



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПОЛНОЙ МАССОЙ 18 ТОНН ГОРОДСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Корнилов С.В.^{1,2}, Фардеев Л.И.¹, Кудинов Д.В.^{1,3}, Анисимов В.Р.^{1,4}, Зверева Э.Р.²

¹ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

⁴Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

Kornilov.SV@kamaz.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы состоит в определении оптимальных характеристик комбинированной энергоустановки (КЭУ) на водородных топливных элементах (ТЭ) для электрического пассажирского транспортного средства (ТС) КАМАЗ-6290 городского исполнения полной массой 18 тонн длиной 12 метров. ЦЕЛЬ. Определить оптимальные характеристики КЭУ для ТС путем создания математической модели, которая позволяет оптимизировать характеристики. МЕТОДЫ. Создание имитационной математической модели ТС с КЭУ в программном обеспечении Simcenter Amesim, в которой имитируются компоненты системы. По результатам производится оптимизация параметров и характеристик КЭУ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты данной работы используются при подборе оптимальных характеристик КЭУ в условиях эксплуатации в составе ТС.

Ключевые слова: транспортное средство; водородный транспорт; комбинированная энергоустановка; оптимизация параметров; энергобаланс; математическое моделирование; топливные элементы; водородная энергетика.

Для цитирования: Корнилов С.В., Фардеев Л.И., Кудинов Д.В., Анисимов В.Р., Зверева Э.Р. Оптимизация параметров комбинированной энергоустановки на водородных топливных элементах для пассажирского транспортного средства полной массой 18 тонн городского исполнения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 118-129. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-118-129.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF A COMBINED HYDROGEN FUEL CELL POWER PLANT FOR A PASSENGER VEHICLE WITH A GROSS WEIGHT OF 18 TONS OF URBAN USE

Kornilov S.V.^{1,2}, Fardeev L.I.¹, Kudinov D.V.^{1,3}, Anisimov V.R.^{1,4}, Zvereva E.R.²

¹PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan Federal University, Kazan, Russia

⁴Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Kornilov.SV@kamaz.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the work is to determine the optimal characteristics of a combined power plant (CPP) based on hydrogen fuel cells for the urban electric passenger vehicle KAMAZ-6290 with a gross weight of 18 tons and a length of 12 meters. THE PURPOSE. Determine the optimal characteristics of the power plant for the vehicle by creating a mathematical model that allows you to optimize the characteristics. METHODS. Creation of a simulation mathematical model of the vehicle with a power plant in the software Simcenter Amesim, in which the system components are simulated. Based on the results, the parameters and characteristics of the CPP are optimized. CONCLUSION. The results of this work are used in selecting the optimal characteristics of the CPP under operating conditions as part of the vehicle.

Keywords: vehicle; hydrogen transport; combined power plant; parameter optimization; energy balance; mathematical modeling; fuel cells; hydrogen energy.

For citation: Kornilov S.V., Fardeev L.I., Kudinov D.V., Anisimov V.R., Zvereva E.R. Optimization of the parameters of a combined hydrogen fuel cell power plant for a passenger vehicle with a gross weight of 18 tons of urban use. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (5): 118-129. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-118-129.

Введение (Introduction)

В современном мире уделяется особое внимание снижению углеродного следа в различных секторах экономики и промышленности. Во всем мире прослеживается тенденция перехода на углеродно-нейтральные, возобновляемые источники энергии. Евросоюз, США и многие другие страны, в том числе РФ, выбрали водородную энергетику и технологии топливных элементов [1, 2] как одно из перспективных направлений развития в рамках ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление) повестки, так как водород является перспективным источником экологически чистой, возобновляемой энергии [3].

Применение ТЭ один из основных способов для преобразования химической энергии, запасенной в водороде, в электрическую энергию посредством электрохимической реакции. По ряду требований (например динамика работы, виброустойчивость) для транспортного применения лучшие результаты показывает тип ТЭ, использующий в качестве электролита протонообменную мембрану [4]. Применение водорода, возобновляемого источника энергии, в качестве топлива для энергоустановок на основе ТЭ один из перспективных путей декарбонизации транспортного сектора [5]. Существующие ТС с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) негативно влияют на окружающую среду из-за наличия выхлопных газов в состав которых входит большое количество вредных веществ, в том числе NO_x [6]. ТС с энергоустановками на водородных ТЭ лишены этого недостатка и не вредят экологии, так как результатом электрохимических реакций (окисления водорода – восстановления кислорода) является вода, или водяной пар, без вредных химических соединений [7]. Это главное их преимущество, также в сравнении с ДВС, у водородных ТЭ выше КПД [8]. По этой причине активно ведутся исследования и разработки ТС с энергоустановкой на водородных ТЭ. К недостаткам ТС с ТЭ относят отсутствие серийного производства и отсутствие заправочной инфраструктуры, что ведет к высокой стоимости образцов ТС с ТЭ и трудностям в эксплуатации. Для массового производства и эксплуатации таких ТС на рынке должна быть полноценная сеть водородных заправочных станций [9-10]. Стоит отметить, что сектор водородной энергетики еще только формируется, и требуется большое количество исследований [11, 12].

Энергоустановка на водородных ТЭ (ТЭУ) в составе ТС выступает в качестве источника электроэнергии для тягового электрического двигателя (ТЭД) и тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ). ТЭУ состоит из: электрохимического генератора (ЭХГ) на основе батареи топливных элементов (БТЭ), вспомогательного оборудования и системы хранения сжатого водорода (СХКВ) [13]. В процессе электрохимических реакций окисления водорода и восстановления кислорода в ТЭ генерируется электрическая энергия передаваемая в электрическую шину [14]. ТЭД преобразовывает электрическую энергию в механическую и передает крутящий момент на колеса, в случае пиковых нагрузок недостаток электроэнергии от ТЭУ дополняется энергией из ТАБ [15-16]. В состав КЭУ входит ТЭУ и перезаряжаемая система хранения электроэнергии (ПСХЭ) на основе ТАБ.

Цель исследования заключается в определении оптимальных характеристик КЭУ для применения в транспортном секторе. Научная значимость исследования состоит в применении функции оптимизации параметров КЭУ и нескольких методов функционирования ЭХГ, что позволяет определить оптимальные параметры ЭХГ, СХКВ и ПСХЭ. Практическая значимость исследования состоит в определении энергетического баланса электрического пассажирского ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения и нахождении конкретных параметров ЭХГ, СХКВ и ПСХЭ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Необходимо определить оптимальные характеристики ТЭД, энергоустановки на ТЭ и ТАБ ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения для этого будет применен метод

математического моделирования. Разработанная математическая модель была реализована в программном обеспечении Simcenter Amesim (рис. 1).

Для реализации функционала математической модели применялись физико-математические блоки, имитирующие реальные компоненты системы. Для расчетов использовались следующие блоки: ТС, водитель, блок управления ТС, трансмиссия, ТЭД, ПСХЭЭ и ЭХГ.

В блоке «ТС» задаются параметры ТС и рассчитывается сила сопротивления движению по формуле:

$$F_c = F_{\text{кач}} + F_{\text{возд}} + F_{\text{разг}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{кач}}$ – сила сопротивления качению, Н; $F_{\text{возд}}$ – сила сопротивления воздуха, Н; $F_{\text{разг}}$ – сила сопротивления разгону (сила инерции), Н.

Сила сопротивления дороги состоит из силы сопротивления подъему (F_p) и силы сопротивления качению (F_f).

$$F_d = F_p + F_f = G_a \cdot \sin(\alpha) + G_a \cdot \cos(\alpha) \cdot f, \quad (2)$$

где α – угол продольного уклона дороги, %; G_a – полный вес ТС, Н ($G_a = m \cdot g$); f – коэффициент сопротивления качению.

$$f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2000}\right), \quad (3)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при малой скорости ТС; v – скорость ТС, м/с.

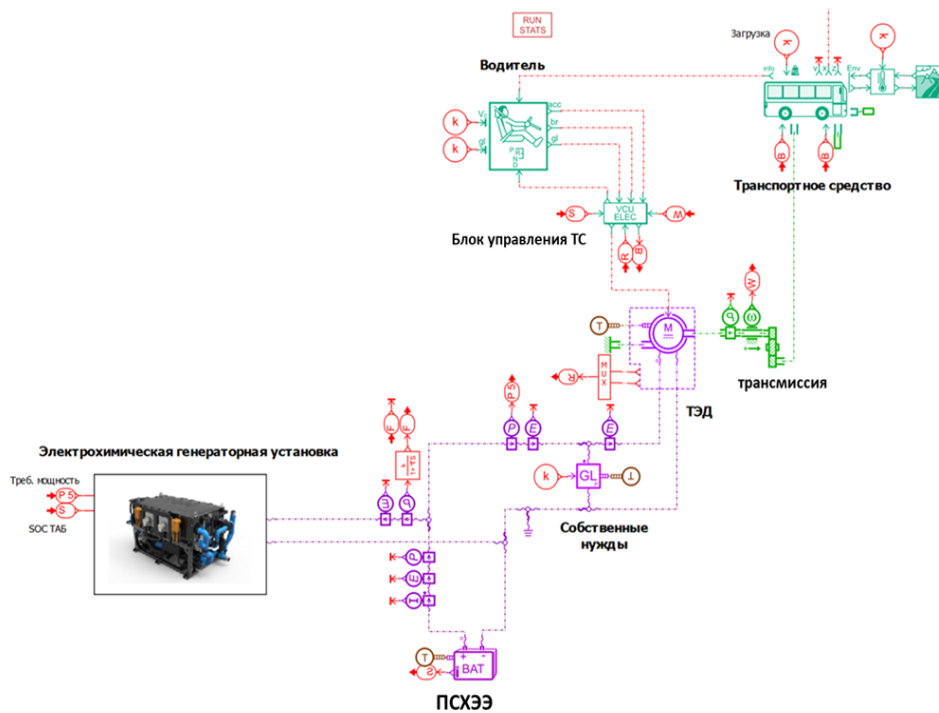


Рис. 1. ММ ТС с КЭУ

Fig.1. MM of a vehicle with a CPP

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Сила сопротивления воздуха определяется по формуле:

$$F_{\text{возд}} = 0,5c_x \cdot \rho \cdot F \cdot v^2, \quad (4)$$

где c_x – коэффициент сопротивления воздуха; F – площадь Миделя, м^2 ; ρ – плотность воздуха, для нормальных условий эксплуатации принимаем $1,225 \text{ кг/м}^3$.

Сила сопротивления разгону (сила инерции) определяется по формуле:

$$F_{\text{разг}} = \delta \cdot a \cdot M_n, \quad (5)$$

где δ – коэффициент инерции вращающихся масс, приведенных к валу ТЭД; a – ускорение ТС, м/с^2 .

Структурный элемент «Водитель» отвечает за назначение цикла движения ТС в функции скорости от времени. В структурный элемент «Блок управления ТС» поступает сигнал, сообщающий какие-либо изменения скорости. Это может быть ускорение, торможение и управление поворотом рулевого колеса для моделирования реального маршрута [17]. Также в этом блоке рассчитывается момент ТЭД, который нужен для движения по заданному циклу. Полученный сигнал затем передается на ТЭД.

Структурный элемент «ТЭД» задает тяговую характеристику и карту эффективности ТЭД – зависимость КПД от частоты вращения и момента. От структурного элемента «Блок управления ТС» поступает сигнал, который сравнивается с тяговой характеристикой ТЭД и далее происходит расчет требуемой электрической мощности необходимой для работы, принимая во внимание карту эффективности ТЭД.

Характеристики химических аккумуляторных ячеек задаются в структурном элементе «ПСХЭЭ».

Будем рассматривать ЭХГ как основной источник электроэнергии, т.е. ПСХЭЭ имеет меньший запас электроэнергии чем ЭХГ с СХКВ.

В блоке «ЭХГ» задаются параметры ЭХГ, DC/DC преобразователя, БТЭ, СХКВ, а также алгоритмы работы системы управления ЭХГ. Данные алгоритмы позволяют эффективно эксплуатировать ТС с КЭУ на различных маршрутах движения, поддерживая уровень заряда ПСХЭЭ в заданном диапазоне. Алгоритм работы ЭХГ опишем далее (рис. 2).

В системе управления ЭХГ включены алгоритмы распределения мощности, экстренного отключения, ограничения динамики нарастания и снижения мощности ЭХГ.

Для расчета оптимальных параметров КЭУ для КАМАЗ-6290 городского исполнения использовались следующие входные данные (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Table 1

Параметры ТС КАМАЗ-6290 городского исполнения

Parameters of the KAMAZ-6290 urban vehicle

Параметры	Значения
Полная масса, кг	18000
Снаряжённая масса, кг	12200
Ширина, мм	2550
Высота, мм	3220
Коэффициент заполнения лобовой площади	0,99
Коэффициент обтекаемости	0,66
Шины	275/70R22,5

**Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.*

Значения энергопотребления собственных нужд для среднестатистического режима эксплуатации, а также для оптимизационных расчётов составляет 8,24 кВт (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Собственные нужды для КАМАЗ-6290 городского исполнения

Own needs for KAMAZ-6290 urban version

Потребитель	Мощность потребителя, кВт	Средняя мощность потребителей при движении по циклу (статистические данные), кВт
Климатическая система (кондиционер)	11	3,54
Насос гидроусилителя руля	4	0,42
Компрессор	4	0,53
Система термоменеджмента ПСХЭЭ на подогрев	7	0
Система термоменеджмента ПСХЭЭ на охлаждение	2,8	0,56
DC/DC преобразователи	12	3,19
ИТОГО:		8,24

**Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.*

В модель закладывались следующие характеристики ТЭД – передаточное число 22.66, максимальная мощность 250 кВт. Для анализа по энергопотреблению ТС в условиях города применялся автобусный городской цикл движения «Orange County Bus», со средней нагрузкой ТС по массе равной 35%.

Результаты (Results)

Для определения оптимальной мощности ЭХГ, а также энергоемкости ПСХЭЭ, проведено несколько вариантов оптимизационных расчетов, в каждом из которых отличалось функционирование ЭХГ:

1. ЭХГ как основной источник энергии. Мощность ЭХГ регулируется исходя из требуемой разрядной мощности (но не менее минимального значения) и уровня заряда (SoC) ПСХЭЭ. Для сохранения ресурса ЭХГ предпочтительно сократить количество отключений ЭХГ, в модель добавлено ограничение - не более 10 отключений за день;

2. ЭХГ как основной источник энергии с учётом наличия в системе тормозного резистора (для сброса избыточной мощности). Мощность ЭХГ регулируется в зависимости от требуемой разрядной мощности (но не менее минимального значения) и SoC ПСХЭЭ, вся лишняя энергия рассеивается на резисторе. Ограничение на отключение ЭХГ – не более 10 за день;

3. ЭХГ без ограничения минимальной мощности. Мощность ЭХГ регулируется по текущим потребностям ТС, при этом нет нижней границы мощности ЭХГ и нет ограничений на количество включений/отключений.

В основе каждого алгоритма работы заложено регулирование выходной мощности ЭХГ по требуемой мощности ГЭД и поддержание уровня заряда ПСХЭЭ (рис. 2).

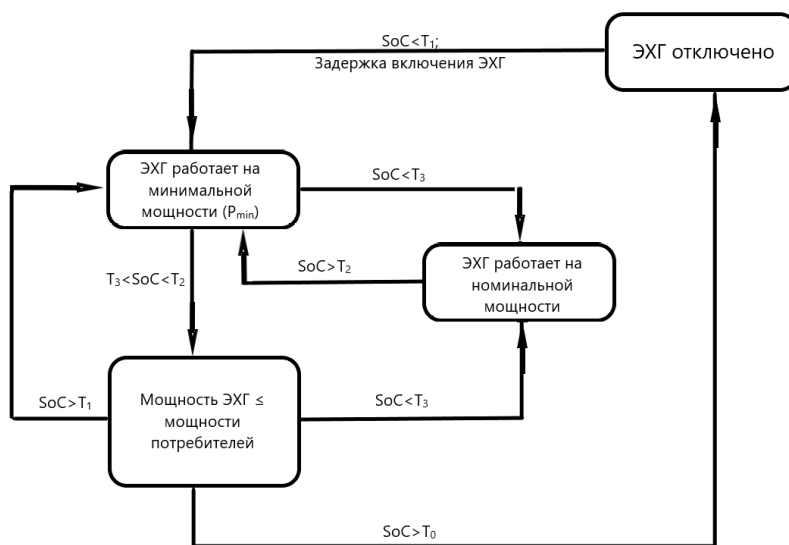


Рис. 2. Алгоритм работы ЭХГ

Fig. 2. Algorithm for the operation of an electrochemical generator

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Когда возрастает потребление энергии – ЭХГ увеличивает выходную мощность с динамикой нарастания в 10% от номинальной мощности ЭХГ. При снижении энергопотребления – выходная мощность ЭХГ уменьшается с динамикой снижения 20% от номинальной мощности ЭХГ. Минимальная мощность, до которой ЭХГ может снизить свою выходную мощность, составляет P_{min} .

Если уровень заряда ПСХЭЭ снижается ниже T_1 , происходит включение ЭХГ, при этом ЭХГ работает на минимальной мощности (P_{min}). Если SoC опуститься ниже T_2 , мощность ЭХГ будет поддерживаться на уровне мощности потребителей, но не менее минимальной мощности ЭХГ. В случае снижения SoC ниже T_3 , ЭХГ работает в режиме номинальной мощности. При уровне заряда более T_0 происходит отключение ЭХГ.

Рассмотрим первый оптимизационный расчет для алгоритма функционирования «ЭХГ» как основной источник энергии». Процесс оптимизации можно представить в виде функции направленной на минимизацию массы ПСХЭЭ, массы ЭХГ и СХКВ вместе с водородным топливом:

$$J = \frac{E_{расх.ПСХЭЭ} \cdot 345 \cdot 7,5}{\gamma \cdot 0,9 \cdot \rho_{ПСХЭЭ}} + \frac{P_{fc}}{\rho_{fc}} + E_{расх.ЭХГ} \cdot cons_{h2} + E_{расх.ЭХГ} \cdot \frac{cons_{h2}}{\rho_{h2}}, \quad (6)$$

где $E_{расх.ПСХЭЭ}$ – энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, Вт*ч; $\rho_{ПСХЭЭ}$ – удельная энергоемкость ПСХЭЭ, Вт*ч/кг; P_{fc} – мощность ЭХГ, Вт; ρ_{fc} – удельная мощность ЭХГ, Вт/кг; $E_{расх.ЭХГ}$ – энергия, пропускаемая ЭХГ за день, Вт*ч; $cons_{h2}$ – удельный расход

водородного топлива, кг/Вт*ч; ρ_{h2} – удельный показатель массы для топливного бака, кг_{H2}/кг; γ – количество циклов разряда/заряда ПСХЭЭ за срок службы.

Данная функция учитывает энергию, которую необходимо получить транспортному средству, и с помощью удельных показателей для ЭХГ, ПСХЭЭ, СХКВ получаем весовой показатель для КЭУ. Экстремум данной функции достигается при минимальном показателе массы КЭУ. При этом вариант КЭУ с минимальной массой, который преодолевает маршрут имеет оптимальное соотношение мощности ЭХГ и энергоемкости ПСХЭЭ.

Для первого варианта оптимизации, найденный экстремум должен удовлетворять следующим ограничениям по количеству включений ЭХГ (не более 10 отключений за день):

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H] n_{off} \leq 10, \quad (7)$$

где SoC_L – минимальная степень заряженности ПСХЭЭ; SoC_H – максимальная степень заряженности ПСХЭЭ; n_{off} – количество отключений БТЭ за день.

На рисунке 3 показан график изменения функции оптимизации. Минимум функции оптимизации обеспечивается при ЭХГ мощностью 41 кВт.

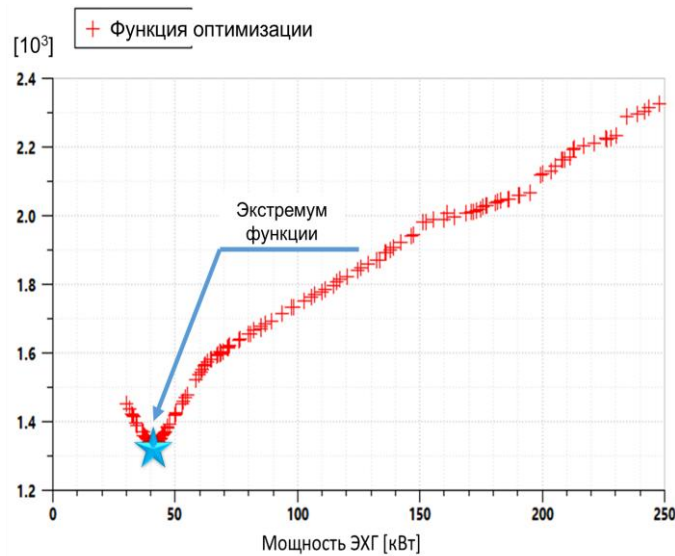


Рис. 3. График изменения функции оптимизации в зависимости от мощности ЭХГ

Fig. 3. Graph of changes in the optimization function depending on the ECG power

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее определялся энергетический баланс для конфигурации КЭУ соответствующей точке экстремума. На рисунке 4 представлен график мощностей КЭУ. Максимальная разрядная мощность составляет 140 кВт, а максимальная зарядная мощность 250 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, составляет 204 кВт*ч.

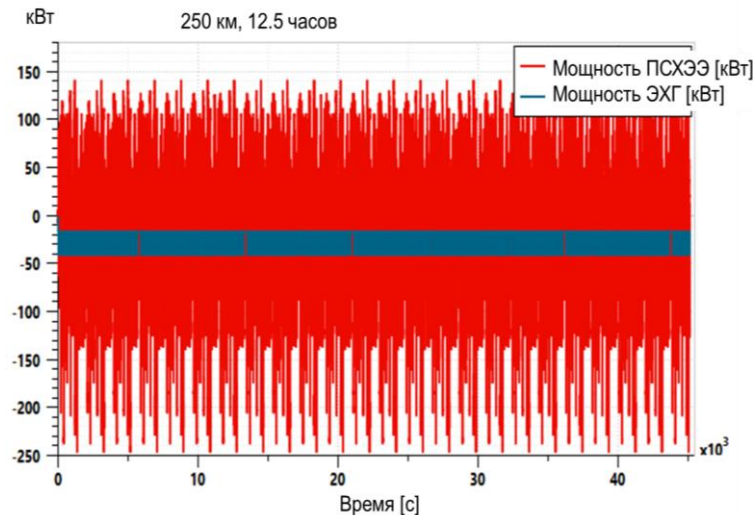


Рис. 4. График мощностей КЭУ за день

Fig. 4. Graph of CPP power per day

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее рассмотрим оптимизационный расчёт для алгоритма функционирования «ЭХГ» как основной источник энергии с учётом наличия в системе тормозного резистора». В модель добавляется тормозной резистор, основное назначение которого рассеивать избыточную энергию от ЭХГ для обеспечения непрерывной работы ЭХГ без отключений. Энергия, рассеиваемая на резисторе, определяется по формуле:

$$E_{\text{рез.}} = \int_{t_0}^{t_1} (P_{\text{min,ЭХГ}} - P_{\text{сн}}), \quad (8)$$

где $P_{\text{min,ЭХГ}} = 0,4 \cdot P_{\text{ЭХГ}}$ – минимальная мощность ЭХГ, кВт; $P_{\text{ЭХГ}}$ – максимальная мощность ЭХГ, кВт; $P_{\text{сн}}$ – мощность собственных нужд, кВт.

Процесс оптимизации выражается в виде функции, указанной ранее (6), где точка минимума показывает минимальную массу КЭУ. В данном варианте присутствует тормозной резистор, на котором часть энергии при рекуперации ТС и часть энергии ЭХГ которую не может аккумулировать ПСХЭЭ, будет расходоваться на тормозном резисторе. При этом будет происходить увеличение удельного расхода водорода на километр пробега ТС.

При этом найденный экстремум должен удовлетворять ограничениям по отключениям ЭХГ, аналогично первому варианту оптимизации КЭУ:

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H] n_{off} \leq 10, \quad (9)$$

где SoC_L – минимальная степень заряженности ПСХЭЭ; SoC_H – максимальная степень заряженности ПСХЭЭ; n_{off} – количество отключений БТЭ за день.

Затем составляется график изменения функции оптимизации, минимум функции оптимизации обеспечивается при 64 кВт мощности ЭХГ (рис. 5).

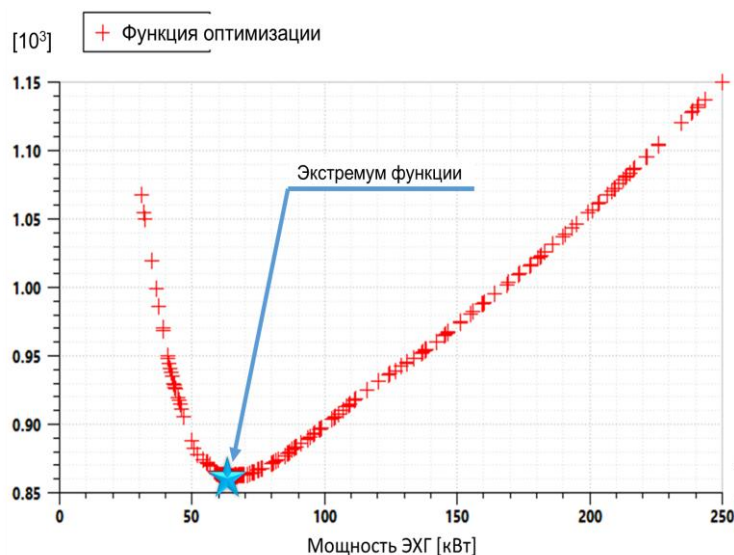


Рис. 5. График изменения массы КЭУ в зависимости от мощности ЭХГ

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее рассчитывался энергетический баланс в точке экстремума, по результатам которого составлен график мощностей КЭУ, а также график рассеиваемой мощности на тормозном резисторе (рис. 6). Максимальная разрядная мощность составляет 120 кВт, а максимальная зарядная мощность 260 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день при таком сценарии, составляет 171 кВт*ч.

Последний оптимизационный расчет проводился для алгоритма функционирования «ЭХГ без ограничения минимальной мощности». С целью нахождения оптимума была произведена оптимизация параметров без ограничения минимальной мощности ЭХГ. Данный процесс также описывается функцией (6). При этом нет ограничений на количество отключений ЭХГ формула (10).

Найденный экстремум должен удовлетворять следующему ограничению:

$$SoC \in [SoC_L, SoC_H]. \quad (10)$$

На рисунке 7 показан график изменения функции оптимизации. Минимум функции оптимизации обеспечивается при ЭХГ мощностью 72 кВт мощности ЭХГ.

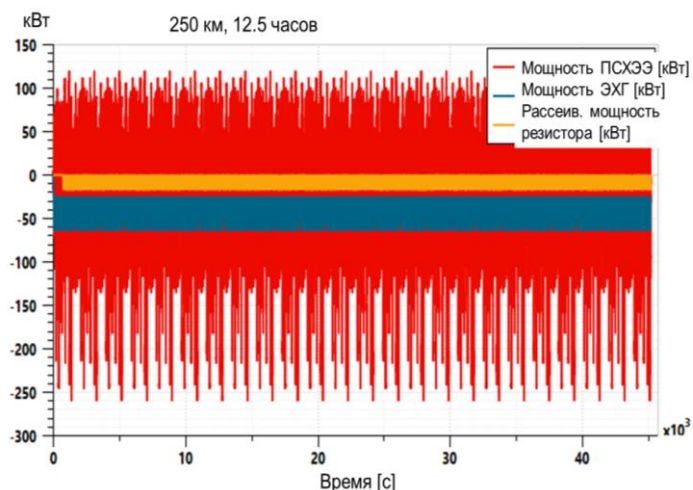


Рис. 6. График мощностей КЭУ и тормозного резистора за день

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

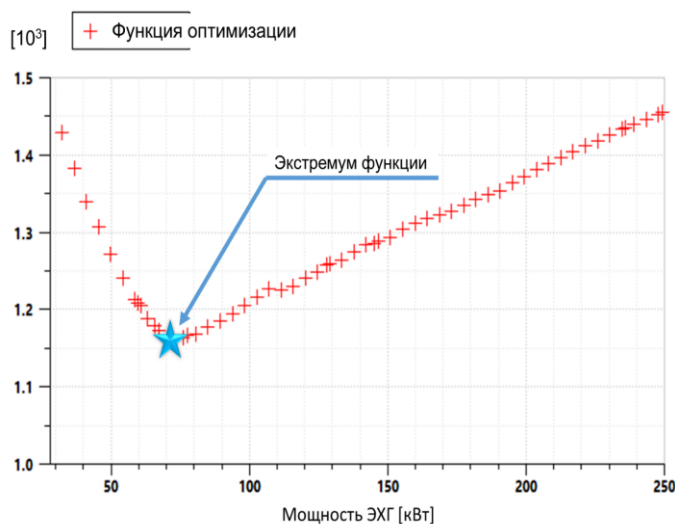


Рис. 7. График изменения функции оптимизации в зависимости от мощности ЭХГ

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Далее был проведен расчет энергетического баланса в точке экстремума, на рисунке 8 представлен график мощностей КЭУ. Максимальная разрядная мощность составляет 125 кВт, а максимальная зарядная мощность 250 кВт. Энергия, пропускаемая ПСХЭЭ за день, составляет 140 кВт*ч.

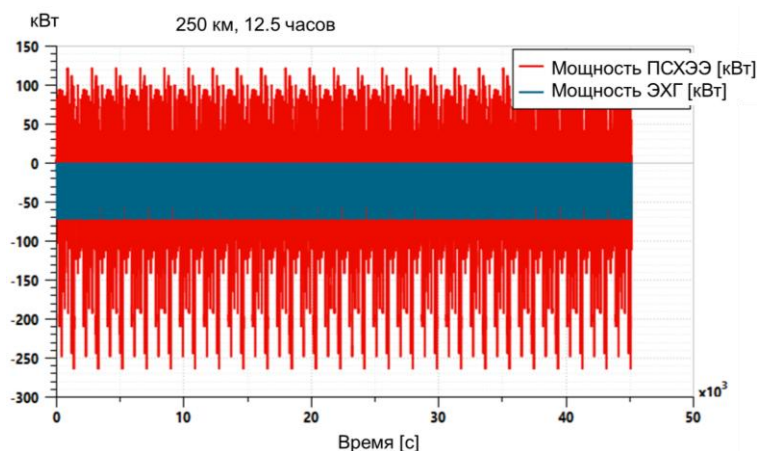


Рис. 8. График мощностей КЭУ за день

Fig. 8. Graph of CPP power per day

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3
Table 3Результаты расчетов
Calculation results

Параметры	Без ограничения минимальной мощности ЭХГ	ЭХГ основной источник энергии (без тормозного резистора)	ЭХГ основной источник энергии с резистором
Мощность ЭХГ, кВт	72	41	64
Энергоемкость ПСХЭЭ, кВт*ч	36	52,3	44,2
Масса ЭХГ, кг	144	81	127
Масса СХКВ, кг	377	379	535
Масса ТАБ, кг	600	872	735
Масса КЭУ, кг	1121	1332	1397
Расход водородного топлива на маршрут (250 км), кг	18,9	18,8	25,5
Влияние частоты отключений на ресурс ЭХГ	Значительное	Не значительное	Не значительное

*Источник: составлено авторами Source: compiled by the author.

Для каждого из экстремумов функций полученных при проведении расчетов составлена сводная таблица параметров КЭУ (табл. 3). Согласно представленным данным, вариант КЭУ с ЭХГ без ограничения минимальной мощности, имеет наименьшую массу КЭУ, что достигается путем минимизации энергоемкости ПСХЭЭ. В данном варианте ЭХГ имеет наибольшую мощность (72 кВт), что в совокупности с отсутствием ограничений на количество включений ЭХГ, позволяет минимизировать энергоемкость ПСХЭЭ. Однако, исходя из оценки ресурса ЭХГ, данный вариант является худшим, так как из-за частых включений и отключений увеличивается скорость деградации топливных элементов [18].

Вариант ЭХГ как основной источник энергии с используемым тормозным резистором демонстрирует наибольший расход водорода, чем аналогичный вариант без резистора, т.к. энергия при рекуперации потребляется тормозным резистором, а не аккумулируется в ПСХЭЭ. В свою очередь, большой расход водородного топлива ведет к росту массы СХКВ.

Наиболее оптимальным с точки зрения расхода топлива, пропускаемой электроэнергии через ПСХЭЭ и ресурса ЭХГ, является вариант «ЭХГ как основной источник энергии (без тормозного резистора)». Данный вариант обеспечивает наименьшее количество отключений ЭХГ (соответственно более продолжительный ресурс эксплуатации) и расход водородного топлива в данном варианте минимальный.

Заключение (Conclusion)

В данной работе были рассмотрены три метода функционирования электрохимического генератора в составе пассажирского транспортного средства полной массой 18 тонн, эксплуатирующийся в городских условиях.

В результате оптимизационных расчётов определено оптимальное соотношение параметров мощности ЭХГ (41 кВт) и энергоёмкости ПСХЭЭ (52,3 кВт*ч). А также получена требуемая масса хранимого водорода в СХКВ (18,8 кг). При этом ЭХГ является основным источником электроэнергии с ограничением количества отключений за день и ограничением по минимальной мощности на которой ЭХГ может работать.

В процессе расчётов учитывались следующие параметры оптимизации: оптимальная конфигурация КЭУ, исходя из минимизации общей массы (ПСХЭЭ, ЭХГ, СХКВ), обеспечение наименьшего количества отключений ЭХГ, а также обеспечение ресурса ПСХЭЭ. Также условием выбора конфигураций КЭУ было соответствие необходимым тягово-динамическим характеристикам ТС.

Проведенные расчеты позволили выявить оптимальные параметры КЭУ для ТС КАМАЗ-6290 в городских условиях эксплуатации. Результаты оптимизационных расчетов были внедрены в процесс проектирования и модернизации ТС КАМАЗ-6290. Оптимизация параметров ЭХГ, ПСХЭЭ позволила значительно сократить количество отключений электрохимического генератора. Это обеспечило более стабильную работу системы, повысив уровень надежности и увеличило потенциальный срок эксплуатации.

Литература

1. Han J. et al. A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles //Energy Conversion and Management: X. – 2022. – Vol. 15. – pp. 100265.
2. Корнилов С.В., Зверева Э.Р., Симонов И.В. Исследование энергетических систем на водородных топливных элементах для транспортных средств //Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей «Энергетика и автоматизация в современном обществе». – 2023. – Часть II. – С. 189-198.
3. Линник Ю. Н., Фаляхова Е. Д. Водородная энергетика и перспективы ее развития //Вестник университета. – 2023. – № 4. – С. 33-39.
4. Cheng S. et al. Investigation and analysis of proton exchange membrane fuel cell dynamic response characteristics on hydrogen consumption of fuel cell vehicle //International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47. – Vol. 35. – pp. 15845-15864.
5. Rout C. et al. A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel //Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – pp. 12.
6. Холиков М.М., Сафаров М.М., Джураев Д.С. Состав выхлопных газов и способы снижения вредного воздействия отработанные газы двигателей внутреннего сгорания // Вопросы физической и коллоидной химии. – 2019. – стр. 202-208.
7. Peter Reithuber, Christian Frühwirth, Simon Buchberger, Helmut Eichlseder. Investigation of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Cathode Exhaust Gas Composition Based on Test Bed Measurements // Energies. – 2023. – p. 1-20.
8. Antonio N.M., Carla M., Francesco V., Manlio P., Roberto B. PEM Fuel Cell Applications in Road Transport /// Energies. – 2023. – p. 20-27.
9. Рагимов Э. А. Водородные транспортные средства в городских транспортных системах //Транспорт на альтернативном топливе. – 2020. – № 4 (76). – С. 62-68.
10. Isaac N., Saha A. K. Analysis of refueling behavior of hydrogen fuel vehicles through a stochastic model using Markov Chain Process //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol. 141. – pp. 110761.
11. Trapp C. T. C., Kanbach D. K., Kraus S. Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry //Sustainable Technology and Entrepreneurship. – 2022. – Vol. 1. – № 2. – pp. 100014.
12. Беляев С. В. и др. Возможности использования водорода на автотранспорте //Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 76-79.
13. Илимбетов Р. Ю., Астапенко А. М. Разработка компоновочной схемы комбинированной энергетической установки для грузового автомобиля с улучшенными экологическими показателями //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 72-79.
14. Клюев В. В., Евсевич И. С. Особенности устройства водородного двигателя //Актуальные проблемы энергетики. – 2020. – № 13. – С. 330-332.
15. Тютрина А. Ю., Бурманов С. А. Анализ применения водородных элементов и аккумуляторных батарей на электротранспортных средствах //Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте. – 2021. – С. 410-412.
16. Сейвальд С., Пузанов Д. А., Чебоксаров А. Н. Применение водородной силовой установки на автомобильном транспорте //Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. – 2022. – С. 159-164.
17. Чичекин И. В., Левенков Я. Ю., Зуенков П. И. Формирование закона управления углом поворота рулевого колеса для поддержания заданной траектории движения автомобиля // Труды НАМИ. – 2019. – № 3(278). – С. 53-61
18. Kocha S.S., Chapter 3 - Electrochemical Degradation: Electrocatalyst and Support Durability // Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation – 2012. – P. 89-214.

Авторы публикации

Корнилов Семён Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия, гл. конструктор энергетических систем, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. Kornilov.SV@kamaz.ru

Фардеев Ленар Ильдарович – директор центра электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. Lenar.Fardeev@kamaz.ru

Кудинов Даниил Владимирович – аспирант ФГБОУ ВО «Казанский федеральный университет», г. Казань, Россия, ведущий инженер-конструктор, центр электроники и элементов питания ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *KudinovDV@kamaz.ru*

Анисимов Виктор Романович – аспирант ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия, инженер-конструктор 1 категории ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны, Россия. *AnisimovVR@kamaz.ru*

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. *belvira6@list.ru*

References

1. Han J. et al. A review of key components of hydrogen recirculation subsystem for fuel cell vehicles // *Energy Conversion and Management*: X. – 2022. – Vol. 15. – pp. 100265.
2. Kornilov S.V., Zvereva E.R., Simonov I.V. Research of energy systems based on hydrogen fuel cells for vehicles // *Materials of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Teachers "Energy and Automation in Modern Society"*. – 2023. - Part II. – pp. 189-198.
3. Linnik Yu. N., Falyakhova E. D. Hydrogen energy and prospects for its development // *Bulletin of the University*. – 2023. – No. 4. – pp. 33-39.
4. Cheng S. et al. Investigation and analysis of proton exchange membrane fuel cell dynamic response characteristics on hydrogen consumption of fuel cell vehicle // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – T. 47. – Vol. 35. – pp. 15845-15864.
5. Rout C. et al. A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8. – pp. 12.
6. Holikov M.M., Safarov M.M., Jhuraev D.S. Composition of exhaust gases and methods for reducing the harmful effects of exhaust gases from internal combustion engines // *Questions of physical and colloidal chemistry*. – 2019. – p. 202-208.
7. Peter Reithuber, Christian Frühwirth, Simon Buchberger, Helmut Eichlseder. Investigation of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Cathode Exhaust Gas Composition Based on Test Bed Measurements // *Energies*. – 2023. – p. 1-20.
8. Antonio N.M., Carla M., Francesco V., Manlio P., Roberto B. PEM Fuel Cell Applications in Road Transport // *Energies*. – 2023. – P. 20-27.
9. Ragimov E. A. Hydrogen vehicles in urban transport systems // *Alternative fuel transport*. – 2020. – No. 4 (76). – P. 62-68.
10. Isaac N., Saha A. K. Analysis of refueling behavior of hydrogen fuel vehicles through a stochastic model using Markov Chain Process // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 141. – pp. 110761.
11. Trapp C. T. C., Kanbach D. K., Kraus S. Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry // *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. – 2022. – Vol. 1. – No. 2. – pp. 100014.
12. Belyaev S.V. et al. Possibilities of using hydrogen in vehicles // *New materials and technologies in mechanical engineering*. – 2015. – No. 21. – pp. 76-79.
13. Ilimbetov R. Yu., Astapenko A. M. Development of a layout diagram of a combined power plant for a truck with improved environmental performance // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering*. – 2013. – T. 13. – No. 1. – pp. 72-79.
14. Klyuev V.V., Evsievich I.S. Features of the design of a hydrogen engine // *Current problems of energy*. – 2020. – No. 13. – pp. 330-332.
15. Tyutrina A. Yu., Burmanov S. A. Analysis of the use of hydrogen cells and batteries in electric vehicles // *Innovations in information technologies, mechanical engineering and motor transport*. – 2021. – P. 410-412.
16. Seyvald S., Puzanov D. A., Cheboksarov A. N. Application of a hydrogen power plant in automobile transport // *Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations*. – 2022. – P. 159-164.
17. Chickekin I.V., Lovenkov Ya. Yu., Zuenkov P.I. Formation of the law of control of the angle of rotation of the steering wheel to maintain a given trajectory of the car // *Proceedings by us*. – 2019. - No. 3 (278). -S. 53-61
18. Kocha S.S., Chapter 3 - Electrochemical Degradation: Electrocatalyst and Support Durability // *Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation* – 2012. – P. 89-214.

Authors of the publication

Semyon V. Kornilov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *Kornilov.SV@kamaz.ru*

Lenar I. Fardeev – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia. *Lenar.Fardeev@kamaz.ru*

Daniil V. Kudinov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Kazan Federal University, Kazan, Russia. *KudinovDV@kamaz.ru*

Viktor R. Anisimov – PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. *AnisimovVR@kamaz.ru*

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *belvira6@list.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **23.06.2025 г.**

Отредактировано **11.09.2025 г.**

Принято **01.10.2025 г.**