

АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**AGRO-ENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 629.3:621.039.54

EDN ОИHBХJ

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-106-114>

Пути повышения эффективности применения водородных топливных элементов (протонообменной мембранны) на энергетических средствах

**Наталья Федоровна Двойнова¹, Светлана Владимировна Абрамова²,
Евгений Николаевич Бояров³**

^{1, 2, 3} Сахалинский государственный университет

Сахалинская область, Южно-Сахалинск, Россия

¹ dnfsach@yandex.ru, ² abramova_sv@list.ru, ³ e.boyarov@mail.ru

Аннотация. Для повышения экологической безопасности в настоящее время большое внимание уделяется использованию в качестве энергоносителей альтернативных источников энергии, что в значительной мере позволяет снизить токсичность выхлопных газов. Значительная роль отводится внедрению в отрасли сельского хозяйства альтернативных видов энергии, основанных на водородных топливных элементах. Для автомобильного транспорта в последние годы широкое применение получило использование в качестве источника электрической энергии, а также гибридных автомобилей, у которых совмещено использование жидкого топлива и накопителей энергии в виде электрических батарей. При оснащении энергетических систем топливными элементами на основе протонообменной мембранны основным критерием эффективности по-прежнему выступает коэффициент полезного действия, позволяющий достоверно оценить техническое совершенство предлагаемого преобразователя энергии. Полученные аналитические зависимости дают возможность рассчитывать значения коэффициента полезного действия топливного элемента в рабочей зоне идеальной батареи. Экспериментально полученные вольт-амперные зависимости при последовательном и параллельном соединении двух топливных элементов на основе протонообменной мембранны при времени продувки 50 и 100 секунд позволяют определять напряжение при заданном токе, а также выявлять влияние многообразных факторов на работу топливных элементов на основе протонообменной мембранны; дают возможность провести сравнительный анализ топливных элементов и различных способов их соединения, адекватно оценить энергоэффективность топливных элементов. Комбинированное соединение топливных элементов на основе протонообменной мембранны позволяет увеличить выходное напряжение до 38 %. Проведенные исследования дают возможность наметить пути повышения эффективности применения водородных топливных элементов на энергетических средствах на основе применения их комбинированного соединения, своевременного обеспечения поступления соответствующих реагентов.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, мощность, топливный элемент, вольт-амперный метод, топливо, сила тока, напряжение

Для цитирования: Двойнова Н. Ф., Абрамова С. В., Бояров Е. Н. Пути повышения эффективности применения водородных топливных элементов (протонообменной мембранны) на энергетических средствах // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 2. С. 106–114. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-106-114>.

Ways to increase efficiency of using hydrogen fuel cells (proton exchange membrane) in energy facilities

Natalia F. Dvoinova¹, Svetlana V. Abramova²,
Evgeny N. Boyarov³

^{1, 2, 3} Sakhalin State University, Sakhalin region, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

¹ dnfsach@yandex.ru, ² abramova_sv@list.ru, ³ e.boyarov@mail.ru

Abstract. To improve environmental safety, much attention is currently paid to the use of alternative energy sources as energy carriers, which significantly reduces the toxicity of exhaust gases. Considerable attention is paid to the introduction of alternative types of energy based on hydrogen fuel cells into the agricultural sector. In recent years, the use of electric energy as a source has been widely used for automobile transport, as well as the use of hybrid cars, which combine the use of liquid fuel and energy storage devices in the form of electric batteries, as a result, environmental pollution is reduced. When equipping power systems with fuel cells based on proton exchange membrane, the main criterion for efficiency is still the efficiency coefficient, which makes it possible to reliably assess the technical perfection of the proposed energy converter. The obtained analytical relationships make it possible to calculate the efficiency of fuel cell in working zone of an ideal battery. Experimentally obtained volt-ampere dependences at series and parallel connection of two thermopiles at purge time of 50 and 100 seconds make it possible to determine voltage at the specified current, as well as to identify the influence of various factors on the operation of proton exchange membrane fuel cells. It makes it possible to carry out a comparative analysis of fuel cells and various methods of connecting them; adequately assess the energy efficiency of fuel cells, since it is not advisable to calculate values pointwise, it is desirable to predict the result in a wide range of load. The combined fuel cells based on proton exchange membrane connection makes it possible to increase the output voltage to 38%. The studies made it possible to outline ways to increase the efficiency of the use of hydrogen fuel cells, establishing the use of a combined compound of fuel cells on energy resources, and timely ensuring the supply of appropriate reagents.

Keywords: efficiency coefficient, power, fuel cell, volt-ampere method, fuel, current, voltage

For citation: Dvoinova N. F., Abramova S. V., Boyarov E. N. Ways to increase efficiency of using hydrogen fuel cells (proton exchange membrane) in energy facilities. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. 2024;18:2:106–114. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-106-114>.

Введение. Основной проблемой в настоящее время является экологическая безопасность, которая во многом обусловлена выбросом в атмосферу вредных веществ, способствующих снижению озонового слоя. В современных сферах производственных процессов в качестве энергетических средств используются машины, где источником энергии являются полезные ископаемые и продукты, полученные в результате их переработки, такие как дизельное топливо, керосин, бензин и ряд других производных.

С целью уменьшения влияния данных источников энергии большое внимание уделяется применению в качестве энергоносителя газа. Это в значительной мере позволяет снизить токсичность

выхлопных газов. В тоже время необходимо не забывать, что резкий переход на этот вид топлива практически невозможен, особенно для сельскохозяйственных регионов. Это объясняется тем, что основным энергетическим средством при проведении сельскохозяйственных работ являются двигатели внутреннего сгорания, работающие в основном на жидким топливом. В тоже время невозможно обеспечить дозаправку газом энергетических средств (тракторов) в полевых условиях, так как для этого пришлось бы устанавливать газозаправочные станции на полях.

Наряду с этим нужно помнить, что резкий перевод на газ не решает проблему, так как сырьевые источники не безграничны, поэтому необходимо изыскивать

другие способы получения энергии. Для автомобильного транспорта в последние годы находит широкое применение использование в качестве источника электрической энергии, а также применение гибридных автомобилей, у которых совмещено использование жидкого топлива и накопителей энергии в виде электрических батарей.

В настоящее время значительное внимание уделяется внедрению в отрасль сельского хозяйства альтернативных видов энергии, основанных на водородных топливных элементах. Однако рекомендации по повышению энергоэффективности топливных элементов на основе протонообменной мембранны (ТЭПМ) не нашли подтверждения в работах [1–9], поскольку авторы не пришли к единому мнению при оценке их эффективности.

Это объясняется тем, что при проведении экспериментальных исследований по оценке энергоэффективности ТЭПМ необходимо учитывать большое количество процессов, протекающих одновременно в водородных топливных элементах. В то же время построение зависимости выходного сигнала при заданной силовой нагрузке позволяет достоверно прогнозировать энергетическую эффективность ТЭПМ в достаточно большом диапазоне исследования, что существенно повышает возможности их использования в технологических системах.

Материалы и методы исследований. При оснащении энергетических систем ТЭПМ основным критерием эффективности по-прежнему выступает коэффициент полезного действия (КПД), позволяющий достоверно оценить техническое совершенство предлагаемого преобразователя энергии.

Расчетное значение данного показателя определяется отношением работы, полученной в ТЭПМ, к количеству подведенной к нему химической энергии. Подводимое к топливному элементу количество химической энергии на один моль топлива равно изменению энталпии (1):

$$\eta = \frac{A}{-\Delta H} \quad (1)$$

где A – работа тока, Дж; ΔH – изменение энталпии, Дж.

Необходимо при определении реального КПД топливных элементов на основе протонообменной мембранны учитывать потери реагентов вследствие дополнительной химической реакции на электродах, а также негерметичность системы, что приводит к снижению искомого значения.

Поэтому целесообразно определять мгновенную эффективность топливного элемента при условии стремления работы тока и изменения энталпии к бесконечно малым величинам, используя формулу (2) с учетом формулы (3):

$$\begin{aligned} \eta' &= \frac{dA}{d(-\Delta H)} = \frac{\frac{dA}{dt}}{\frac{d(-\Delta H)}{dt}} = \\ &= \frac{P}{\frac{d(-\Delta H)}{dt}} = \frac{Uj}{\frac{j}{2F} \cdot (-\Delta_r H_{f,m})} = \frac{U}{U'} \end{aligned} \quad (2)$$

$$U' = \frac{-\Delta_r H_{f,m}}{2F} \quad (3)$$

где η' – мгновенное значение эффективного КПД;

t – время, с;

P – мощность, Вт;

U – напряжение, В;

j – плотность тока, А/см²;

F – постоянная Фарадея, кл/моль;

$\Delta_r H_{f,m}$ – молярное изменение энталпии топливного элемента, Дж/моль;

U' – термоэлектродвижущая сила топливного элемента, В.

Анализ представленных выражений показывает, что при вычислении мгновенного значения эффективного КПД ТЭПМ для реальных условий эксплуатации, которое соответствует незначительным изменениям парциального давления и температуры, целесообразно не учитывать дополнительные факторы, принимающие малые значения по сравнению с постоянной Фарадея.

Из представленного выражения (3) видно, что при таких условиях эксплуатации топливных элементов молярная энтропия принимает постоянные значения, а, следовательно, термоэлектродвижущая сила топливного элемента также не изменяется со временем.

Анализируя выражение (2), можно прийти к выводу, что для определения

среднего значения эффективного КПД ТЭПМ достаточно знать значения напряжения и плотности тока [10–12].

Аналитические выражения (2), (3) позволяют рассчитать значения КПД топливного элемента в рабочей зоне идеальной батареи, тогда как достоверные результаты исследования без учета большого количества факторов, кроме напряжения камеры на выходе, возможно получить построением вольт-амперной зависимости.

Проанализируем работу топливных элементов на основе протонообменной мембранны за определенный промежуток времени работы тока, принимая, что изменения энталпии не являются бесконечно малыми величинами. При заданной нагрузке средняя эффективность топливного элемента в течение рабочего времени (t) может быть представлена выражением (4):

$$\bar{\eta} = \frac{2FPt}{\int_0^t j \cdot (-\Delta_r H_{f,m}) dt} \quad (4)$$

Среднее значение напряжения топливного элемента под нагрузкой вычисляется по формуле (5):

$$\bar{U} = Pt \frac{1}{\int_0^t j dt} \quad (5)$$

Концентрация молей водорода, потребляемых топливным элементом (n_{H_2}), находится из выражения (6):

$$n_{H_2} = \frac{\int_0^t j dt}{2F} \quad (6)$$

Формулу (4) с учетом выражений (5) и (6) можно представить следующим образом:

$$\bar{\eta} = \frac{A}{n_{H_2} \cdot (-\Delta_r H_{f,m})} = \frac{\bar{U}}{U'} \quad (7)$$

Анализируя формулы (5), (6), можно отметить, что средняя эффективность то-

пливного элемента прямо пропорциональна соотношению среднего напряжения к концентрации поступающего водорода в камеру топливного элемента, учитывая соотношение (3). Из сказанного следует, что значение КПД топливного элемента является показателем эффективного использования топлива.

Однако достоверно рассчитать, как мгновенное, так и среднее значения КПД топливного элемента по формулам (1), (2), (7) представляется сложной задачей, из-за трудностей определения параметров и констант топливных элементов на основе протонообменной мембранны. Поэтому целесообразно строить экспериментальную вольт-амперную зависимость, позволяющую определять напряжение при заданном токе, а также выявлять влияние многообразных факторов на работу топливных элементов на основе протонообменной мембранны.

Результаты исследований и их обсуждение. Вольт-амперная кривая, являясь важной характеристикой, дает возможность провести сравнительный анализ топливных элементов и различных способов их соединения (рис. 1).

Экспериментальные значения напряжения на выходе топливных элементов на основе протонообменной мембранны от заданной нагрузки определялись на лабораторном стенде (рис. 2).

Анализ представленных результатов показал, что наибольшее напряжениерабатывается при подаче топлива, составляющей 56 мл/мин., в режиме заданной продолжительности продувки клапанов 100 с, что объясняется более эффективной продолжительностью очистки системы.

С целью расширения диапазона выходных параметров целесообразно провести экспериментальные исследования при комбинированном способе соединения топливных элементов на основе протонообменной мембранны.

Полученные по заданным значениям нагрузки зависимости напряжения от электрического тока при последовательном и параллельном соединении двух топливных элементов при времени продувки, составляющем 50 и 100 секунд, представлены на рисунке 3. Анализ исследуемых зависимостей показывает, что в заданном

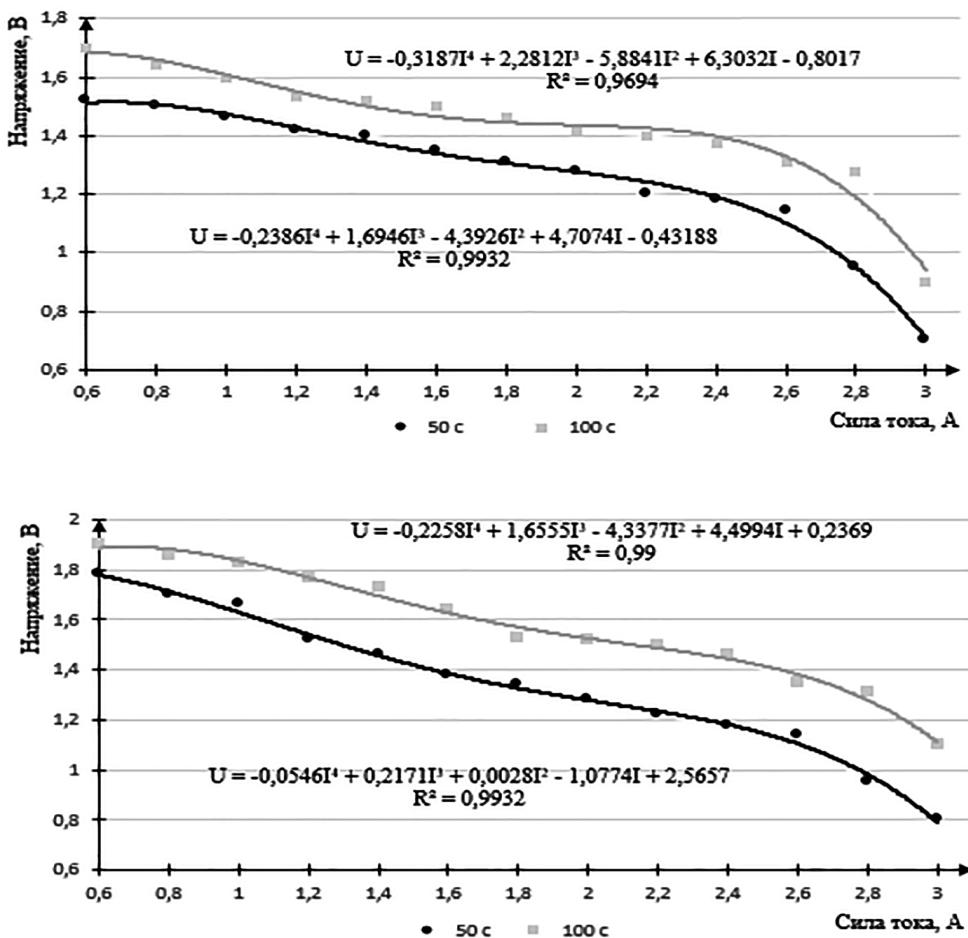


Рисунок 1 – Зависимость напряжения от силы тока при подаче топлива 30 мл/мин (верхний график) и при подаче топлива 56 мл/мин (нижний график) в режимах заданной продолжительности продувки клапанов

Figure 1 – Dependence of voltage on current with a fuel supply of 30 ml/min (top chart) and with a fuel supply of 56 ml/min (lower chart) in modes of a given valve purge duration



Рисунок 2 – Исследование напряжения ТЭПМ от заданной нагрузки
Figure 2 – Study of FCPEM voltage from a given load

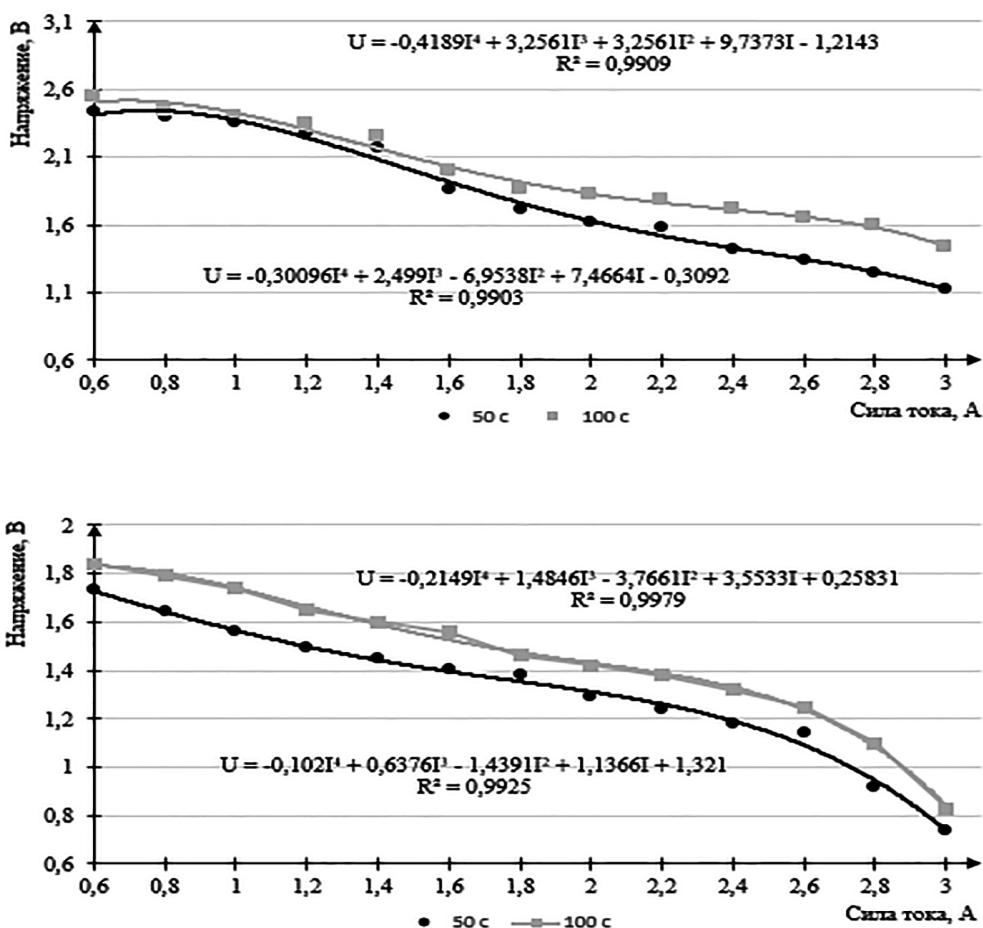


Рисунок 3 – Зависимость напряжения от силы тока при комбинированном соединении: последовательном соединении (верхний график); параллельном соединении (нижний график)

Figure 3 – Dependence of voltage on current with a combined connection: serial connection (top chart); parallel connection (lower chart)

режиме нагрузки при последовательном соединении двух топливных элементов напряжение увеличивается более чем на 24 %. При параллельном соединении двух топливных элементов напряжение изменяется незначительно. Комбинированное соединение ТЭПМ позволяет увеличить выходное напряжение до 38 %.

Представленные результаты исследований позволяют проанализировать влияние силы тока и расхода топлива на энергоэффективность топливных элементов, используя универсальный математический пакет MathCAD (рис. 4).

Заключение. Проведенные исследования позволили наметить пути повышения эффективности применения водородных топливных элементов на энергетических средствах:

1. Использование формул по определению мгновенной и средней эффективно-

сти топливного элемента позволяет адекватно оценить энергоэффективность топливных элементов на основе протонообменной мембранны. При этом желательно прогнозировать результат в широком диапазоне нагрузки, используя вольт-амперный метод исследования.

2. Данный метод применим к различным типам топливных элементов. Он учитывает поляризационные потери, омическое падение напряжения, концентрацию реагентов.

3. Средняя эффективность топливного элемента зависит от характеристик и обеспечения поступления необходимых реагентов.

4. Комбинированное соединение топливных элементов на основе протонообменной мембранны позволяет увеличить выходное напряжение до 38 %.

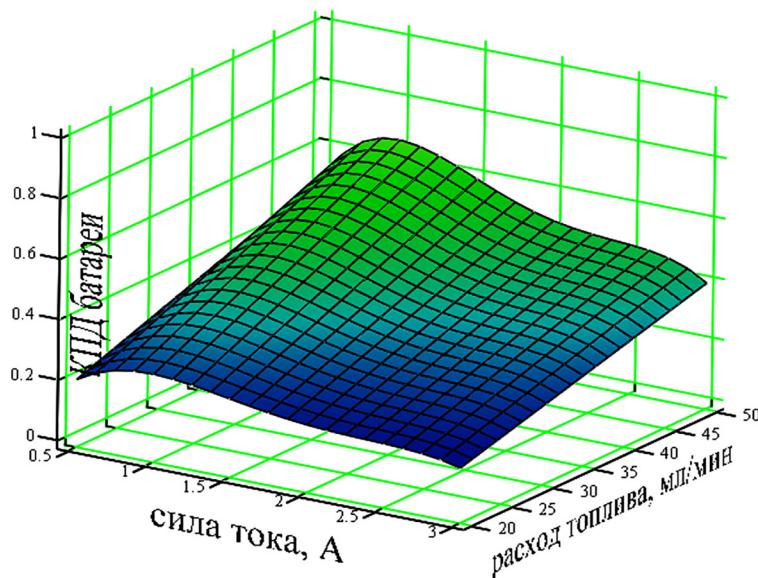


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента полезного действия ТЭПМ от нагрузки и расхода топлива

Figure 4 – Dependence of efficiency coefficient of FCPEM on load and fuel consumption

Список источников

1. Belyaev P. V., Mischenko V. S., Podberezkin D. A., Em R. A. Simulation modeling of proton exchange membrane fuel cells // Dynamics of systems, mechanisms and machines (dynamics). Omsk, 2016. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7818980>.
2. Najafizadegan H., Zarabadipour H. Control of voltage in proton exchange membrane fuel cell using model reference control approach // International Journal of Electrochemical Science. 2012. Vol. 7. Iss. 8. P. 6752–6761. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15744-0](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15744-0).
3. Nowdeh S. A., Ghahnavieh A. R., Shojaei H. Reliable designing of standalone PV/FC hybrid system // Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2012. Vol. 7. No. 2. P. 41–47.
4. Zhang H. F., Pei P. C., Yuan X., Wang X. Z. Regularization of the degradation behavior and working zone of proton exchange membrane fuel cells with a five-constant ideal cell as prototype // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52. Iss. 10. P. 3189–3196. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.022>.
5. Belmokhtar K., Hammoudi M., Doumbia M. L., Agbossou K. Modeling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell // Power engineering, energy and electrical drives (POWERENG) : Fourth International Conference. Istanbul, 2013. P. 415–420. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635643>.
6. Hähnel C., Aul V., Horn J. Power efficient operation of a PEM fuel cell system using cathode pressure and excess ratio by nonlinear model predictive control // European Control Conference (ECC). Linz, 2015. P. 334–3345. <https://doi.org/10.1109/ECC.2015.7331050>.
7. Gonnet A. E., Robles S., Moro L., Performance study of a PEM fuel cell // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. Vol. 37. No. 19. P. 14757–14760. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.076>.
8. Zhang Xiuqin, Guo Juncheng, Chen Jincan. The parametric optimum analysis of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell and its load matching // Energy. 2010. Vol. 35. Iss. 12. P. 5294–5299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.034>.
9. Krivutsa Z. F., Shechitov S. V., Kuznetsov E. E., Abramova S. V., Dvoynova N. F., Kidyaeva N. P. Estimation by volt-ampere method of fuel battery efficiency based on proton-

exchange membrane // INTERAGROMASH 2022 : XV International Scientific Conference. Springer, 2023. P. 90–98. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5_10.

10. Кривуца З. Ф., Двойнова Н. Ф. Оценка вольт-амперным методом эффективности солнечных батарей // Актуальные вопросы энергетики в АПК : материалы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2021. С. 47–52. EDN KUANZB.

11. Кривуца З. Ф., Сергеева В. В., Двойнова Н. Ф. Результаты исследования энергоэффективности топливных элементов на основе протонообменной мембранны // Актуальные вопросы энергетики в АПК : материалы всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. С. 104–110. https://doi.org/10.22450/9785964205777_104.

12. Кривуца З. Ф., Щитов С. В., Двойнова Н. Ф. Определение энергоэффективности топливной батареи на основе протонообменной мембранны // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всерос. науч.-практ. конф. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2023. С. 107–113. EDN UIEVQK.

References

1. Belyaev P. V., Mischenko V. S., Podberezkin D. A., Em R. A. Simulation modeling of proton exchange membrane fuel cells. In.: Dynamics of systems, mechanisms and machines (dynamics), Omsk, 2016, P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7818980>.
2. Najafizadegan H., Zarabadiipour H. Control of voltage in proton exchange membrane fuel cell using model reference control approach. International Journal of Electrochemical Science, 2012;7;8:6752–6761. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)15744-0](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)15744-0).
3. Nowdeh S. A., Ghahnavieh A. R., Shojaei H. Reliable designing of standalone PV/FC hybrid system. Majlesi Journal of Electrical Engineering, 2012;7;2:41–47.
4. Zhang H. F., Pei P. C., Yuan X., Wang X. Z. Regularization of the degradation behavior and working zone of proton exchange membrane fuel cells with a five-constant ideal cell as prototype. Energy Conversion and Management, 2011;52;10:3189–3196. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.022>.
5. Belmokhtar K., Hammoudi M., Doumbia M. L., Agbossou K. Modeling and fuel flow dynamic control of proton exchange membrane fuel cell. Proceedings from Power engineering, energy and electrical drives (POWERENG): Fourth International Conference. (PP. 415–420), Istanbul, 2013. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635643>.
6. Hähnel C., Aul V., Horn J. Power efficient operation of a PEM fuel cell system using cathode pressure and excess ratio by nonlinear model predictive control. Proceedings from European Control Conference (ECC). (PP. 334–3345), Linz, 2015. <https://doi.org/10.1109/ECC.2015.7331050>.
7. Gonnet A. E., Robles S., Moro L., Performance study of a PEM fuel cell. International Journal of Hydrogen Energy, 2012;37;19:14757–14760. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.076>.
8. Zhang Xiuqin, Guo Juncheng, Chen Jincan. The parametric optimum analysis of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell and its load matching. Energy, 2010;35;12:5294–5299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.034>.
9. Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Kuznetsov E. E., Abramova S. V., Dvoynova N. F., Kidyaeva N. P. Estimation by volt-ampere method of fuel battery efficiency based on proton-exchange membrane. Proceedings from INTERAGROMASH 2022: XV International Scientific Conference. (PP. 90–98), Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21432-5_10.
10. Krivutsa Z. F., Dvoynova N. F. Volt-ampere evaluation of solar panel efficiency. Proceedings from Topical issues of energy in the agro-industrial complex: Vserossiiskaya (natsional'naya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya. (PP. 47–52), Blagoveshchensk, Dalnevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2021, EDN KUANZB (in Russ.).

11. Krivutsa Z. F., Sergeeva V. V., Dvoanova N. F. Results of a study of the energy efficiency of fuel cells based on a proton exchange membrane. Proceedings from Topical issues of energy in the agro-industrial complex: *Vserossiiskaya (natsional'naya) nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 104–110), Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2022 https://doi.org/10.22450/9785964205777_104 (in Russ.).
12. Krivutsa Z. F., Shchitov S. V., Dvoanova N. F. Determination of the energy efficiency of a fuel battery based on a proton exchange membrane. Proceedings from Agro-industrial complex: problems and prospects of development: *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 107–113), Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2023 EDN UIEVQK (in Russ.).

© Двойнова Н. Ф., Абрамова С. В., Бояров Е. Н., 2024

Статья поступила в редакцию 26.04.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 24.05.2024.

The article was submitted 26.04.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 24.05.2024.

Информация об авторах

Двойнова Наталья Федоровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Сахалинский государственный университет, dnfsach@yandex.ru;

Абрамова Светлана Владимировна, доктор педагогических наук, доцент, Сахалинский государственный университет, abramova_sv@list.ru;

Бояров Евгений Николаевич, доктор педагогических наук, доцент, Сахалинский государственный университет, e.boyarov@mail.ru

Information about the authors

Natalia F. Dvoanova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Sakhalin State University, dnfsach@yandex.ru;

Svetlana V. Abramova, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Sakhalin State University, abramova_sv@list.ru;

Evgeny N. Boyarov, Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Sakhalin State University, e.boyarov@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.