

Научная статья
УДК 621.352.6:656.136
DOI: 10.36652/1684-1298-2024-4-3-8

Методика определения значений параметров водородной энергетической установки с топливным элементом по данным телеметрии транспортного средства

Дмитрий Леонидович Карелин^{1✉}, д-р техн. наук, Алексей Владимирович Болдырев², канд. техн. наук, Сергей Владимирович Болдырев³, канд. техн. наук, Ирек Флорович Гумеров⁴, канд. техн. наук, Ленар Ильдарович Фардеев⁵

^{1, 2, 3}Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжский) федерального университета, Набережные Челны, Россия, karelindl@mail.ru^{1✉}

^{4, 5} ПАО "КАМАЗ", Набережные Челны, Россия

Аннотация. В статье представлена методика определения значений эксплуатационных параметров энергетической системы с топливным элементом (ЭСТЭ) и перезаряжаемой аккумуляторной батареей в реальных режимах эксплуатации гибридного электромобиля с учетом требований по автономности (запасу) хода и режима рекуперации энергии. В процессе численного исследования данных телеметрии магистрального грузовика КАМАЗ-54901 было определено, что полезная мощность ЭСТЭ соответствует 138,3 кВт, а требуемая энергоёмкость перезаряжаемой энергоаккумулирующей системы составляет 38,28 кВт·ч при средней скорости движения 80,8 км/ч.

Ключевые слова: водородный топливный элемент; запас водородного топлива; система хранения компримированного водорода; заряд аккумуляторной батареи; гибридная энергетическая установка

Для цитирования: Карелин Д. Л., Болдырев А. В., Болдырев С. В., Гумеров И. Ф., Фардеев Л. И. Методика определения значений параметров водородной энергетической установки с топливным элементом по данным телеметрии транспортного средства // Грузовик. 2024. № 4. С. 3–8. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-4-3-8.

Original article

Method for determining the parameter values of a hydrogen power plant with a fuel cell element based on vehicle telemetry data

Dmitriy L. Karelin[✉], Alexey V. Boldyrev, Sergey V. Boldyrev, Irek F. Gumerov, Lenar I. Fardeev

^{1, 2, 3}Naberezhnye Chelny Institute (branch) Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia karelindl@mail.ru[✉]

^{4, 5} KAMAZ PJSC, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. The article presents a method for determining the values of operational parameters of a power system with a fuel cell (PSFC) and a rechargeable battery, taking into account the actual operating modes of a hybrid electric vehicle, taking into account the requirements for autonomy (reserve) and energy recovery mode. In the process of numerical research of the telemetry data of the main truck KAMAZ-54901, it was determined that the usable capacity of the PSFC corresponds to 138.3 kW, and the required energy intensity of the rechargeable energy storage system is 38.28 kWh at an average speed of 80.8 km/h.

Keywords: hydrogen fuel cell; hydrogen fuel reserve; compressed hydrogen storage system; battery charge; hybrid power plant

Введение

По данным из открытых источников, автомобильный транспорт потребляет суммарно больше половины всех углеводородных топлив. С ростом числа транспортных средств (ТС), несмотря на повышение топливной эффективности и экономичности их двигателей, тенденция роста энергопотребления

сохраняется. Это обстоятельство негативно влияет на экологическую безопасность, проблема особенно актуальна для мегаполисов. В связи с этим перед разработчиками новых автомобилей одновременно ставятся две основные задачи: повышение топливной экономичности (энергоэффективности), снижение выбросов углекислого газа и других вредных выбросов веществ отработавших газов автомобилей [1].

Одним из направлений решения этих задач является применение комбинированных (гибридных) энергоустановок, а также электромобилей, для которых расходы энергии при движении в 4 раза меньше, чем у традиционного легкового автомобиля [2, 3].

Среди перспективных топлив для комбинированных (гибридных) энергоустановок выделяется водород, который обеспечивает эффективное хранение энергии, повышает качество ее использования, а также является важным источником возобновляемой, экологически безопасной, энергии. Главным элементом энергетической установки таких гибридных транспортных средств является топливный элемент с протонообменной мембраной, служащий для преобразования химической энергии, содержащейся в водороде, в электрическую энергию посредством электрохимической реакции [4].

Гибридные электромобили на топливных элементах помимо лучших экологических показателей обладают рядом других преимуществ, таких как малое время зарядки и большое расстояние автономного хода на одной заправке, поэтому считаются одними из наиболее перспективных типов транспортных средств [5]. Однако ввиду конструктивных особенностей, топливный элемент обладает меньшей плотностью мощности и меньшей начальной мощностью в момент пуска, а также более низким откликом на меняющуюся потребляемую нагрузку, поэтому он не в состоянии обеспечить постоянную подачу энергии, удовлетворяющей потреблению транспортного средства [6]. Тем не менее недостатки энергетической системы с топливным элементом можно устранить, добавив вторичный источник энергии, такой как аккумуляторные батареи [7]. Энергоустановки с аккумуляторами, как правило, характеризуются более высокой удельной энергоотдачей и могут обеспечивать дополнительное питание и рекуперацию в течение длительного времени [8].

В процессе эксплуатации гибридного электромобиля топливный элемент подвергается воздействию четырех режимов работы: первый — это циклы запуск/остановка, второй — холостой ход или работа с постоянным напряжением, третий — циклическая нагрузка и четвертый — работа с высокой токоотдачей [9]. Вклад каждого режима в деградацию топливных элементов составляет 33, 4,7, 56,5 и 5,8 % соответственно [10].

По сравнению с тепловыми двигателями обычных транспортных средств, характеристики энергетической системы с топливными элементами и аккумуляторной батареей сильно зависят от нагрузочных режимов во время эксплуатации гибридного транспортного средства, а неправильный или неэффективный режим работы такой установки не только сокращает срок ее службы [11], но и увеличивает эксплуатационные расходы автомобиля из-за расхода водорода [12].

Аналогично рынку развития электромобилей развитие гибридных автомобилей с водородной энергетической установкой зависит от ряда факторов, требующих значительных финансовых вложений. Первый из них — стоимость аккумуляторных батарей (АКБ), которая пропорционально зависит от их емкости. Второй очень важный фактор, определяющий развитие данного направления, это наличие развитой зарядной инфраструктуры [1]. Поэтому необходима методика определения значений эксплуатационных параметров энергетической системы с топливным элементом (ЭСТЭ), перезаряжаемой аккумулирующей системы (ПЭАС), системы хранения сжатого водорода с учетом реальных режимов эксплуатации транспортного средства и требований автономного хода без заправки и режима рекуперации энергии.

Методы

Методика определения мощности модуля топливных элементов электрохимического генератора (ЭХГ), емкости перезаряжаемой энергоаккумулирующей системы, включая количество циклов "заряд/разряд" и параметров энергетической системы с топливным элементом, по данным телеметрии основана на методе численного анализа энергетических и мощностных характеристик виртуального ТС, движущегося в имитационном режиме по конкретным маршрутам (ездовым циклам), и представляет собой последовательность следующих этапов.

1. Подготовка исходных данных: расчет функции $f = N(t)$ изменения мгновенной мощности ТС от времени, согласно формуле (1), а также исключение данных телеметрии, соответствующих простою ТС с включенным/выключенным электронным блоком, дублируемых значений в расчетную единицу времени (1 с), ошибок определения координат ТС,

$$N(t) = \frac{G\vartheta(t)(\psi_v \cos \alpha(t) + \sin \alpha(t)) + k_b F_{TC} \vartheta^3(t) + \delta_a m_{TC} a_{TC}(t) \vartheta(t)}{1000 \eta_T}, \quad (1)$$

где G — вес транспортного средства, Н; $\vartheta(t)$ — функция изменения скорости ТС, м/с; ψ_v — суммарный коэффициент сопротивления дороги при движении ТС; k_b — коэффициент аэродинамического сопротивления; F_{TC} — площадь лобовой поверхности ТС, м²; δ_a — коэффициент учета вращающихся масс ТС; m_{TC} — масса транспортного средства, кг; $a_{TC}(t)$ — функция изменения ускорения ТС, м/с²; η_T — коэффициент эффективности работы трансмиссии ТС, учитывающий КПД тягового электродвигателя, трансмиссии, а также DC/DC- и DC/AC-преобразователей, в зависимости от схемного решения, на режимах рекуперации/расхода энергии ПЭАС при торможении/движении ТС.

2. Определение значения средней затраченной мощности путем приведения энергии, затраченной ТС на прохождение всего маршрута, к времени прохождения этого маршрута с использованием следующей интегральной функции:

$$N_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_T N(t) dt, \quad (2)$$

где T — время пройденного пути ТС, с.

3. Максимальная мощность энергетической установки ТС (в зависимости от режима движения ТС, примерно соответствующей 50 % ее эффективности) для предварительных инженерных расчетов определяется по следующему выражению:

$$N_{\text{max}} = \frac{1}{T} \int_T N(t) dt \text{ при } N(t) > N_{\text{ср}}. \quad (3)$$

4. Для вычисления запасаемой/расходуемой рекуперативной энергии по запасаемому/расходуемому заряду АКБ требуется интегрирование мгновенной мощности, потребляемой ТС от ЭСТЭ и ПЭАС за все время движения по маршруту. Для этого определяется значение баланса мгновенной мощности ТС, как разность мгновенного потребляемой мощности ТС относительно его средней затраченной мощности:

$$\Delta N = N_{\text{ср}} - N(t). \quad (4)$$

5. Путем численного интегрирования полученной функции определяются значения запасаемой/расходуемой энергии (рис. 1) аккумуляторной батареи по вре-

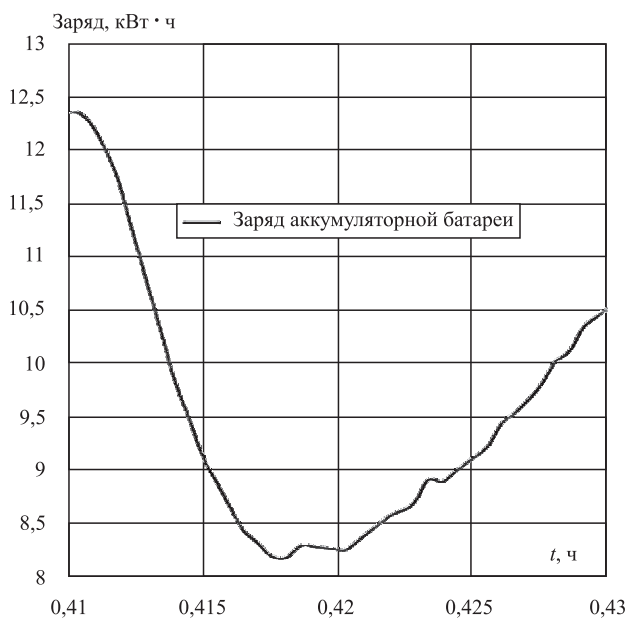


Рис. 1. Зависимость запасаемой/расходуемой (до 0,417 с — разряд, после 0,417 — заряд) энергии ПЭАС от времени движения ТС

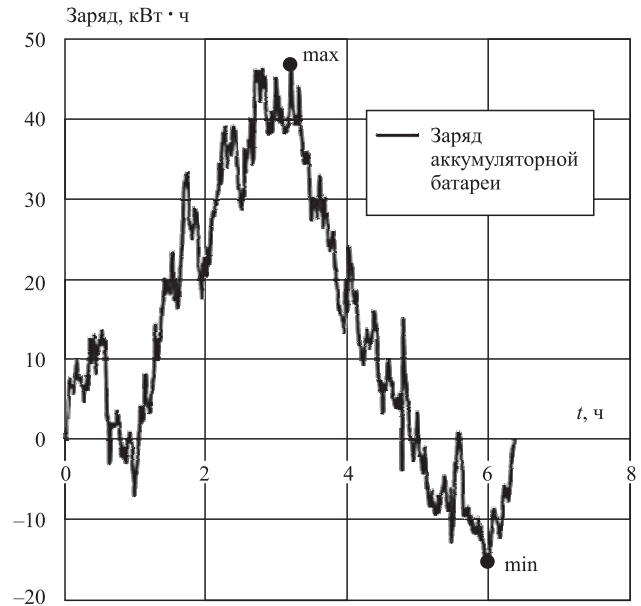


Рис. 2. График динамики запасаемой/расходуемой энергии ПЭАС от времени движения ТС

мени движения ТС с учетом рекуперации энергии на спусках и уменьшения скорости его движения на маршруте:

$$E = \int_T \Delta N(t) dt. \quad (5)$$

6. Маневровая энергоемкость аккумуляторной батареи ПЭАС вычисляется как разность максимального E_{max} и минимального E_{min} экстремальных значений энергий (рис. 2) состояния ее заряда соответственно по выражению (6), а также полную энергоемкость самой аккумуляторной батареи по выражению (7),

$$E_M = E_{\text{max}} - E_{\text{min}}, \quad (6)$$

$$E_{\text{ПЭАС}} = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}})n, \quad (7)$$

где n — коэффициент запаса энергоемкости аккумуляторной батареи ПЭАС, численно принимаемый с учетом необходимого остаточного заряда и процессов деградации за период эксплуатации ТС, %.

7. Количество циклов полного расходования энергоемкости АКБ рассчитывается как отношение суммы суммарных циклов заряда $E_{\text{заряд}}$ и разряда $E_{\text{разряд}}$, произведенных АКБ за весь расчетный маршрут движения ТС:

$$i_{\text{ПЭАС}} = \frac{\sum E_{\text{заряд}} + \sum E_{\text{разряд}}}{2E_{\text{ПЭАС}}}. \quad (8)$$

8. Объем запаса водородного топлива для прохождения ТС расчетного интервала маршрута ис-

ходя из 100 % преобразования его в энергию, по следующей формуле:

$$V_M^{H_2} = \frac{\sum_{t=0}^{t_M} N(t) \Delta t}{E_{H_2}^1} \frac{P_0 \vartheta_0}{P_{70}} \frac{1}{\eta_{ЭХГ}}, \quad (9)$$

где t_M — время прохождения ТС всего маршрута, с; Δt — элементарный промежуток времени интегрирования, с; $E_{H_2}^1$ — энергия одного килограмма водорода, кДж/кг; P_0 — давление водорода при нормальных условиях, МПа; ϑ_0 — удельный объем водорода при нормальных условиях, м³/кг; P_{70} — давление заправки водорода, МПа; $\eta_{ЭХГ}$ — значение полного КПД электрохимического генератора.

Для определения реального объема водородного топлива полученное значение $V_M^{H_2}$ по формуле (9) необходимо соотнести к значению среднего КПД ЭХГ (в зависимости от выбранного режима эксплуатации).

9. Объем водорода, обеспечивающий автономность (запаса хода) ТС при прохождении расчетного маршрута (из расчета расстояния между заправочными станциями), определяется следующим соотношением:

$$V_{СХВ}^{H_2} = V_M^{H_2} \left(\frac{S_M}{S_{3X}} \right), \quad (10)$$

где S_M — расстояние между начальной и конечной точками всего маршрута движения ТС, м; S_{3X} — расстояние между заправочными станциями, м.

10. Количество циклов полного заряда-разряда аккумуляторной батареи рассчитывается по следующей формуле, 1/ч:

$$n_{ч} = \frac{3600 i_{ПАЭС}}{t_M}, \quad (11)$$

где $i_{ПАЭС}$ — количество циклов полного расходования энергоемкости АКБ на маршруте движения ТС.

11. Время, в течение которого ТС сможет проехать с данной АКБ по заданному маршруту, ч:

$$T_{РЕС} = \frac{n_t}{n_{ч}}. \quad (12)$$

n_t — количество циклов полного заряда-разряда АКБ.

Результаты и обсуждение

По данным телеметрии, например для выбранной части маршрута "Москва—Набережные Челны" движения магистрального грузовика КАМАЗ-54901 продолжительностью около пяти часов, после обработки данных по формулам (1) и (2) (результат на рис. 3) средняя потребляемая мощность составила 138,3 кВт при средней скорости движения магистрального тягача 80,8 км/ч (рис. 4), а суммарно затраченная энергия на преодоление данного расчетного участка маршрута, рассчитанная по формуле (5), составила 2 457 411,5 кДж.

Если принять мощность батареи топливного элемента равной средней потребляемой магистральным грузовиком мощности 138,3 кВт (см. рис. 3), то энергоемкость перезаряжаемой энергоаккумулирующей системы с учетом рекуперации энергии, вычисленная по формуле (7), составит 38,28 кВт·ч (рис. 5).

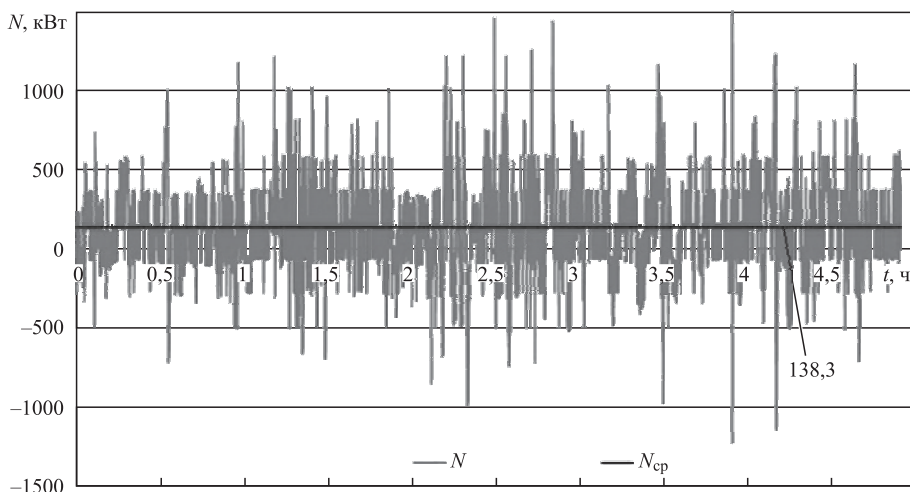


Рис. 3. График распределения мгновенной потребляемой и средней мощности для магистрального грузовика КАМАЗ-54901

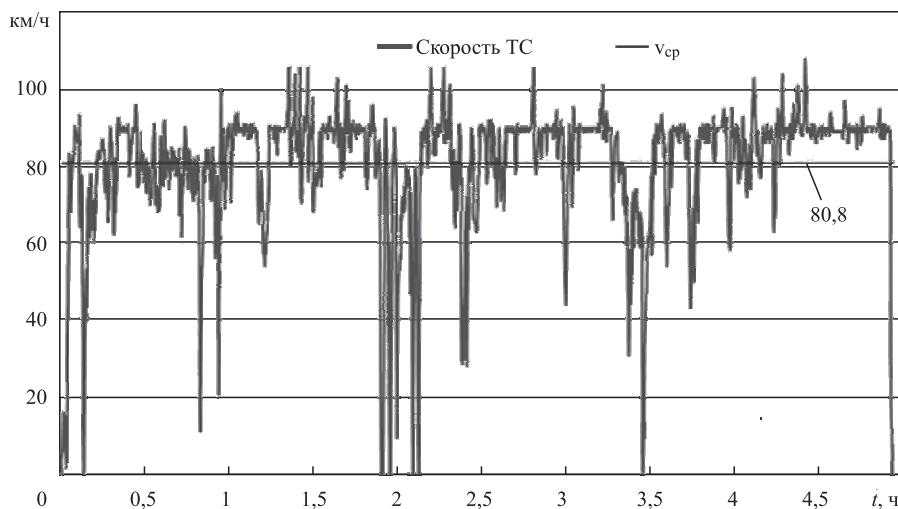


Рис. 4. График распределения мгновенной и средней скорости магистрального грузовика КАМАЗ — 54901

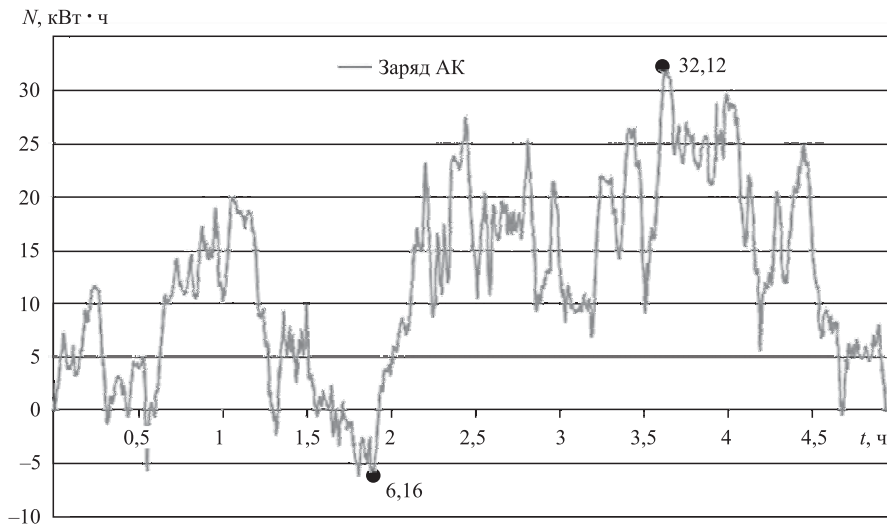


Рис. 5. График динамики запасаемой/расходуемой энергии ПЭАС магистрального грузовика КАМАЗ-54901



Рис. 6. График распределения высот по маршруту движения магистрального грузовика КАМАЗ-54901

При такой энергоёмкости аккумуляторная батарея на конец маршрута движения магистрального грузовика сохраняет значение первоначального заряда на начало маршрута движения.

Из анализа данных (рис. 5) изменения величины заряда аккумуляторной батареи можно судить о характере динамики значений запасаемой/расходуемой энергии при данном скоростном режиме движения магистрального грузовика. С учетом относительной равномерности распределения мгновенной скорости за рассматриваемый промежуток времени движения ТС (за исключением участков около двух и трех с половиной часов) оказывает влияние изменение высоты пролегания маршрута (рис. 6), особенно продолжительные по времени спуски и подъемы. В указанных же временных промежутках скорость магистрального тягача снижалась почти до околонулевых значений, что сокращало затраты мощно-

сти на преодоление сопротивления движению ТС, поэтому вся энергия, производимая в данный момент времени БТЭ, направлялась в большей степени на заряд аккумуляторной батареи ПЭАС. Отсюда появляются резкие скачки уровня запасаемой энергии на графике.

Заключение

Таким образом, была представлена методика определения значений эксплуатационных параметров основных систем для транспортных средств с гибридной энергетической установкой на водородных топливных элементах и перезаряжаемой аккумуляторной батареей с учетом реальных режимов эксплуатации транспортного средства и требований по автономности (запасу) хода без заправки и режима рекуперации энергии. Использование данной методики позволяет решать инженерные задачи по проектированию подобных энергоустановок с водородным ТЭ. Оценивать динамику мощности, затрачиваемой транспортным средством при движении с учетом рекуперации энергии торможения, а также работу источника и аккумулятора энергии, что необходимо для определения технических характеристик этих систем и разработки алгоритмов эффективного (прогнозируемого) управления

ЭСТЭ — адаптивного под конкретные маршруты следования ТС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ломакин В. В., Шабанов А. А., Шабанов А. В. К определению расхода топлива и потребления энергии гибридных подзаряжаемых автомобилей // Актуальные вопросы машиноведения. 2016. Т. 5. С. 12—14.
2. Загарин Д. А., Шабанов А. В., Ломакин В. В., Красавин П. А., Шабанов А. А. Некоторые аспекты и тенденции развития автомобилей с электроприводом // Автомобильная промышленность. 2014. № 7. С. 6—8.
3. Плюс электропривода / Д. А. Загарин [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение. 2013. № 9—10. С. 75—79.

4. **Hames Y., Kaya K., Baltacioglu E., Turksoy A.** Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, iss. 23. P. 10810–10821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.150>
5. **Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. M.** Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. 3rd Edition. CRC press. 2018. 572 p. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>.
6. **Nasri S., Sami B. S., Cherif A.** Power management strategy for hybrid autonomous power system using hydrogen storage. International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, iss. 2. P. 857–865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.085>.
7. **Wang Y., Moura S., Advani S., Prasad A.** Power management system for a fuel cell/battery hybrid vehicle incorporating fuel cell and battery degradation // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. Vol. 44, iss. 16. P. 8479–8492. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.003>.
8. **Huang M., Li J.-Q.** The shortest path problems in battery-electric vehicle dispatching with battery renewal // Sustainability. 2016. Vol. 8, iss. 7. Article number 607. <https://doi.org/10.3390/su8070607>.
9. **Chen K., Laghrouche S., Djerdir A.** Degradation model of proton exchange membrane fuel cell based on a novel hybrid method // Applied Energy. 2019. Vol. 252. Article number 113439. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113439>.
10. **Zhang T., Wang P., Chen H., Pei P.** A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition // Applied Energy. 2018. Vol. 223. P. 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.049>.
11. **Li Q., Yin L., Yang H., Wang T., Qiu Y., Chen W.** Multiobjective optimization and data-driven constraint adaptive predictive control for efficient and stable operation of PEMFC system // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 68, iss. 12. P. 12418–12429. <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3040662>
12. **Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djerdir A.** Online adaptive equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering power sources degradation // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 192. P. 133–149. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.090>.

*Статья поступила в редакцию 16.01.2024;
одобрена после рецензирования 23.01.2024;
принята к публикации 29.01.2024.*

ИЗДАТЕЛЬСТВО

"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

принимает подписку на журнал

"ГРУЗОВИК"

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС. СПЕЦТЕХНИКА

на 2024 год

Подписавшись в издательстве, Вы:

- 1) получаете без задержек журнал с первого номера;
- 2) экономите на стоимости почтовой доставки;
- 3) получаете скидку до 5 %.

Наши реквизиты:

E-mail: realiz@mashin.ru

Тел.: 8 (495) 785-60-69.

Отдел продаж, маркетинга, рекламы

WWW.MASHIN.RU