если функции $\dot{S}^{G1}, \dot{S}_n^{G2}, \dot{S}_b^{H1}, \dot{S}_t^{H2}, \dot{S}_d^{H3}, \dot{S}_i^R$ – непрерывные на всем пространстве E , тогда функции $A(\dot{S}^{G1}), A(\dot{S}_n^{G2}), A(\dot{S}_b^{H1}), A(\dot{S}_t^{H2}), A(\dot{S}_d^{H3}), A(\dot{S}_i^R)$ – это штрафные функции, при выполнении для каждой условий:

$$A(\dot{S}) = 0 \quad \forall \dot{S} \in E_z, \quad (19)$$

$$A(\dot{S}) \neq 0 \quad \forall \dot{S} \notin E_z. \quad (20)$$

Введем обобщенную функцию ($k = 1, 2, \dots$):

$$F(\dot{S}, k) = \dot{S} + k \cdot A(\dot{S}), \quad (21)$$

где k – коэффициент штрафа, обозначающий сценарий перехода ЭТК из одного электрического режима в другой, а функция $A(\dot{S})$ определяет управляющее воздействие определенного агента. Алгоритм обеспечения баланса мощности с учетом возможных УВ, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ, представлен на рис. 1.

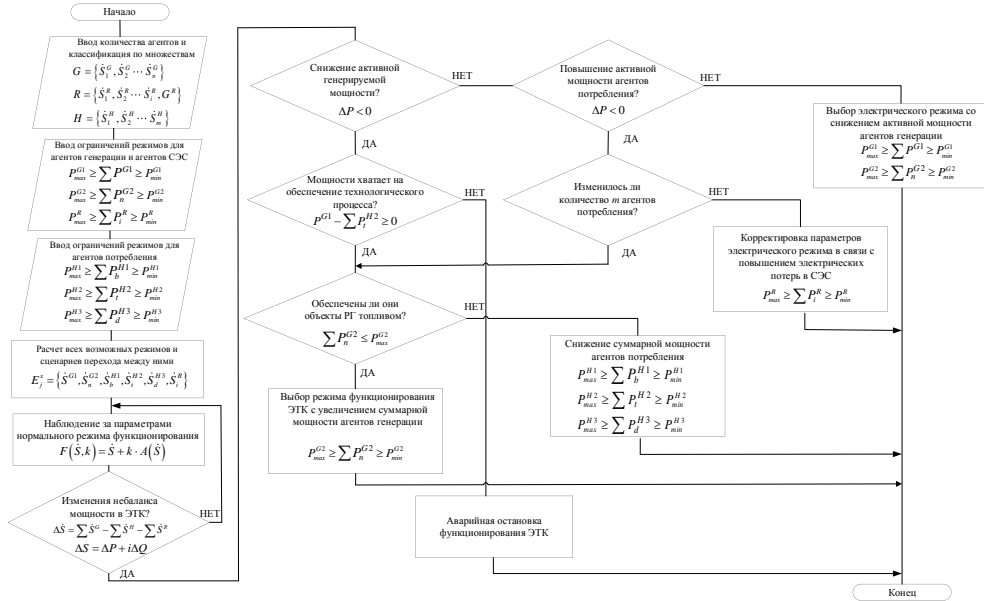


Рис. 1. Алгоритм обеспечения баланса мощности с учетом возможных управляющих воздействий, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Результаты

При помощи физической модели ЭТК НГДП с объектами РГ были проведены следующие эксперименты:

- проверка адекватности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП;
- проверка адекватности моделирования управляющих воздействий цифровой мультиагентной модели на реальном физическом объекте;
- проверка адекватности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП.

На лабораторном стенде выполнена проверка адекватности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП. В качестве оборудования выбрана лабораторная ба-

за кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета. В качестве агентов генерации использовалась система на одном валу «Асинхронный электродвигатель – синхронный генератор», мощностью 1,5 кВт. В качестве агентов потребления использовалась нагрузка: двигательная (машины переменного тока 120 и 220 Вт / 380 В / 1500 об/мин) и активная (блок сопротивлений на 270, 360, 550 и 1100 Ом). В качестве агентов СЭС использовались модуль «Электрические машины» и блок активной нагрузки с клеммами подключения сопротивлений.

Эксперимент проводился для определения мощности агентов потребления в разных режимах работы ЭТК и сценариях перехода между ними. Сначала моделировались установившиеся электрические режимы, а затем сценарии подключения и отключения нагрузки с последующим изменением выдаваемой в сеть мощности агентом генерации. Внешний вид лабораторного стенда и структурная схема мультиагентной модели изображены на рис. 2.

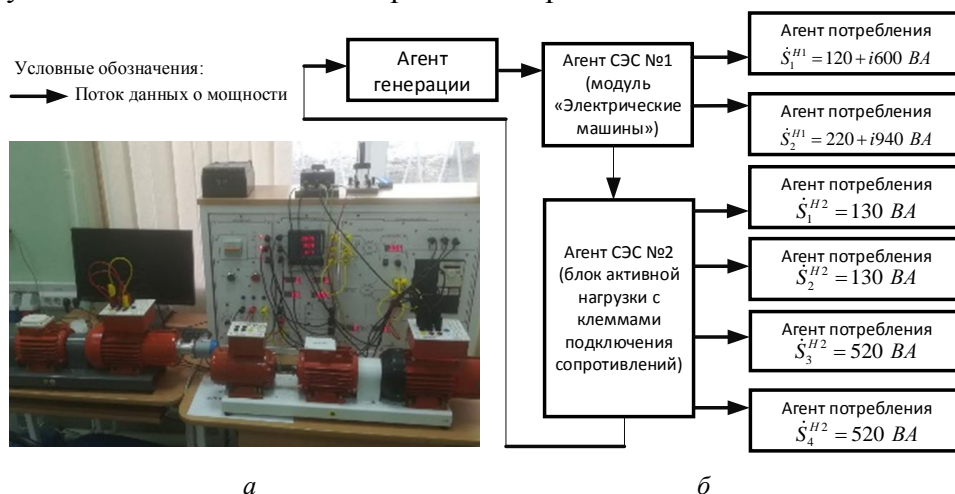


Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда (а); структурная схема мультиагентной модели (б)

Выполнена оценка соответствия разработанных цифровой и физической моделей. Принято допущение, что характер изменения рабочих характеристик (коэффициент загрузки, коэффициент мощности, КПД) реальной двигательной нагрузки и лабораторных двигателей одинаковый. Также принято допущение, что характер изменения рабо-

чих характеристик (ток возбуждения, КПД) реального генератора ГТУ и лабораторного – одинаковый. В таком случае коэффициенты пропорциональности π между ними будут следующие (индекс «Р» соответствует реальному двигателю, индекс «Л» – лабораторному):

$$\pi_z = \frac{K_{зр}}{K_{зл}} = 1; \pi_{\cos\varphi} = \frac{\cos\varphi_p}{\cos\varphi_l} = 1; \pi_\eta = \frac{\eta_p}{\eta_l} = 1; \quad (22)$$

$$\pi_B = \frac{I_{вр}}{I_{вл}} = 1; \pi_p = \frac{P_p}{P_l} = \text{var}.$$

Результаты эксперимента состоят из $N = 8$ измерений. При обработке данных эксперимента принят уровень доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Погрешность измерений измерителя мощности составляет $\theta = \pm 0,3 \%$. Сравнение установившихся электрических режимов, рассчитанных при помощи мультиагентной модели, с режимами сети, полученными на лабораторном стенде, представлено в табл. 2. Номер режима состоит из 2 частей, разделенных точкой: первое число означает номер подключенного агента потребления из множества двигательной нагрузки ($H1$), второе – количество подключенных агентов из множества активной нагрузки по порядку ($H2$).

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования режимов, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных в мультиагентной модели

Режим	Физическая модель, \dot{S}^H , ВА	Мультиагентная модель, \dot{S}^H , ВА	Погрешность, ε_p , %	Погрешность, ε_{jq} , %
1.1	257+j651	251+j627	2,33	3,67
1.2	384+j656	377+j627	1,82	4,42
1.3	911+j659	899+j627	1,32	4,86
2.1	359+j937	351+j954	2,23	1,78
2.2	497+j954	477+j954	4,02	0,01

Погрешность результатов моделирования установившихся электрических режимов не превышает 5 %. Сравнение параметров сценариев перехода, рассчитанных при помощи мультиагентной модели с параметрами возможных сценариев перехода, полученных на лабораторном стенде, представлено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов моделирования возможных сценариев перехода, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных в мультиагентной модели

Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	Физическая модель, \dot{S}^H , ВА	Мультиагентная модель \dot{S}^H , ВА	Погрешность ε_p , %	Погрешность ε_{pQ} , %
1	1.0	1.1	245+j622	232+j609	5,20	2,05
2	1.0	1.2	357+j628	343+j613	4,06	2,31
3	1.1	1.2	375+j636	365+j626	2,45	1,45
4	1.1	1.3	813+j567	768+j537	5,54	5,29
5	1.2	1.3	848+j572	803+j524	5,21	5,24
6	1.2	1.0	163+j629	171+j637	4,95	1,33
7	1.2	1.1	254+j678	262+j686	3,10	1,19
8	2.0	2.1	344+j904	331+j891	3,70	1,41
9	2.0	2.2	457+j903	434+j880	4,87	2,47
10	2.1	2.2	476+j912	459+j895	3,49	1,82
11	2.1	2.0	249+j946	253+j950	1,81	0,48
12	2.2	2.0	256+j948	262+j954	2,29	0,63
13	2.2	2.1	463+j915	470+j922	1,65	0,84

Погрешность результатов моделирования сценариев не превышает 5,54 %. Учетные ограничения: напряжение в сети в диапазоне 361–399 В, параметры агента генерации не должны превышать паспортные значения оборудования: ток возбуждения синхронного генератора – 2 А, ток статора асинхронного двигателя – 8 А. Предложенная методика обеспечения баланса мощности вместе с предложенным подходом к построению мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ позволяет поддерживать баланс мощности в электрической сети даже при недостатке измерений, а также в условиях ограничений по составу и дискретности измерений.

Анализ результатов эксперимента в ручном и автоматическом режимах модулей стенда «Модель электрической системы» при обработке сценария 1 представлен в табл. 4. Сценарий 1 предполагает снижение напряжения в сети со 170 до 160 В в течение 5 с, а затем восстановление напряжения со 160 до 170 В. В качестве относительной погрешности зададимся максимальной погрешностью блока измерительных трансформаторов тока и напряжения БИТ-3. Согласно паспортным данным погрешность измерений приборов составляет не более 2,5 %.

В автоматическом режиме снижение мощности агента потребления прошло более плавно за счет создания аналогового сигнала управления с платы *National Instruments USB-6009*. Отклонение напряжения в сети от допустимого не превысило 3,7 %.

Таблица 4

Анализ результатов эксперимента в ручном и автоматическом режиме модулей стенда «Модель электрической системы» при отработке сценария 1

Режим (сценарий)	Параметр	Время моделирования, с										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расчетный	Напряжение в сети, U , В	170,0	169,0	167,5	165,0	162,5	160,0	162,5	165,0	167,5	169,0	170,0
Ручной	Напряжение в сети, $U_{руч}$, В	170,0	166,6	162,4	147,8	143,7	119,9	157,6	155,2	173,4	180,9	170,0
	Погрешность, %	0,0	1,4	3,0	10,4	11,6	25,1	3,0	5,9	3,4	6,6	0,0
Автоматический	Напряжение в сети, $U_{авт}$, В	170,0	168,8	165,4	162,3	161,8	159,6	156,8	158,9	167,9	172,8	170,0
	Погрешность, %	0,0	0,1	1,3	1,6	0,4	0,3	3,5	3,7	0,2	2,2	0,0

На лабораторной установке кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета выполнена проверка адекватности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при обеспечении баланса мощности в электрической сети НГДП. Внешний вид лабораторной установки с использованием компонентов газотурбинного двигателя 9И56 мощностью 80 кВт производства ПАО «Калужский двигатель» представлен на рис. 3.

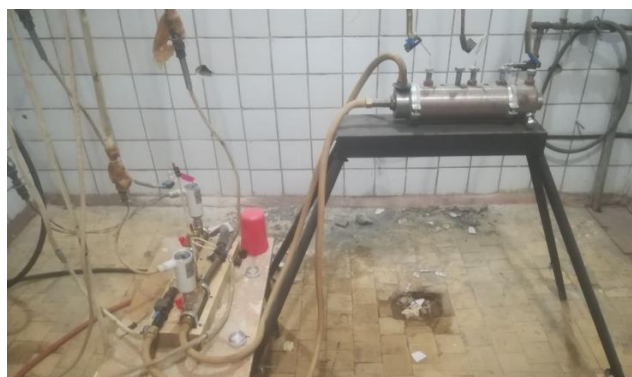


Рис. 3. Внешний вид лабораторной установки ГТД 9И56

В качестве измерительного оборудования использовался газоанализатор *Optima-7*; при диапазоне измерений от +473 до 923 °К относительная погрешность составляет 1 %. Для замера расходов топлива и расхода воздуха использовались ротаметры с относительной погрешностью 0,5 %. Был произведен перерасчет расхода топлива и расхода воздуха для генерации 80 кВт электрической мощности (номинальных параметров ГТУ) [20]. Сравнение результатов расчета температуры и мощности с результатами замеров представлено в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение результатов расчета и результатов экспериментальных замеров параметров ГТУ

Параметр	Результаты расчета	Результаты эксперимента	Погрешность, %
Массовый расход топлива G_T^M , кг/с	0,0003	0,0003	–
Массовый расход воздуха G_B^M , кг/с	0,0055	0,0055	–
Коэффициент избытка воздуха α , о.е.	1,27	1,27	–
Температура на входе в турбину $T_{вхСТ}$, °К	725,80	737,00	1,51
Вырабатываемая мощность P^G , Вт	738,69	730,30	1,73
Объемный расход топлива при номинальной мощности ГТУ (80 кВт) G_T^V , м ³ /ч	112,90	111,62	1,74
Объемный расход воздуха при номинальной мощности ГТУ (80 кВт) G_B^V , м ³ /ч	1698,17	1717,69	1,74

Погрешность расчетов не превышает 1,74 %. Результаты расчета расхода топлива и расхода воздуха при работе объектов генерации в номинальном режиме с использованием различного по составу ПНГ представлены в табл. 6 (НГСП – нефтегазосборный пункт, ГТЭС – газотурбинная электростанция, ПКС – промежуточная компрессорная станция).

Таблица 6

Расходы топлива и воздуха в разных режимах работы ГТУ

Объект (Источник ПНГ)	Теплопроизводительность ПНГ, кДж/кг	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход топлива, м ³ /ч	Удельный расход топлива, м ³ /кВт · ч
НГСП-1035 Ильичевка	40564,433	1701,85	127,58	1,60
ГТЭС Чашкино	43556,194	1701,70	121,97	1,52
ПКС Куеда	29285,120	1717,19	182,38	2,28
ПКС Курбаты	39693,953	1714,41	127,92	1,60
ПКС Кокуй	39359,681	1723,15	110,60	1,38

Разработанная цифровая мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ обеспечивает баланс мощности в электрической сети НГДП, учитывая теплопроизводительность ПНГ различных месторождений в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП при работе генерирующих установок малой и средней мощности [21–24]. Проведен анализ нефтегазовых месторождений Пермского края. Систематизированные данные на основе анализа возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях Пермского края сведены в табл. 7.

С учетом территориальных особенностей, количественного состава и специфики работы насосных установок различного типа (штанговых глубинных, электроцентробежных), состава добываемого ПНГ, наличия близлежащих населенных пунктов выделено 14 предполагаемых кластеров, для которых целесообразно внедрение генерирующих установок малой и средней мощности. Суммарная мощность генерирующих установок составляет 13 МВт, суммарный объем ПНГ, который может быть использован для генерации, составляет 48 млн м³ в год при общем объеме добычи 492 млн м³ в год.

Таблица 7

Систематизированные данные на основе анализа возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях Пермского края

ЦДНГ	Месторождение	Объем ПНГ в год, тыс. м ³	Эквивалент мощности ГТЭС*, кВт	Планируемая нагрузка, кВт	Расстояние от месторождения до нагрузки, км	Питание
1	Павловское	40 000	10 811	150	2,00	Населенный пункт
3	Шагиртско-Гожанское	16 000	4 324	1 400	2,00	Населенный пункт
4	Пихтовое	2 000	541	250	3,00	Населенный пункт
4	Полазненское	1 400	378	800	2,00	Населенный пункт
5	Рассветное	6 000	1 622	60	3,60	Населенный пункт
5	Осинское	5 500	1 486	450	3,00	Населенный пункт
6	Сыповское	2 600	703	1 500	2,00	Населенный пункт

Окончание табл. 7

ЦДНГ	Месторождение	Объем ПНГ в год, тыс. м ³	Эквивалент мощности ГТЭС*, кВт	Планируемая нагрузка, кВт	Расстояние от месторождения до нагрузки, км	Питание
10	Кокуйское	60 000	16 216	2 500	2,75	Населенный пункт
10	Сосновское	2 400	649	650	3,70	Населенный пункт
10	Ильичевское	16 000	4 324	600	3,50	Населенный пункт
11	Сибирское	100 000	27 027	1 000	3,00	СНТ
				530	2,00	ДНС
11	Уньвинское	220 000	59 459	1 300	3,50	Населенный пункт
				200	2,00	Объекты технологического процесса
12	Логовское	6 000	1 622	75	3,00	Профилакторий
				387	0	Нефтегазосборный пункт
12	Чашкинское	14 500	3 919	275	2,00	Населенный пункт
				875	0	ДНС

*Предполагается, что объекты генерации вырабатывают данную мощность круглосуточно в течение года

Заключение

Разработана методика обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия, учитывающая баланс топлива при генерации электроэнергии в различных сценариях перехода между электрическими режимами, разработана и верифицирована цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой и средней мощности. При помощи физической модели ЭТК НГДП с объектами РГ были проведены проверки: адекватности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети; моделирования управляющих воздействий цифровой мультиагентной модели на реальном физическом объекте; расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП.

Вместе с увеличением объемов полезного использования ПНГ также обеспечивается энергетическая автономность удаленных месторожде-

ний и объектов инфраструктуры; уменьшается зависимость нефтегазодобывающего предприятия от тарифной политики на рынке электроэнергии; снижается нагрузка на окружающую среду в целом и улучшается экологическая обстановка непосредственно на промыслах [25].

Библиографический список

1. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 2–7.

2. Павлов Н.В., Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Мультиагентный подход к моделированию систем электроснабжения с распределенной генерацией // *Электротехника*. – 2021. – № 11. – С. 2–8.

3. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent approach to modeling of electrotechnical complexes elements at the oil and gas production enterprises [Электронный ресурс] // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus); Jan. 26–28, 2021, St. Petersburg, Moscow, Russia / IEEE Russia North-West section, IEEE Russia section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI, National Research Univ. of Electronic Technology MIET, Glyndwr Univ. – [S. 1.]: IEEE, 2021. – P. 1504–1508. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9396506> (дата обращения: 25.05.2023). DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506

4. Павлов Н.В., Петроченков А.Б. Разработка мультиагентной системы управления электрическими режимами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2022. – № 42. – С. 151–177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

5. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes / A.V. Romodin, D.Y. Leyzgold, S.V. Mishurinskikh, N.V. Pavlov, A.S. Semenov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1886. – Art. 012003. – 7 p.

6. Experience in developing a physical model of submersible electrical equipment for simulator systems: research and training tasks on the agenda of a key employer / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, S.V. Mishurinskikh, V.V. Seleznev, V.A. Shamaev // *Proceedings of 2018*

XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES). – Saint Petersburg, Russia, 2018. – P. 114–117. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169

7. Modeling of the Interaction of Structural Elements / B.V. Kavalero, A.B. Petrochenkov, K.A. Odin, V.A. Tarasov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84, № 1. – P. 9–13. DOI: 10.3103/S1068371213010033

8. Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. Инноватика. – 2009. – № 5 (87). – С. 166–171.

9. Barik P.K., Shankar G., Sahoo P.K. Investigations on split-source inverter based shunt active power filter integrated microgrid system for improvement of power quality issues // J. Electr. Eng. Technol. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.1007/s42835-022-00999-3>

10. A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater / Guozhou Zhang, Weihao Hu, Di Cao, Zhenyuan Zhang, Qi Huang, Zhe Chen, Frede Blaabjerg // Energy Conversion and Management. – 2022. – Vol. 255. – 115340. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115340>

11. Industrial agents: emerging applications of software agents in industry / ed. by P. Leitão, S. Karnouskos. – Morgan Kaufmann, 2015. – 476 p.

12. Decomposing shared networks for separate cooperation with multi-agent reinforcement learning / Weiwei Liu, Linpeng Peng, Licheng Wen, Jian Yang, Yong Liu // Information Sciences. – 2023. – Vol. 641. – 119085. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119085>

13. Event-triggered consensus control based on maximum correntropy criterion for discrete-time multi-agent systems / Jun Liu, Guobin Yang, Nan Zhou, Kaiyu Qin, Badong Chen, Yonghong Wu, Kup-Sze Choi // Neurocomputing. – 2023. – Vol. 545. – 126323. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126323>

14. Abur A., Exposito A.G. Power system state estimation. Theory and implementation. – Marcel Dekker, 2004.

15. Clustering methods for power quality measurements in virtual power plant / F. Aksan, M. Jasiński, T. Sikorski, D. Kaczorowska, J. Rezmer, V. Suresh, Z. Leonowicz, P. Kostyła, J. Szymańda, P. Janik // *Energies*. – 2021. – 14. – 5902.

16. Investigation of the influence of gas turbine power stations on the quality of electric energy in the associated petroleum gas utilization / A. Petrochenkov, A. Romodin, D. Leyzgold [et al.] // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, № 1. DOI: 10.3390/su14010299

17. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Adaptation of the relay protection parameters against loss of electrical system stability by the method of artificial neural networks // *Proceedings – 2021: 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021; 3, Lipetsk, 10–12 November 2021. – Lipetsk, 2021. – P. 1122–1125. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632136*

18. Resilient networked control of inverter-based microgrids against false data injections / M.R. Khalghani, V. Verma, S. Khushalani Solanki, J.M. Solanki // *Electronics*. – 2022. – 11. – 780 p. – URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11050780>

19. A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multienergy hub with gas, electricity, and freshwater / Guozhou Zhang, Weihao Hu, Di Cao, Zhenyuan Zhang, Qi Huang, Zhe Chen, Frede Blaabjerg // *Energy Conversion and Management*. – 2022. – Vol. 255. – 115340. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115340>

20. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: конструкция, моделирование процессов и расчет. – Казань: Изд-во КГТУ, 2006. – 219 с.

21. Моделирование сжигания попутного нефтяного газа в утилизационной камере сгорания / Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин, А.А. Шилова, Р.В. Бульбович // *Инженерно-физический журнал = Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2021. – Vol. 94, № 4. – P. 1001–1008.

22. Шилова А.А., Бачев Н.Л. Утилизация разнородных нефтяных газов в универсальной малоэмиссионной газотурбинной установке с внешним подогревом топливного газа // *Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332, № 10. – С. 95–104.

23. Шилова А.А., Бачев Н.Л., Бульбович Р.В. Влияние состава и параметров подачи нефтяного газа на его пределы горения // *Аэрокос-*

мическая техника, высокие технологии и инновации – 2019: материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. (Пермь, 14–16 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – С. 216–219.

24. Конвертирование микрогазотурбинных установок для утилизации нефтяного газа / Н.Л. Бачев, О.О. Матюнин, А.А. Шилова, А.М. Клещевников // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2019: материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. (Пермь, 14–16 ноября 2019 г.): в 2 ч.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – С. 27–30.

25. Наилучшие доступные технологии снижения негативного воздействия на окружающую среду загрязняющих веществ нефтедобывающей отрасли / Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева // *Социально-экономические процессы: новое видение, вызовы, тенденции: монография.* – Петрозаводск: Изд-во Международ. центра науч. партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 172–196.

References

1. Vinokur V.M., KavaleroV B.V., Petrochenkov A.B. Programmnyi kompleks dlia matematicheskogo modelirovaniia avtonomnykh mini-elektrostantsii [Software package for mathematical modeling of autonomous mini-power plants]. *Elektrichestvo*, 2007, no. 3, pp. 2-7.

2. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Mul'tiagentnyi podkhod k modelirovaniuu sistem elektrosnabzheniia s raspredelennoi generatsiei [A Multiagent Approach for Modeling Power-Supply Systems with MicroGrid]. *Elektrotekhnik*, 2021, no. 11, pp. 2-8.

3. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent approach to modeling of electrotechnical complexes elements at the oil and gas production enterprises. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus); Jan. 26-28, 2021, St. Petersburg, Moscow, Russia.* IEEE Russia North-West section, IEEE Russia section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI, National Research Univ. of Electronic Technology MIET, Glyndwr Univ. S. 1.: IEEE, 2021, pp. 1504-1508, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9396506> (accessed 25 May 2023). DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506

4. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Razrabotka mul'tiagentnoi sistemy upravleniia elektricheskimi rezhimami elektrotekhnicheskogo kompleksa

neftegazodobyvaiushchego predpriiatia s raspredelennoi generatsiei [Development of multiagent control system for electric modes of the electrotechnical complex at oil and gas producing enterprise with microgrid]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 42, pp. 151-177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

5. Romodin A.V., Leyzgold D.Y., Mishurinskikh S.V., Pavlov N.V., Semenov A.S. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1886, Art. 012003, 7 p.

6. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V., Seleznev V.V., Shamaev V.A. Experience in developing a physical model of submersible electrical equipment for simulator systems: research and training tasks on the agenda of a key employer. *Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region (PTES)*. Saint Petersburg, Russia, 2018, pp. 114-117. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169

7. Kavalero B.V., Petrochenkov A.B., Odin K.A., Tarasov V.A. Modeling of the Interaction of Structural Elements. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 1, pp. 9-13. DOI: 10.3103/S1068371213010033

8. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Khoroshev N.I. Ob odnom formalizovannom metode otsenki upravlencheskikh reshenii (na primere upravleniia elektrotekhnicheskimi ob"ektami) [About one formalized method for evaluating management decisions (for example of managing electrical facilities)]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie. Innovatika*, 2009, no. 5 (87), pp. 166-171.

9. Barik P.K., Shankar G., Sahoo P.K. Investigations on split-source inverter based shunt active power filter integrated microgrid system for improvement of power quality issues. *J. Electr. Eng. Technol.*, 2022, available at: <https://doi.org/10.1007/s42835-022-00999-3>

10. Guozhou Zhang, Weihao Hu, Di Cao, Zhenyuan Zhang, Qi Huang, Zhe Chen, Frede Blaabjerg. A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 255, 115340, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115340>

11. Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Ed. by P. Leitão, S. Karnouskos. Morgan Kaufmann, 2015, 476 p.

12. Weiwei Liu, Linpeng Peng, Licheng Wen, Jian Yang, Yong Liu. Decomposing shared networks for separate cooperation with multi-agent reinforcement learning. *Information Sciences*, 2023, vol. 641, 119085, available at: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119085>

13. Jun Liu, Guobin Yang, Nan Zhou, Kaiyu Qin, Badong Chen, Yonghong Wu, Kup-Sze Choi. Event-triggered consensus control based on maximum correntropy criterion for discrete-time multi-agent systems. *Neurocomputing*, 2023, vol. 545, 126323, available at: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126323>

14. Abur A., Exposito A.G. Power system state estimation. Theory and implementation. Marcel Dekker, 2004.

15. Aksan F., Jasiński M., Sikorski T., Kaczorowska D., Rezmer J., Suresh V., Leonowicz Z., Kostyla P., Szymańda J., Janik P. Clustering Methods for Power Quality Measurements in Virtual Power Plant. *Energies*, 2021, 14, 5902.

16. Petrochenkov A., Romodin A., Leyzgold D. et al. Investigation of the influence of gas turbine power stations on the quality of electric energy in the associated petroleum gas utilization. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 1. DOI: 10.3390/su14010299

17. Blyuk V., Ershov M., Komkov A. Adaptation of the Relay Protection Parameters Against Loss of Electrical System Stability by the Method of Artificial Neural Networks. *Proceedings - 2021: 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021; 3, Lipetsk, 10-12 November 2021*. Lipetsk, 2021, pp. 1122-1125. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632136

18. Khalghani M.R., Verma V., Khushalani Solanki, S., Solanki J.M. Resilient Networked Control of Inverter-Based Microgrids against False Data Injections. *Electronics*, 2022, 11, 780 p., available at: <https://doi.org/10.3390/electronics11050780>

19. Guozhou Zhang, Weihao Hu, Di Cao, Zhenyuan Zhang, Qi Huang, Zhe Chen, Frede Blaabjerg. A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multienergy hub with gas, electricity, and freshwater. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 255, 115340, available at: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115340>

20. Mingazov B.G. Kamery sgoraniia gazoturbinykh dvigatelei: konstruktsiia, modelirovanie protsessov i raschet [Combustion chambers for gas turbine engines: design, process modeling and calculation]. Kazan': KGTU, 2006, 219 p.

21. Bachev N.L., Matiunin O.O., Shilova A.A., Bul'bovich R.V. Modelirovanie szhiganiia poputnogo neftianogo gaza v utilizatsionnoi kamere sgoraniia [Simulation of associated petroleum gas combustion in a combustion chamber]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 4, pp. 1001-1008.

22. Shilova A.A., Bachev N.L. Utilizatsiia raznorodnykh neftianyykh gazov v universal'noi maloemissionnoi gazoturbinoi ustanovke s vneshnim podogrevom toplivnogo gaza [Utilization of heterogeneous petroleum gases in a universal low-emission gas turbine plant with external heating of fuel gas]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 95-104.

23. Shilova A.A., Bachev N.L., Bul'bovich R.V. Vliianie sostava i parametrov podachi neftianogo gaza na ego predely gorenii [Influence of the composition and parameters of the supply of petroleum gas on its combustion limits]. *Aerokosmicheskaiia tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii - 2019. Materialy XX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Perm', 14-16 November 2019)*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2019, pp. 216-219.

24. Бачев Н.Л., Матиюнин О.О., Шилова А.А., Клещевников А.М. Конвертирование микрогазотурбинных установок для утилизации нефтяного газа [Conversion of micro gas turbine units for petroleum gas utilization]. *Aerokosmicheskaiia tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii - 2019. Materialy XX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Perm', 14-16 November 2019)*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2019, pp. 27-30.

25. Andrianova L.P., Pavlova Z.Kh., Khakim'ianov M.I., Khazieva R.T. Nailuchshie dostupnye tekhnologii snizheniia negativnogo vozdeistviia na okruzhaiushchuiu srediu zagriazniaiushchikh veshchestv neftedobyvaiushchei otrasli [Best available technologies for reducing the negative environmental impact of pollutants in the oil industry]. *Sotsial'no-ekonomicheskie protsessy: novoe videnie, vyzovy, tendentsii*. Petrozavodsk: Mezhdunarodnyi tsentr nauchnogo partnerstva "Novaia Nauka" (IP Ivanovskaia I.I.), 2022, pp. 172-196.

Сведения об авторах

Павлов Николай Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – инженер 1-й категории кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pnv@msa.pstu.ru).

Петроченков Антон Борисович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pab@msa.pstu.ru).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

About the authors

Nikolay V. Pavlov (Perm, Russian Federation) – 1st category Engineer of the Microprocessor Units of Automation department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pnv@msa.pstu.ru).

Anton B. Petrochenkov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Microprocessor Units of Automation department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr., 29, e-mail: pab@msa.pstu.ru).

Nikolai L. Bachev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Rocket and Space Technology and Energy Systems department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bnl54@yandex.ru).

Поступила: 09.06.2023. Одобрена: 20.06.2023. Принята к публикации: 01.09.2023.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке по соглашению № 075-11-2021-052 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства автономных энергосберегающих цифровых систем распределенного управления добывающим фондом скважин на основе элементов машинного обучения и искусственного интеллекта» в рамках Постановления №218 Правительства РФ от 09.04.2010 г.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Павлов, Н.В. Обеспечение баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, использующими попутный нефтяной газ / Н.В. Павлов, А.Б. Петроченков, Н.Л. Бачев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 46. – С. 108–132. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.05

Please cite this article in English as:

Pavlov N.V., Petrochenkov A.B., Bachev N.L. Ensuring power balance in the electrical grid of an oil and gas producing enterprise with microgrid using associated petroleum gas. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2023, no. 46, pp. 108-132. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.05