

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-640834>

EDN: NETVVI

Разработка имитационной модели водородного транспортного средства и подсистемы управления запросом мощности

Е.И. Рахматуллин^{1,2}, В.В. Дебелов^{1,2}¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия;² Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Водородные технологии позволяют значительно снизить выбросы парниковых газов в городской среде, так как при использовании водорода в качестве продуктов выхлопа образуются воздух и вода. Это отвечает мировым тенденциям в борьбе с изменением климата и уменьшении загрязнения воздуха в крупных городах. Водород можно производить из различных источников, включая возобновляемые источники энергии. Это является причинами интеграции в автомобиль водородной топливной установки, содержащей топливный элемент. Разработка алгоритмов управления мощностью, вырабатываемой водородным топливным элементом, является актуальной научно-технической задачей, позволяющей увеличить пробег автомобиля и эффективность использования водородного топлива.

Целью работы являются разработка и выбор наиболее эффективного алгоритма и реализация его в составе модели управления запросом мощности водородным топливным элементом с применением различных стратегий управления энергопотреблением, а также на основе анализа результатов моделирования при сравнении рабочих параметров системы распределения мощности.

Материалы и методы. В данной работе представлена разработка имитационной модели гибридного водородного транспортного средства с использованием библиотеки Simscape в пакете MATLAB Simulink. С помощью основных блоков Simulink были созданы модели и алгоритмы управления запросом мощности для водородного топливного элемента, а также имитационная модель транспортного средства, которая позволяет тестировать разработанные алгоритмы.

Результаты. В данной работе представлена стратегия управления мощностью топливного элемента. Реализован алгоритм, включающий различные типы стратегий, такие как ПИД-регулятор, машина состояний, алгоритм эквивалентной минимизации потребления и контроллер нечёткой логики. Кроме того, в работе изложены требования к системе транспортного средства и представлена разработка имитационной модели гибридного водородного транспортного средства. В результате сравнения рабочих параметров системы распределения мощности выделен наиболее эффективный алгоритм управления запросом мощности.

Заключение. Практическая ценность данного исследования заключается в анализе алгоритмов управления запросом мощности и выявлении наиболее эффективных из них. Это значительно ускоряет процесс выбора алгоритмов управления топливным элементом для водородных транспортных средств.

Ключевые слова: математическое моделирование; водородный топливный элемент; распределение мощности; электротехнический комплекс; энергоэффективность; электрический транспорт.

Как цитировать:

Рахматуллин Е.И., Дебелов В.В. Разработка имитационной модели водородного транспортного средства и подсистемы управления запросом мощности // Известия МГТУ «МАМИ». 2025. Т. 19, № 2. С. x–y. DOI: 10.17816/2074-0530-640834 EDN: NETVVI

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-640834>

EDN: NETVVI

Development of a Simulation Model of a Hydrogen Vehicle and a Subsystem for Request Control

Evgeny I. Rakhmatullin^{1,2}, Vladimir V. Debelov^{1,2}¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;² Central Research Automobile and Motor Institute NAMI, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Hydrogen technologies enable a significant reduction in greenhouse gas emissions in urban environments since their only byproducts are air and water. This aligns with global trends aimed at combating climate change and reducing air pollution in major cities. Hydrogen can be produced from various sources, including renewable energy. These factors justify integrating a hydrogen fuel cell system into vehicles. Developing power control algorithms for hydrogen fuel cells is an important scientific and technical challenge, as it increases vehicle range and enhances hydrogen fuel utilization efficiency.

AIM: Development and selection of the most effective algorithm for implementation within a model of the hydrogen fuel cell's power request control using various energy consumption control strategies and comparing the operating parameters of the power distribution system were compared based on an analysis of simulation results.

METHODS: This paper presents the development of a simulation model for hybrid hydrogen-powered vehicles using the Simscape library in the MATLAB/Simulink environment. Using basic Simulink blocks, models and control algorithms for hydrogen fuel cell power request control were created, as well as a vehicle simulation model capable of testing these algorithms.

RESULTS: During the study, the strategy for controlling fuel cell power was developed. The algorithm incorporates several strategies, including a PID controller, a state machine, an equivalent consumption minimization algorithm, and a fuzzy logic controller. Additionally, requirements for the vehicle system have been outlined, and a simulation model for a hybrid hydrogen vehicle has been developed. As a result of comparing the operating parameters of the power distribution system, the most efficient power request control algorithm was identified.

CONCLUSION: The practical significance of this research lies in analyzing power request control algorithms and identifying the most effective among them. This significantly accelerates the process of selecting control algorithms for fuel cells in hydrogen vehicles.

Keywords: mathematical modeling; hydrogen fuel cell; power distribution; electrical engineering facility; energy efficiency; electric transport.

To cite this article:

Rakhmatullin EI, Debelov VV. Development of a Simulation Model of a Hydrogen Vehicle and a Subsystem for Request Control. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2025;19(2):x–y. DOI: 10.17816/2074-0530-640834 EDN: NETVVI

Submitted: 31.10.2024

Accepted: 12.08.2025

Published online: 16.09.2025

ВВЕДЕНИЕ

В производстве легковых автомобилей и транспортных средств современным трендом становится использование силовых установок, основанных на водородных топливных элементах с протонообменной мембраной. Это обусловлено экологическими и отраслевыми нормами, установленными в рамках правил ЕЭК ООН № 83, а также ГОСТ Р ИСО 23828-2013 и SAE J2579.

Например, использование топливных элементов [1] на легковом автомобиле с массой 1,6 тонны позволяет получить мощность около 100 кВт, при расходе 1,8 кг водорода на 161 км (100 миль), что соответствует 6,5 литрам бензина в пересчёте на удельную энергию. Топливные баки для таких автомобилей представляют собой соединённые резервуары, которые под давлением 600–700 бар вмещают 5–6 кг водорода, что обеспечивает запас хода в 500–600 км. При этом продукты выброса состоят только из воздуха и воды, что делает их экологически чистыми [15].

При оценке пробега автомобиля на водородном топливе по циклу WLTC (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle) лучшие результаты достигаются благодаря эффективному управлению электрической мощностью, вырабатываемой водородным топливным элементом и тяговой аккумуляторной батареей, а также оптимальному распределению этой мощности в моменты пиковых нагрузок [2, 11], разрядки аккумулятора и низких температур. Например, топливный элемент легкового автомобиля Toyota Mirai генерирует около 114 кВт, в то время как мощность тягового аккумулятора составляет 21 кВт, а электропривода — 113 кВт (154 л.с.). Это позволяет в критические моменты использовать мощность аккумулятора, который может обеспечивать ток, превышающий номинальный в 5–10 раз и более, что помогает компенсировать задержку системы управления при запросе мощности от топливного элемента, а затем зарядить аккумулятор от него [12].

Тем не менее, есть задачи, когда необходимо достичь максимальных значений удельной энергоёмкости и времени эксплуатации транспортного средства для повышения его пробега и сохранения динамических характеристик. Для этого необходимо разработать алгоритмы, которые будут эффективно распределять мощность в автомобиле, использующем водородный топливный элемент с протонообменной мембраной.

Цель данной работы заключается в разработке математических моделей и алгоритма распределения мощности для автомобилей с водородными топливными элементами. Это включает эффективное управление запрашиваемым током при удовлетворении требований по мощности и увеличение автономности транспорта за счёт перераспределения энергии [2].

Объектом исследования является электротехнический комплекс энергетической установки автомобиля, основанный на водородном топливном элементе с протонообменной мембраной.

Предметом исследования выступают процессы распределения энергии и реализации запросов по мощности в электротехническом комплексе на основе топливных элементов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Разработка функциональной структуры электротехнического комплекса и её реализация в имитационной среде, что включает создание комплексной численной модели, которая охватывает модели распределения энергии.
2. Анализ существующих технических решений в области систем электропитания и управления мощностью для автомобильных энергетических установок, использующих водородные топливные элементы.
3. Экспериментальное исследование электротехнического комплекса в контексте численного имитационного моделирования с целью выявления более эффективного алгоритма работы.

Разработка имитационной модели водородного транспортного средства

Существует несколько распространённых методов моделирования транспортных средств (ТС), включая обратный и прямой подходы. В обратной схеме модель основывается на заранее заданном цикле движения, который строго соблюдается, при этом скорость транспортного средства не изменяется динамически. Напротив, в прямой схеме моделирования управление транспортным средством осуществляется на основе модели водителя, которая следует заданному ездовому циклу, и поэтому скорость становится динамическим параметром.

В рамках прямого подхода цикл движения определяет целевую скорость, которая служит входной переменной для модели водителя. В зависимости от разницы между заданной и фактической скоростями ТС подсистема водителя преобразует желаемую скорость и ускорение в значения уставки для педали акселератора. Эти значения, в свою очередь, формируют запрос крутящего момента, необходимого для поддержания желаемой скорости [6, 7].

Для анализа и испытания разработанных стратегий управления мощностью [4], генерируемой топливным элементом, была создана имитационная модель водородного транспортного средства. Топология модели, использующей прямой подход к моделированию, представлена на рис. 1.

Математическая модель автомобиля на топливных элементах, оснащённого мотор-генератором, аккумулятором, трансмиссией с прямым приводом и соответствующими алгоритмами управления, была разработана с использованием прямого подхода в среде MATLAB Simulink [10, 13]. Структура Simulink-модели показана на рис. 2 и включает в себя такие подсистемы, как «Ездовой цикл», «Водитель», «Блок управления», «Силовой агрегат ТС» и «Визуализация».

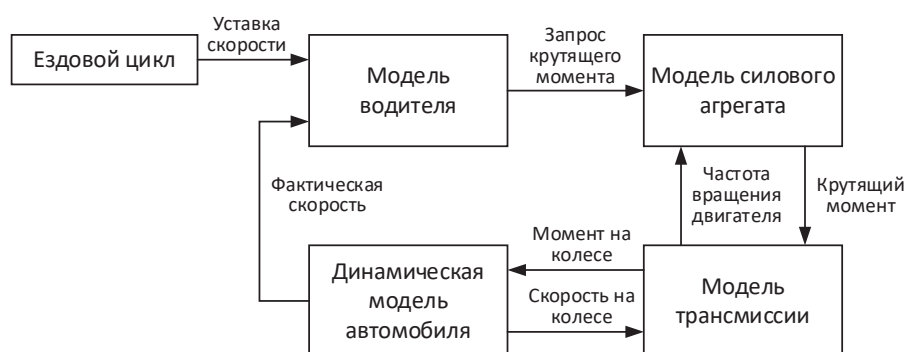


Рис. 1. Топология модели водородного ТС при прямом подходе моделирования.

Fig. 1. Topology of the model of a hydrogen model, using the direct modeling approach: Ездовой цикл: Driving cycle; Модель водителя: Driver model; Модель силового агрегата: Power plant model; Модель трансмиссии: Transmission model; Динамическая модель автомобиля: Dynamic vehicle model; Фактическая скорость: Current velocity; Момент на колесе: Wheel torque; Скорость на колесе: Wheel velocity; Частота вращения двигателя: Engine rotation velocity; Крутящий момент: Torque; Запрос крутящего момента: Torque request; Уставка скорости: Vehicle velocity setpoint.

Подсистема «Ездовой цикл»

Эта подсистема включает модель ездового цикла, основанную на таблицах зависимости скорости от времени. Выбор конкретного циклового режима в модели осуществляется с использованием блока Drive Cycle Source из встроенной библиотеки MATLAB Simulink, который воспроизводит заданный маршрут движения автомобиля. Выходным параметром данного блока является сигнал эталонной продольной скорости транспортного средства, зависящий от времени.

В рамках работы была выбрана модель ездового цикла WLTC (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle — Всемирный гармонизированный цикл тестирования легковых автомобилей).

Цикл WLTC, представленный в модели (рис. 3), включает четыре фазы, отличающиеся скоростью движения и разделённые короткими остановками. В первой фазе Low транспортное средство разгоняется до максимальной скорости

56,5 км/ч. Во второй фазе Medium оно достигает 76,6 км/ч. В третьей фазе High автомобиль разгоняется до максимума 97,4 км/ч, а в последней фазе Extra High — до 131,6 км/ч. Первые две фазы составляют городскую часть цикла WLTC, тогда как последние две — загородную.

Подсистема «Водитель»

В подсистеме «Водитель» скорость, рассчитанная в подсистеме ездового цикла, выступает в качестве входного параметра. Выходными параметрами этой подсистемы являются нормализованные команды ускорения и торможения, основанные на референсной и фактической скоростях, полученных через обратную связь из динамической модели автомобиля.

Подсистема «Силовой агрегат»

Подсистема представляет собой Simulink-модель силового агрегата водородного транспортного средства,

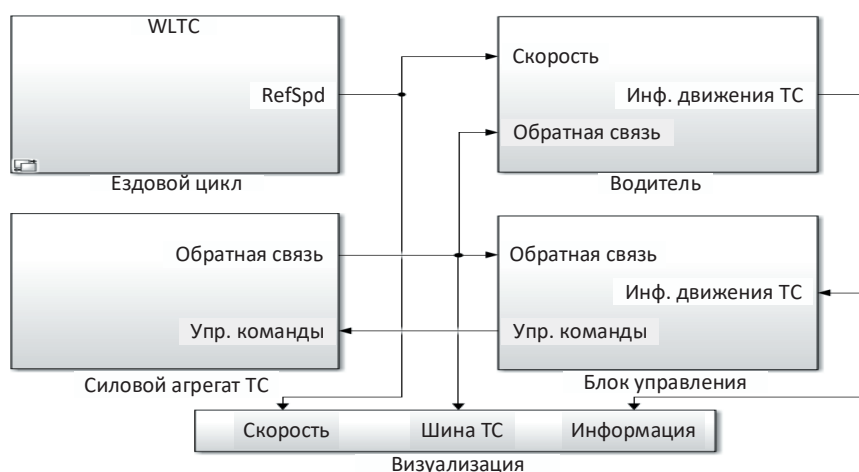


Рис. 2. Структура Simulink-модели гибридного водородного транспортного средства: WLTC — Worldwide Harmonized Light vehicles Test Cycle — Всемирный гармонизированный цикл тестирования легковых автомобилей; RefSpd — Референсная скорость.

Fig. 2. Block diagram of the Simulink model of a hybrid hydrogen vehicle: Ездовой цикл: Driving cycle; Обратная связь: Feedback; Упр. Команды: Control commands; Силовой агрегат TC: Vehicle power unit; Скорость: Velocity; Шина TC: Vehicle CAN bus; Информация: Data; Блок управления: Electronic control unit; Водитель: Driver.

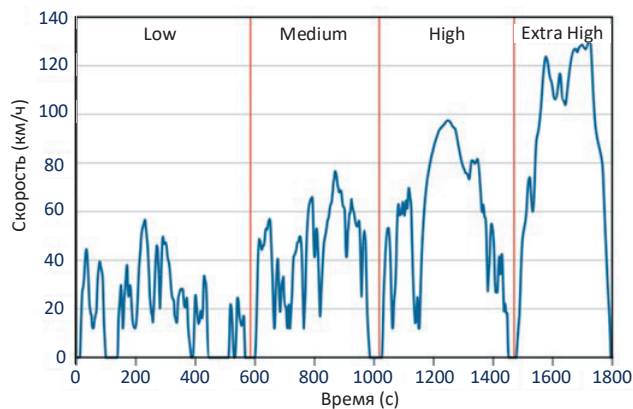


Рис. 3. Ездовой цикл WLTC: Low (Низкий) — отражает движение на низких скоростях, обычно в городских условиях; Medium (Средний) — включает умеренные скорости и более разнообразные условия, включая как городские, так и пригородные участки; High (Высокий) — представляет собой более высокие скорости, часто встречающиеся на трассе или в условиях более интенсивного движения; Extra High (Очень высокий) — включает в себя максимальные скорости, которые могут быть достигнуты современными легковыми автомобилями на высокоскоростных трассах.

Fig. 3. The WLTC driving cycle: Low: Represents driving at low velocities, typically in urban environments; Medium: Includes moderate velocities and more varied conditions, including both urban and suburban areas; High: Represents higher velocities, often found on the highway or in heavier traffic conditions; Extra High: Includes the maximum velocities that can be achieved by modern passenger cars on high-speed highways; Скорость: Velocity; Время: Time.

включающего электрическую установку и трансмиссию (рис. 4).

В данной подсистеме, разработанной в MATLAB Simulink с использованием библиотеки Simscape, топливный элемент и аккумуляторная батарея соединены с двигателем через электрическую сеть постоянного тока. Система управления определяет, сколько энергии необходимо извлечь из аккумулятора и топливного элемента. Во время торможения энергия рекупируется для зарядки аккумулятора. Система охлаждения реализована в виде замкнутого контура с охлаждающей жидкостью и обеспечивает необходимый температурный режим для аккумулятора, преобразователей постоянного тока и двигателя.

Электромотор

В работе электромотор — это бесщёточный синхронный двигатель с постоянными магнитами, который функционирует в определённом диапазоне крутящего момента и частоты вращения ротора, также известный как электрическая машина [9].

Система управления электромотором работает в режиме управления крутящим моментом, получая установленное значение крутящего момента от блока управления и определяя возможные параметры работы при помощи интерполяции угловой скорости двигателя. Электрические

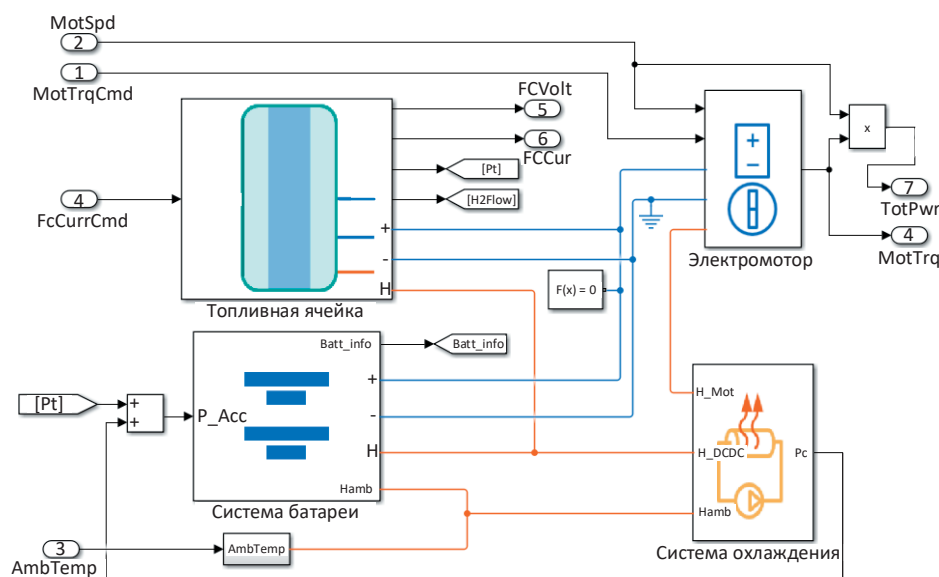


Рис. 4. Подсистема электрической силовой установки: MotSpd — скорость вращения электромотора; MotTrqCmd — запрос момента электромотора; FCCurCmd — запрос тока топливной ячейки; FCVolt — напряжение ячейки; FCCur — ток ячейки; Pt — электрическая потребляемая мощность топливной ячейки; H2Flow — скорость потока водорода; "+" — плюсовая клемма; "-" — минусовая клемма; H — температура; Hamb — температура окружающей среды; H_DCDC — температура преобразователя; H_mot — температура электромотора; AmbTemp — температура окружающей среды; Pc — электрическая потребляемая мощность охладителя; TotPwr — полная мощность; MotTrq — момент двигателя; Bat_Info — диагностические параметры батареи высокого напряжения; Electrical Reference — точка с нулевым потенциалом (земля); P_Acc — мощность потребителей электроэнергии.

Fig. 4. Electric power plant subsystem: MotSpd: Electric motor speed; MotTrqCmd: Electric motor torque command; FCCurCmd: Fuel cell current command; FCVolt: Fuel cell voltage; FCCur: Fuel cell current; Pt: Electrical power consumption of the fuel cell; H2Flow: Hydrogen flow rate; "+": Positive terminal; "-": Negative terminal; H: Temperature; Hamb: Ambient temperature; H_DCDC: Converter temperature; H_mot: Electric motor temperature; AmbTemp: Ambient temperature; Pc: Electrical power consumption of the cooler; TotPwr: Total power; MotTrq: Motor torque; Bat_Info: High-voltage battery diagnostic parameters; Electrical Reference: Ground; P_Acc: Power consumption of accessories; Топливная ячейка: Fuel cell; Электромотор: Electric motor; Система батареи: HV battery; Система охлаждения: cooling system.

потери рассчитываются на основе табличных данных, которые учитывают эффективность в зависимости от скорости и крутящего момента.

Потребляемая мощность электрической машины P_{req} может быть вычислена на основе частоты вращения двигателя ω_m и необходимого крутящего момента T_m , который определяется значением, полученным от нажатия педали акселератора:

$$P_{req} = \begin{cases} \frac{T_m \omega_m}{\eta_m} (T_m \geq 0) \\ T_m \omega_m \eta_m (T_m < 0) \end{cases}. \quad (1)$$

Эффективность электромотора η_m зависит от крутящего момента T_m и скорости вращения ω_m и описывается уравнением:

$$\eta_m = f(T_m, \omega_m). \quad (2)$$

График эффективности электрической машины представлен на рис. 5.

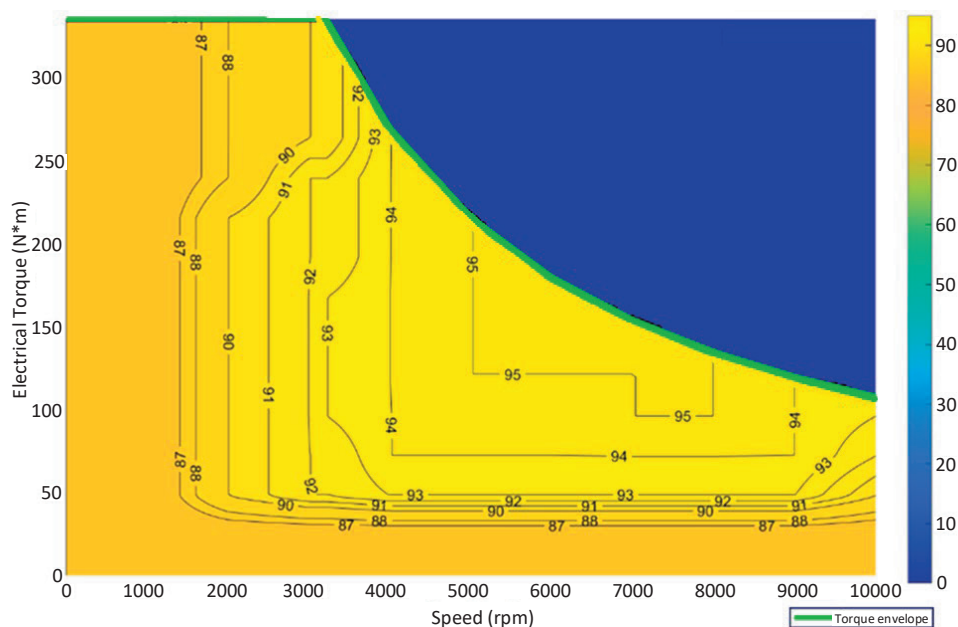


Рис. 5. График эффективности электрической машины: Electrical Torque — крутящий момент электромотора; Torque envelope — крутящий момент; Speed — частота вращения электромотора.

Fig. 5. Graph of the electric motor efficiency.

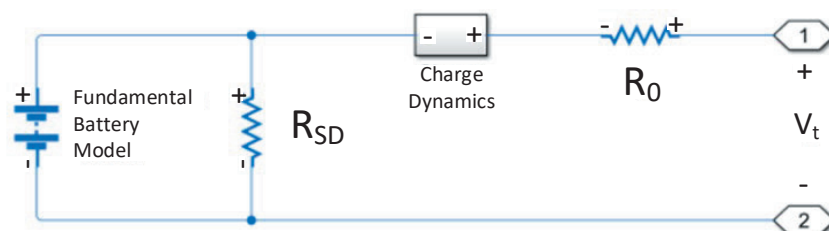


Рис. 6. Эквивалентная схема аккумулятора: Fundamental Battery Model — модель аккумулятора; Charge Dynamic — динамика заряда; R_{SD} — резистор саморазряда; R_0 — последовательный резистор; V_t — выходное напряжение аккумулятора.

Fig. 6. Equivalent circuit of the battery: R_{SD} : Self-Discharge Resistor; R_0 : Series Resistor; V_t : Battery Output Voltage.

Система батареи

Тяговая аккумуляторная батарея моделируется с использованием библиотечного блока Simulink, который представляет собой модель аккумулятора [8]. Данный блок имитирует напряжение холостого хода в зависимости от уровня заряда (SOC) и температуры (T) с опорой на справочные таблицы. Эквивалентная схема аккумулятора представлена на рис. 6 и включает в себя модель аккумулятора, резистор саморазряда (R_{SD}), подсистему динамической зарядки и последовательный резистор (R_0).

Модель аккумулятора генерирует напряжение холостого хода или напряжение на аккумуляторе с помощью методов интерполяции согласно уравнению:

$$v_0 = v_0(SOC, T), \quad (3)$$

где v_0 — напряжение холостого хода аккумулятора.

Уровень заряда батареи (SOC) определяется как соотношение текущего заряда к номинальной ёмкости батареи q_{nom} , которая указана в ампер-часах (см. уравнение 4).

$$SOC(t) = \frac{1}{q_{nom}(T, n)} \int \left(i(t) - \frac{V_{open}(T, n, t)}{R_{SD}(T, n)} \right) dt, \quad (4)$$

где n — текущее количество циклов работы батареи, а T — температура батареи.

Модель аккумулятора также учитывает последовательное сопротивление R_0 в зависимости от уровня заряда (SOC) и температуры (T).

Топливная ячейка

Подсистема топливной ячейки представляет собой модель блока топливных элементов с протонообменной мембраной, а также другими вспомогательными компонентами. В её структуру входят водородный контур, системы подачи кислорода, водорода, азота и воды, контур охлаждающей жидкости, а также электрические цепи.

Модель данной подсистемы, созданная с использованием блоков библиотеки Simscape из пакета MATLAB Simulink, изображена на рис. 7. Система термостатирования обеспечивает поддержание оптимальной рабочей температуры топливного элемента на уровне 80 °С.

Выходная мощность блока топливных элементов зависит от напряжения и плотности тока, что описывается уравнением (5):

$$P_{fc} = V_{fc} \cdot N \cdot i_{fc} \cdot S, \quad (5)$$

где P_{fc} — выходная мощность блока топливных элементов, V_{fc} — напряжение монолитного топливного элемента, N — количество элементов, i_{fc} — плотность тока топливного элемента, а S — эффективная площадь элемента.

Подсистема «Блок управления»

В подсистеме «Блок управления» реализован минимальный набор функций для управления силовым агрегатом водородного транспортного средства в рамках подсистемы «Транспортное средство». Структура данной подсистемы представлена на рис. 8. Она включает в себя такие подсистемы, как управление энергопотреблением, управление рекуперативным торможением, регулирование крутящего момента двигателя, управление мощностью и управление системой батареи [5].

Подсистема

«Управление энергопотреблением»

Подсистема «Управление энергопотреблением» является компонентом ранее рассмотренной подсистемы «Блок управления» и отвечает за запрос мощности от топливного элемента на протонообменной мембране. Эта подсистема разработана с использованием блока Variant Subsystem, позволяющего включать несколько реализаций компонента в отдельную иерархию модели, что упрощает выбор одной из разработанных стратегий запроса мощности от водородной установки.

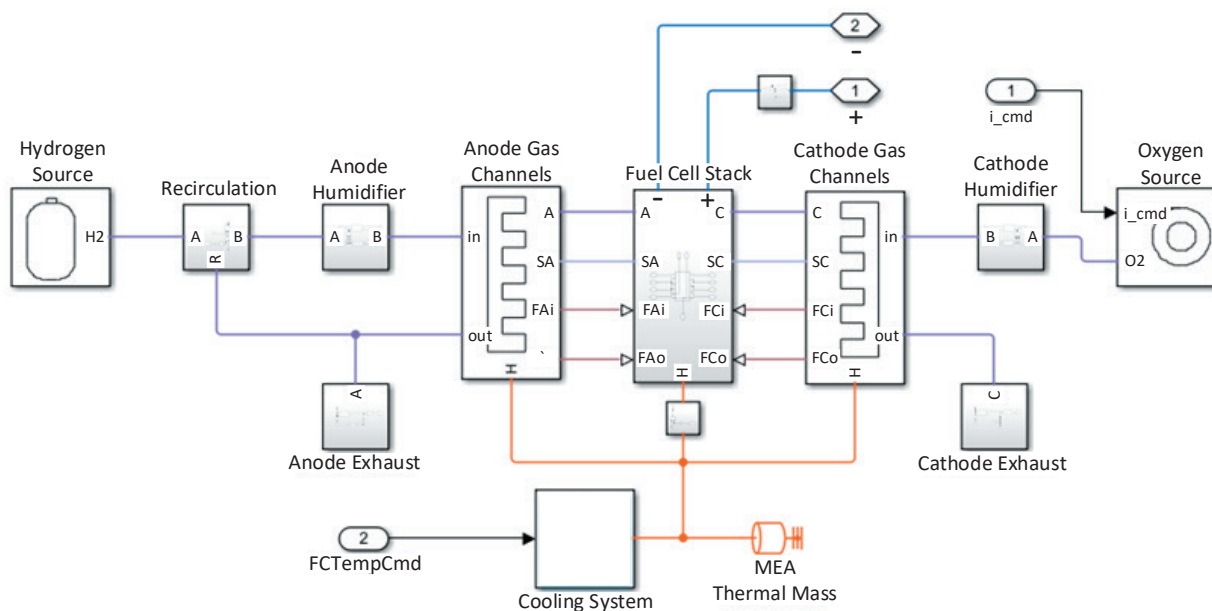


Рис. 7. Модель структуры топливной ячейки: Hydrogen source — источник водорода; Recirculation — рециркуляция; Anode Humidifier — увлажнитель анода; Anode Gas Channels — газопроводы анода; Fuel Cell Stack — топливный элемент (стек); Cathode Gas Channels — газопроводы катода; Cathode Humidifier — увлажнитель катода; Oxygen Source — источник кислорода; Anode Exhaust — выхлоп анода; Cathode Exhaust — выхлоп катода; FCTempCmd — заданная температура топливного элемента; Cooling System — система охлаждения; MEA Thermal Mass — тепловая масса МЭА (мембранно-электродного блока); A — анод; SA — площадь анода; FAi — входящий поток анодного газа; FAo — исходящий поток анодного газа; C — катод; SC — площадь катода; FCi — входящий поток катодного газа; FCo — исходящий поток катодного газа.

Fig. 7. Model of the fuel cell structure: FCTempCmd: Fuel Cell Target Temperature; MEA Thermal Mass: MEA (Membrane Electrode Assembly) Thermal Mass; A: Anode; SA: Anode Area; FAi: Anode Gas Inlet Flow; FAo: Anode Gas Outlet Flow; C: Cathode; SC: Cathode Area; FCi: Cathode Gas Inlet Flow; FCo: Cathode Gas Outlet Flow.

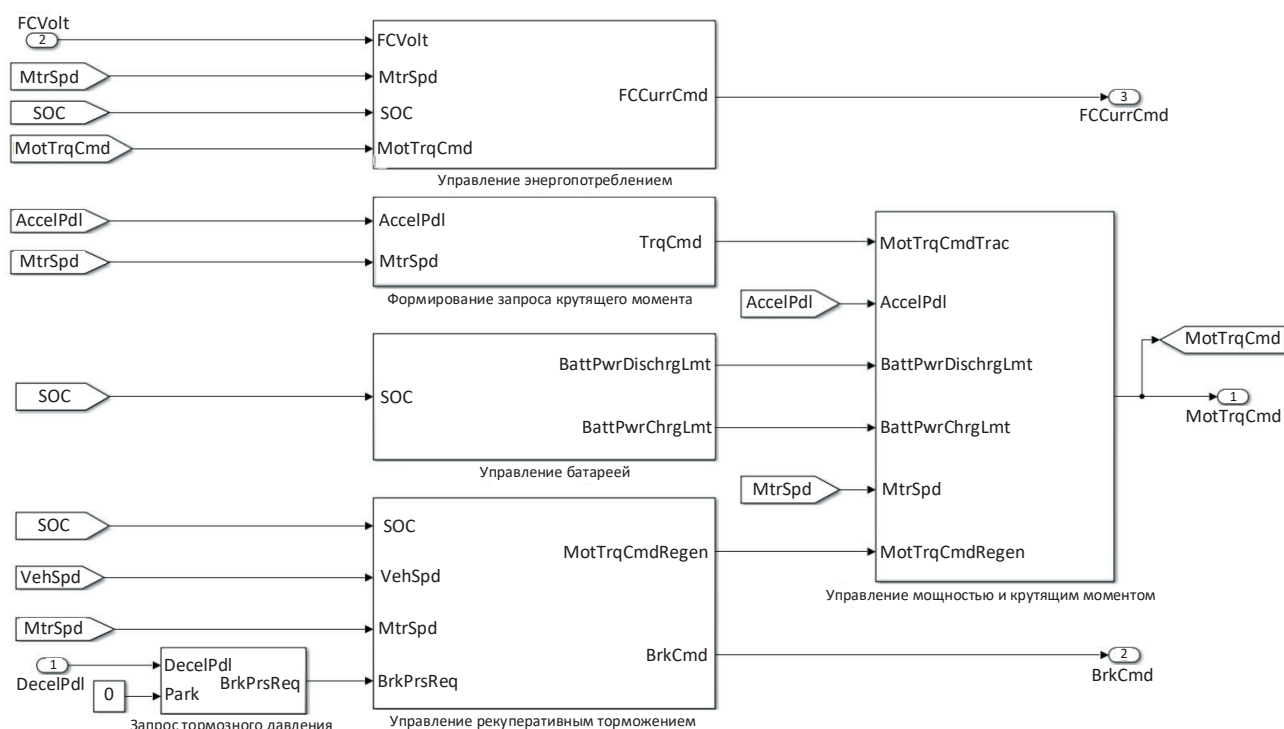


Рис. 8. Подсистема «Блок управления»: FCVolt — напряжение топливного элемента; MtrSpd — скорость двигателя (мотора); SOC — состояние заряда (аккумулятора); MotTrqCmd — команда крутящего момента двигателя (мотора); AccelPdl — положение педали акселератора; VehSpd — скорость транспортного средства; DecelPdl — положение педали замедления (торможения); BrkPrsReq — требуемое давление торможения; FCCurrCmd — команда тока топливного элемента (или контроллера топливного элемента); TrqCmd — команда крутящего момента (общая); BattPwrDischrgLmt — предел мощности разряда батареи (аккумулятора); BattPwrChrgLmt — предел мощности заряда батареи (аккумулятора); MotTrqCmdRegen — команда крутящего момента двигателя (мотора) рекуперативного торможения; BrkCmd — команда торможения; MotTrqCmdTrac — команда крутящего момента двигателя (мотора) для управления тягой.

Fig. 8. The "Control unit" subsystem: Управление энергопотреблением: Energy Power Control; Формирование запроса крутящего момента: Torque Request Generation; Управление батареями: Battery Control; Управление рекуперативным торможением - Regenerative Braking Control; Запрос тормозного давления: Brake Pressure Request; Управление мощностью и крутящим моментом: Power and Torque Control; FCVolt: Fuel Cell Voltage; MtrSpd: Motor Speed; SOC: State of Charge (of the battery); MotTrqCmd: Motor Torque Command; AccelPdl: Accelerator Pedal Position; VehSpd: Vehicle Velocity; DecelPdl: Deceleration Pedal Position (Brake Pedal Position); BrkPrsReq: Requested Brake Pressure; FCCurrCmd: Fuel Cell Current Command (or Fuel Cell Controller Command); TrqCmd: Torque Command (Overall); BattPwrDischrgLmt: Battery Power Discharge Limit; BattPwrChrgLmt: Battery Power Charge Limit; MotTrqCmdRegen: Motor Torque Command for Regenerative Braking; BrkCmd: Brake Command; MotTrqCmdTrac: Motor Torque Command for Traction Control.

Разработка алгоритма управления мощностью топливного элемента

При создании алгоритма управления энергопотреблением были определены основные функции и задачи для топливного элемента и тягового аккумулятора.

Функции, способствующие увеличению срока службы топливного элемента и снижению потребления водорода, включают:

- активацию топливного элемента в диапазоне высокой эффективности и в стабильном состоянии;
- деактивацию топливного элемента в условиях повышенного напряжения;
- реализацию оптимальной стратегии управления переходными процессами при изменении потребляемой мощности.

Функции, направленные на продление срока службы аккумулятора, заключаются в:

- управлении топливным элементом для достижения средней выходной мощности силового агрегата и обеспечения ограниченной динамической мощности аккумулятора;
- контроле уровня заряда батареи (SOC) и поддержании его в заданном оптимальном диапазоне с целью минимизации глубины разряда батареи (DOD), что является важным фактором для срока службы батареи.

Стратегия управления запросом мощности с помощью ПИД-регулятора

Создана стратегия запроса мощности для водородной топливной ячейки, которая реализована с применением пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора. Подсистема данной модели управления запросом мощности представлена на рис. 9.

На вход ПИД-регулятора подаётся ошибка ΔG , вычисленная на основе текущего уровня заряда

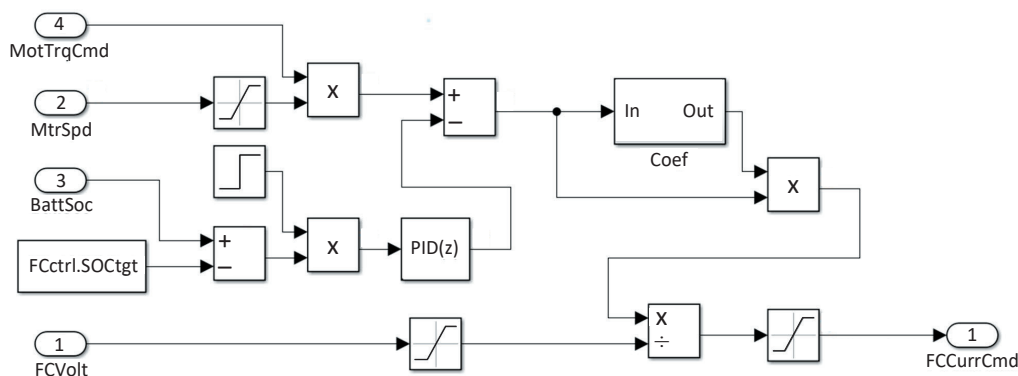


Рис. 9. Модель подсистемы запроса мощности с использованием ПИД регулятора: MotTrqCmd — команда крутящего момента двигателя; MtrSpd — скорость двигателя; BattSoc — состояние заряда батареи (SOC); FCVolt — напряжение топливного элемента; FCCurrCmd — команда тока топливного элемента; FCctrl.SOCtgt — целевое состояние заряда контроллера топливного элемента.

Fig. 9. Model of the power request subsystem using a PID controller: MotTrqCmd: Motor Torque Command; MtrSpd: Motor Speed; BattSoc: Battery State of Charge (SOC); FCVolt: Fuel Cell Voltage; FCCurrCmd: Fuel Cell Current Command; FCctrl.SOCtgt: SOC Target of the Fuel Cell Controller.

батареи (Battery Soc) и целевого уровня, установленного на постоянное значение (Target SOC = 60).

Формула ПИД-регулятора для дискретного времени представлена в уравнении 6.

$$C = \Delta G \cdot P + \Delta G \cdot I \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{\Delta G \cdot N}{1 + N \cdot T_s \cdot \frac{1}{z-1}}. \quad (6)$$

В данной формуле P , I и D обозначают весовые коэффициенты регулятора, N — коэффициент фильтрации, T_s — шаг интегрирования и расчёта модели.

ПИД-регулятор был настроен на основе анализа выходной регулируемой величины, полученной в ходе моделирования. В результате настройки были установлены следующие коэффициенты усиления:

$$P = 1; \quad I = 0,1; \quad D = 0,15. \quad (7)$$

На выходе подсистемы рассчитанная мощность делится на текущее рабочее напряжение топливного элемента

(FCVolt), что формирует запрос (FCCurrCmd) опорного тока в амперах для водородной установки. Для выходного сигнала заданы верхний (350 A) и нижний (0 A) пределы с использованием блока Saturation Dynamic в Simulink.

Стратегия управления запросом мощности с использованием машины состояний

Стратегия управления запросом мощности основывается на выборе режима работы топливной установки, который зависит от уровня заряда батареи, текущей нагрузки и состояния водородной установки. Рассмотрим два метода реализации: первый — с использованием Stateflow Chart, второй — через Simulink-блок MATLAB Function, в котором разработана управляющая функция на языке команд MATLAB.

На графике зависимости КПД топливной установки от её выходной мощности (рис. 10) выявлена зона низкой эффективности, которая наблюдается при мощности $P_{fc} < 5$ кВт. Кроме того, установлены оптимальные пределы работы, обеспечивающие максимальный КПД

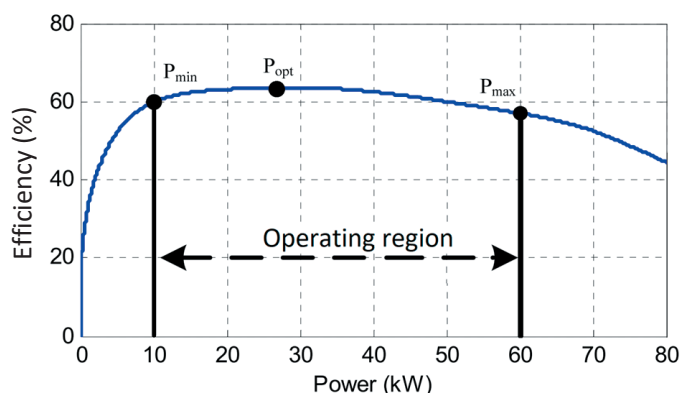


Рис. 10. График зависимости КПД и выходной мощности водородной установки при $SOC_{max} = 65\%$; $SOC_{min} = 55\%$: Efficiency (%) — КПД (%); Power (kW) — мощность (кВт); P_{min} — минимальная мощность; P_{max} — максимальная мощность; P_{opt} — оптимальная мощность.

Fig. 10. Graph of the dependence of the efficiency and output power of the hydrogen plant at $SOC_{max} = 65\%$; $SOC_{min} = 55\%$; P_{min} : minimum power; P_{max} : maximum power; P_{opt} : optimal power.

($\eta > 60\%$), в диапазоне выходной мощности от 10 до 50 кВт, при этом максимальный КПД составляет $\eta \approx 65\%$.

Определены значения оптимальной и максимальной выходной мощности топливного элемента: оптимальная мощность при КПД 60% составляет 25 кВт, а максимальная мощность — 60 кВт, что сохраняет эффективность водородной установки.

Для повышения эффективности алгоритмов управления мощностью топливной ячейки (FCS) введены ограничения на работу батареи:

- мощность заряда P_{bat_ch} и разряда P_{bat_dch} , составляющие 30% от ёмкости батареи;
- оптимальная мощность батареи P_{bat_opt} , равная 15% от её ёмкости;
- максимальные и минимальные значения уровня заряда, обозначенные как SOC_{max} и SOC_{min} соответственно, описаны в уравнении 3.

Заданы границы уровня заряда батареи, определяющие три режима работы системы:

- высокий уровень заряда ($SOC > SOC_{max}$);
- низкий уровень заряда ($SOC < SOC_{min}$);
- нормальный уровень заряда ($SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$).

Рассмотрены возможные состояния при высоком уровне заряда батареи ($SOC > SOC_{max}$), зависящие от рассчитанной нагрузки (P_{load}) (табл. 1).

Таблица 1. Состояние работы системы при высоком SOC

Table 1. System operating state at high SOC

Состояние	Мощность нагрузки	Запрашиваемая мощность от FCS
1	$P_{load} \leq P_{fc_min}$	$P_{fc} = 0$
2	$P_{load} \leq P_{fc_min} + P_{bat_dch}$	$P_{fc} = P_{fc_min}$
3	$P_{load} \leq P_{fc_max} + P_{bat_dch}$	$P_{fc} = P_{load} - P_{bat_dch}$
4	$P_{load} > P_{fc_max} + P_{bat_dch}$	$P_{fc} = P_{fc_max}$

Рассмотрим режим работы при нормальном ($SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$) уровне заряда батареи, который определяется в зависимости от нагрузки (P_{load}) (табл. 2).

Таблица 2. Состояние работы системы при нормальном SOC

Table 2. System operating state at normal SOC

Состояние	Мощность нагрузки	Запрашиваемая мощность от FCS
1	$P_{load} \leq P_{fc_min}$	$P_{fc} = 500 Bm$
2	$P_{load} \leq P_{fc_opt} - P_{bat_opt}$	$P_{fc} = P_{load}$
3	$P_{load} \leq P_{fc_opt} + P_{bat_opt}$	$P_{fc} = P_{fc_opt}$
4	$P_{load} \leq P_{fc_max}$	$P_{fc} = P_{load}$

Для режима работы при низком уровне заряда батареи ($SOC < SOC_{min}$), который определяется в зависимости от нагрузки (P_{load}), указаны условия в табл. 3.

Таблица 3. Состояние работы системы при низком SOC

Table 3. System operating status when battery at low SOC

Состояние	Мощность нагрузки	Запрашиваемая мощность от FCS
1	$P_{load} > P_{fc_max}$	$P_{fc} = P_{fc_max}$
2	$P_{load} \leq P_{fc_max} - P_{bat_ch}$	$P_{fc} = P_{load} - P_{bat_ch}$
3	$P_{load} > P_{fc_max} - P_{bat_ch}$	$P_{fc} = P_{fc_max}$

На основе описанных режимов работы разработана подсистема модели, реализующая стратегию запроса мощности от топливной ячейки с использованием машины состояний. В алгоритме применяется блок Stateflow Chart из пакета MATLAB Simulink, на рис. 11 представлена диаграмма состояний, созданная с помощью данного блока, которая иллюстрирует алгоритм функционирования в условиях высокого, нормального и низкого уровней заряда.

Также была разработана модель с использованием блока MATLAB Function, которая реализует алгоритм запроса мощности с заранее определёнными состояниями работы системы на языке MATLAB. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 12.

Стратегия управления запросом мощности с использованием алгоритма ECMS

Стратегия управления запросом мощности основана на использовании алгоритма эквивалентной минимизации потребления (ECMS). Модель запроса мощности от топливной ячейки, реализованная при помощи данной стратегии, позволяет регулировать запрос мощности, учитывая такие параметры, как запрашиваемая нагрузка, мощность, уровень заряда батареи (SOC).

Стратегия заключается в непрямо́й оптимизации распределения нагрузки между топливным элементом и батареей. При этом минимизируется мгновенное потребление водорода топливным элементом (FCS) и потребление энергии от источников питания.

Функция общего потребления водорода для данной системы представлена в уравнении (8). Общее потребление рассчитывается как сумма расхода водорода топливной ячейкой и потребления энергии системой батареи, которая отвечает за поддержание заряда аккумулятора.

$$m_{H_2} = m_{fc}(P_{fc}(t)) + SOC_{cost} \cdot m_{bat}(P_{bat}(t)), \quad (8)$$

где m_{H_2} — скорость потока, определяющая общий расход водорода (грамм в секунду, г/с); m_{fc} — мгновенное количество потребляемого водородного топлива, зависящее от нагрузки на топливном элементе; m_{bat} — эквивалентный расход водорода, связанный с запасаемой энергией батареи; SOC_{cost} — функция, рассчитывающая ошибку на основе изменения уровня заряда батареи.

Далее устанавливается целевая функция расхода S , которую необходимо минимизировать. Эта функция

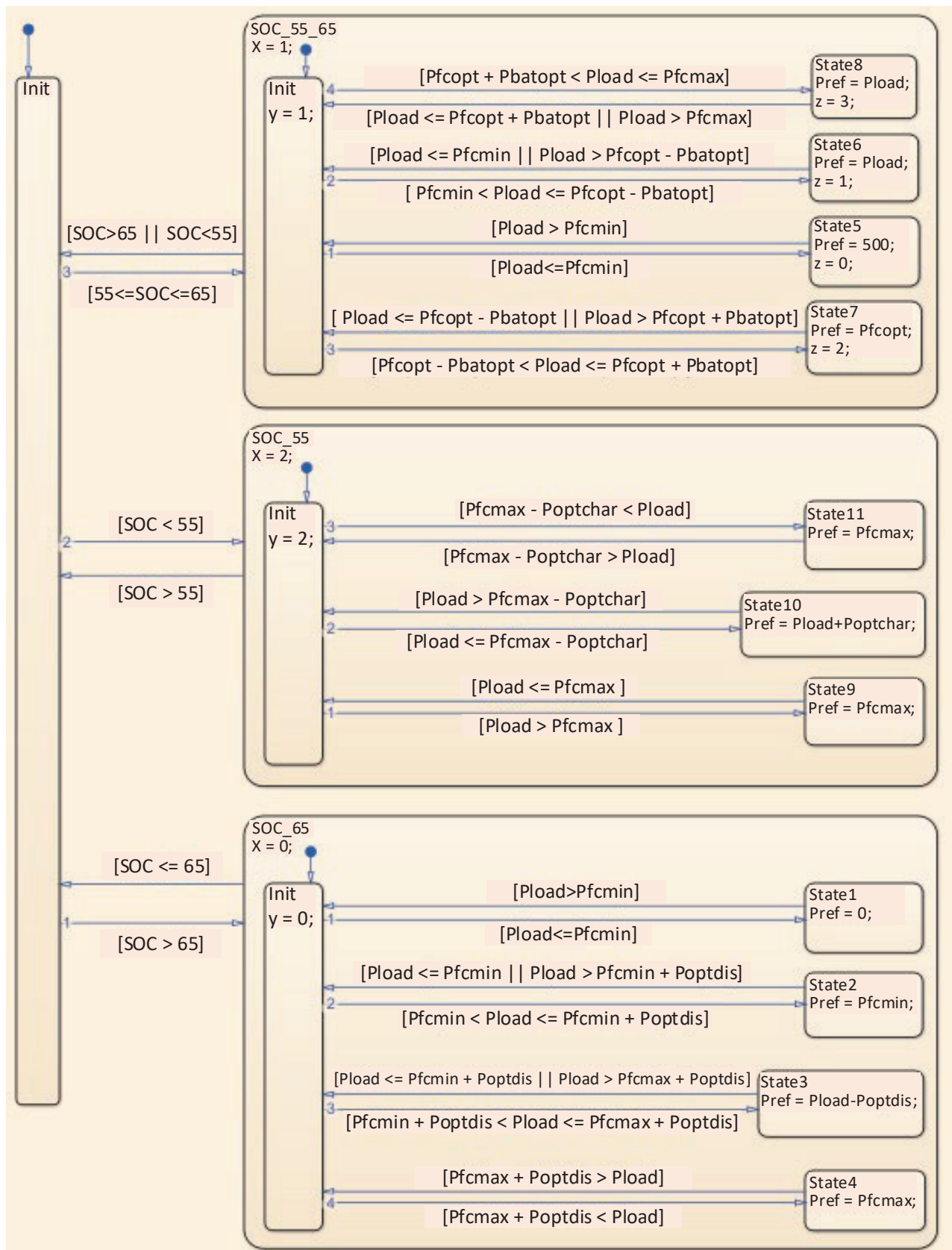


Рис. 11. Диаграмма состояний с использованием машины состояний: Battery — аккумулятор; SOC — заряд; Pfcopt — оптимальная мощность заряда; Pbatopt — оптимальная мощность батареи; Pload — мощность нагрузки; Pfcmax — максимальная мощность заряда; Pref — эталонная мощность; Pfcmin — минимальная мощность заряда; Poptchar — оптимальная мощность заряда; Poptdis — оптимальная мощность разряда.

Fig. 11. State diagram using a state machine: SOC: State of Charge; Pfcopt: Optimal Charging Power; Pbatopt: Optimal Battery Power; Pload: Load Power; Pfcmax: Maximum Charging Power; Pref: Reference Power; Pfcmin: Minimum Charging Power; Poptchar: Optimal Charging Power; Poptdis: Optimal Discharging Power.

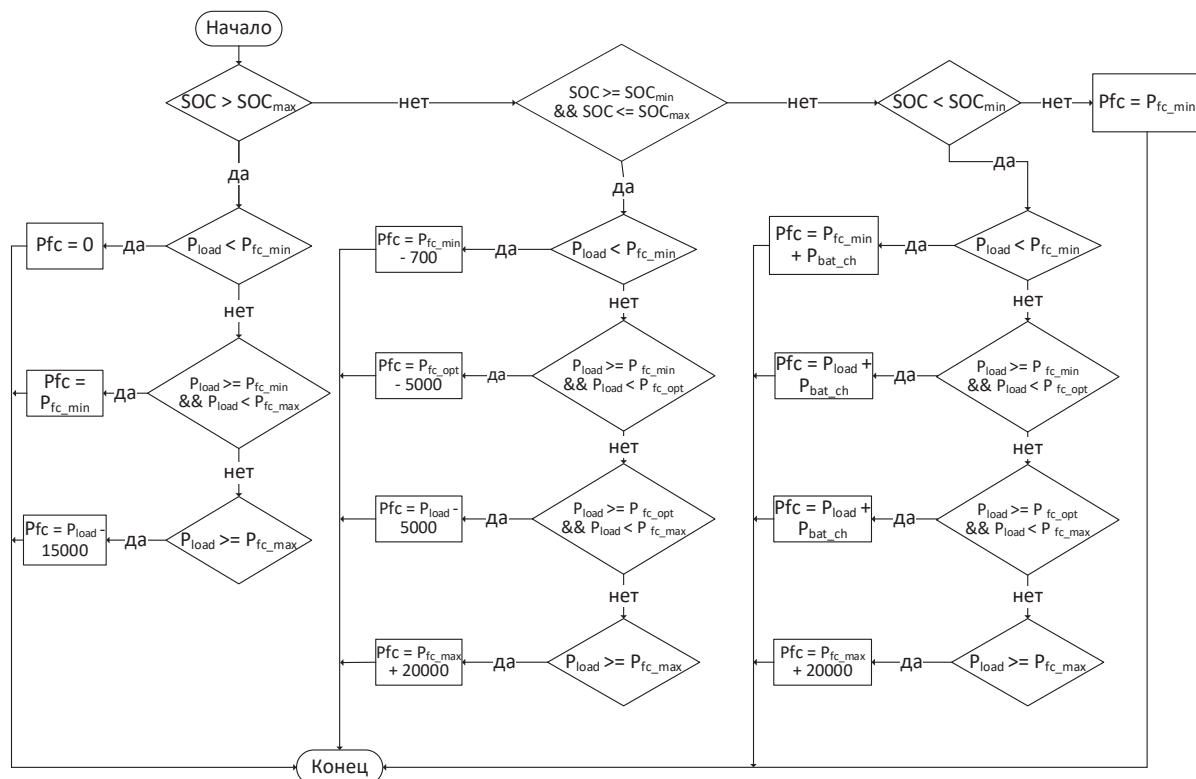


Рис. 12. Блок-схема алгоритма запроса мощности с заранее определёнными состояниями работы системы: SOC — заряд; SOCmax — максимальный заряд; SOCmin — минимальный заряд; Pfcopt — оптимальная мощность заряда; Pload — мощность нагрузки; Pfcmax — максимальная мощность заряда; Pfcmin — минимальная мощность заряда; Pbat_ch — мощность заряда.

Fig. 12. Block diagram of the power request algorithm with predetermined system operating states: SOC: State of Charge; SOCmax: Maximum State of Charge; SOCmin: Minimum State of Charge; Pfcopt: Optimal Charging Power; Pload: Load Power; Pfcmax: Maximum Charging Power; Pfcmin: Minimum Charging Power; Pbat_ch: Battery Charging Power.

учитывает общий расход водорода системой и описана в уравнении (9):

$$S(P_{bat}, P_{fc}) = \min(m_{H_2}(t)). \quad (9)$$

Также установлены ограничения для параметров системы (10).

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \\ P_{fc_{\min}} < P_{fc} < P_{fc_{\max}} \\ P_{bat_{\min}} < P_{bat} < P_{bat_{\max}} \\ P_{fc} = P_{load} + P_{bat} \end{cases} \quad (10)$$

Целевая функция $S(P_{bat}, P_{fc})$ в модели минимизируется с использованием функции « f_{mincon} » из пакета MATLAB Simulink. Этот метод применяет градиент для решения задач, где целевые функции и функции ограничений являются непрерывными и имеют непрерывные первые производные. В модели Simulink данная функция получена в виде уравнения (11):

$$x = f_{mincon}(fun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, nonlcon, options). \quad (11)$$

Для нахождения минимального значения в функции используется алгоритм последовательного решения задач квадратичного программирования. При выполнении минимизации необходимо учитывать ограничения, указанные в уравнении 12:

$$\begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ A \times x \leq b \\ Aeq \times x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \quad (12)$$

В данной системе уравнений x представляет собой вектор выходных параметров функции $[P_{bat}, P_{fc}]$. Верхние и нижние границы выходных параметров, мощности топливной ячейки и батареи обозначены как lb и ub :

$$lb = [P_{fc_{\min}}, 0, -P_{bat_{\max}}], \quad (13)$$

$$ub = [P_{fc_{\max}}, 100, P_{bat_{\max}}]. \quad (14)$$

Матрица Aeq и вектор beq отражают заданные ограничения равенства. При этом мощность, необходимая для электродвигателя, должна составлять сумму мощностей топливного элемента и батареи.

$$Aeq = [010; 101], \quad (15)$$

$$beq = [P_{fc}]. \quad (16)$$

Остальные граничные условия функции не используются. Подсистема, отвечающая за запрос мощности от топливной ячейки с применением функции минимизации эквивалентного потребления, была реализована в MATLAB Simulink (рис. 13).

Стратегия управления запросом мощности с использованием нечёткой логики

Рассмотрим алгоритм запроса мощности от топливной установки, использующий нечёткую логику (*FLR*), разработанный с помощью инструмента Fuzzy Logic Designer, входящего в состав MATLAB [3, 14].

Контроллер нечёткой логики имеет две входные переменные: уровень заряда батареи (*SOC*), который варьируется от 0 до 1, где 1 соответствует 100%, и мощность нагрузки, нормализованная в диапазоне от -1 до 1 для упрощения формулировки правил нечёткой логики. Выходной переменной является запрашиваемая мощность топливного элемента (P_{fc}).

Для описания входной переменной, отражающей потребляемую мощность нагрузки, используются функции принадлежности нечёткого множества (рис. 14), такие как:

- NH — сильно отрицательная;
- NM — средне отрицательная;
- NL — слабо отрицательная;
- Z — нулевая;
- PL — слабо положительная;
- PM — средне положительная;
- PH — сильно положительная.

Переменная *SOC*, изображённая на графике неоднородных функций принадлежности для уровня заряда батареи (рис. 15), также делится на следующие функции принадлежности:

- VL — очень низкий;
- L — низкий;
- M — средний;
- H — высокий;
- VH — очень высокий.

Для выходной переменной P_{fc} (запрашиваемая мощность от *FCS*) были установлены следующие функции принадлежности:

- Min — минимальная;
- OL — ниже среднего;
- OPT — средняя;
- OH — выше среднего;
- Max — максимальная.

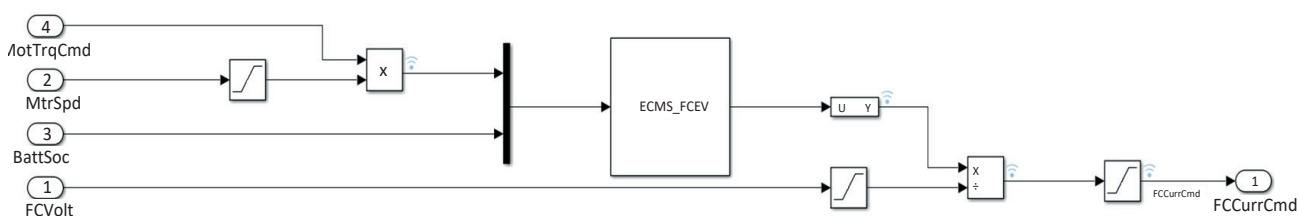


Рис. 13. Модель запроса мощности при реализации стратегии ECMS: MotTrqCmd — команда крутящего момента двигателя; MtrSpd — скорость двигателя; BattSoc — заряд батареи (*SOC* — State of Charge); FCVolt — напряжение ячейки; FCCurrCmd — команда тока топливного элемента.

Fig. 13. Model of power request when implementing the ECMS strategy: MotTrqCmd: Motor Torque Command; MtrSpd: Motor Speed; BattSoc: Battery State of Charge (*SOC*); FCVolt: Fuel Cell Voltage; FCCurrCmd: Fuel Cell Current Command.

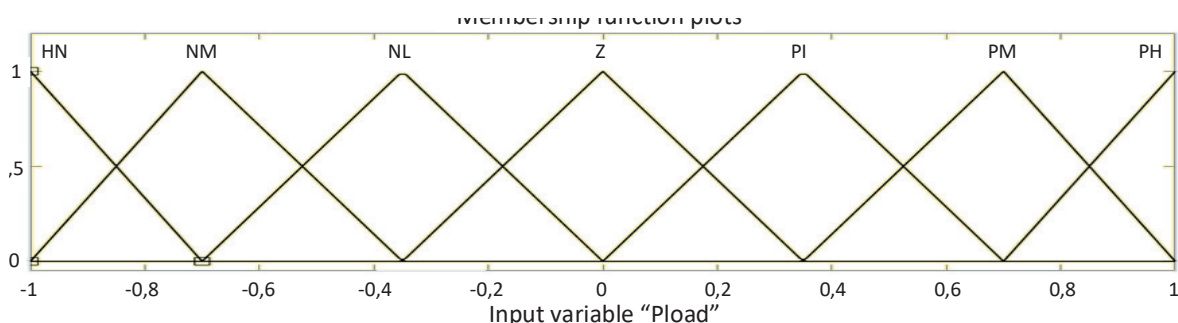


Рис. 14. График функций принадлежности Pload.

Fig. 14. The Pload membership function plot: Membership functions of a fuzzy set: NH: Negative High; NM: Negative Medium; NL: Negative Low; Z: Zero; PL: Positive Low; PM: Positive Medium; PH: Positive High.

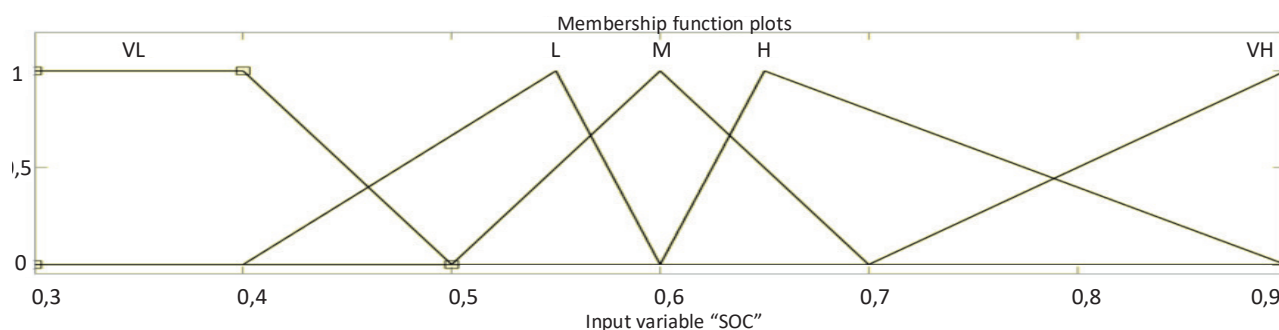


Рис. 15 График функций принадлежности SOC.

Fig. 15. The SOC membership function plot: VL: Very Low; L: Low; M: Medium; H: High; VH: Very High.

График неоднородных функций принадлежности для запрашиваемой мощности от водородной топливной установки представлен на рис. 16.

После определения функций принадлежности был проведён анализ аналогичных исследований, в которых для управления мощностью FC также использовалась логика на основе нечётких правил. На основе этого анализа были сформулированы нечёткие правила, адаптированные к характеристикам FCEV, для которого разрабатывается система управления. Правила зависимости функций принадлежности выходной мощности от входных параметров представлены в табл. 4.

График эффективности нормализованной мощности топливной установки в зависимости от уровня заряда батареи (SOC) и мощности нагрузки представлен на рис. 17.

Таблица 4. Нечёткие правила зависимости функций принадлежности выходной мощности от входных параметров

Table 4. Fuzzy rules for the dependence of membership functions of output power on input parameters

P_{fc}		Мощность нагрузки						
		NH	NM	NL	Z	PL	PM	PH
Уровень заряда батареи	VL	Min	Min	Min	OL	OPT	Max	Max
	L	Min	Min	Min	OL	OPT	OH	Max
	M	Min	Min	Min	Min	OL	OH	Max
	H	Min	Min	Min	Min	OL	OPT	OH
	VH	Min	Min	Min	Min	Min	OPT	OH

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате реализации предложенных стратегий управления запросом мощности от водородного топливного элемента транспортного средства и проведения имитационного моделирования с использованием каждой из стратегий были получены вычисленные параметры работы системы управления, включающей водородный топливный элемент. Для оценки алгоритма в качестве входных данных модели использовался вектор скорости, сформированный на основе стандартизированного ездового цикла *WLTC*.

На рис. 18 представлена расчётная зависимость изменения уровня заряда батареи (SOC) в течение заданного времени моделирования при применении различных стратегий управления запросом мощности. Как видно из графиков, стратегии, основанные на использовании машины состояний и разработанные с применением Simulink Stateflow Chart и MATLAB Function, показали неудовлетворительные результаты. При их применении было зафиксировано наибольшее отклонение кривой SOC от начального значения уровня заряда батареи, а также выход SOC за допустимые границы моделирования, что обозначено на рис. 18 красными прямыми линиями. После дальнейшего анализа было принято решение не рассматривать стратегии, основанные на использовании машины состояний, из-за выхода SOC за заданные пределы.

На рис. 19 показана расчётная зависимость изменения уровня заряда батареи (SOC) в течение

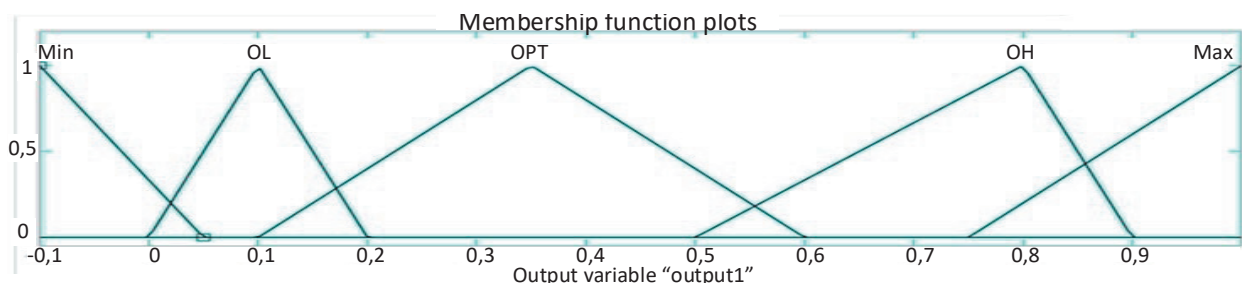


Рис. 16. График функций принадлежности P_{fc} .

Fig. 16. The P_{fc} membership function plot: Min: Minimum; OL: Below Average; OPT: Average; OH: Above Average; Max: Maximum.

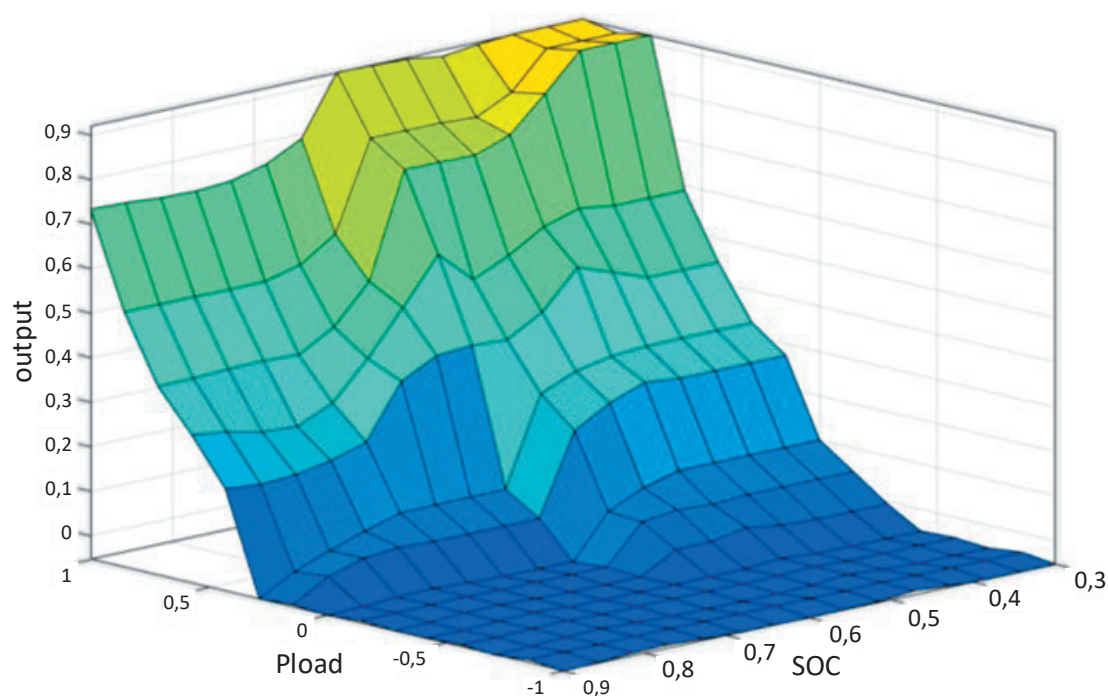


Рис. 17. График мощности водородной установки в зависимости от нагрузки и *SOC*: Output — выходная мощность; Pload — мощность нагрузки; *SOC* — заряд батареи.

Fig. 17. Graph of the power efficiency of the hydrogen plant depending on the load and *SOC*: Output: Output power; Pload: Load Power; *SOC*: State of Charge.

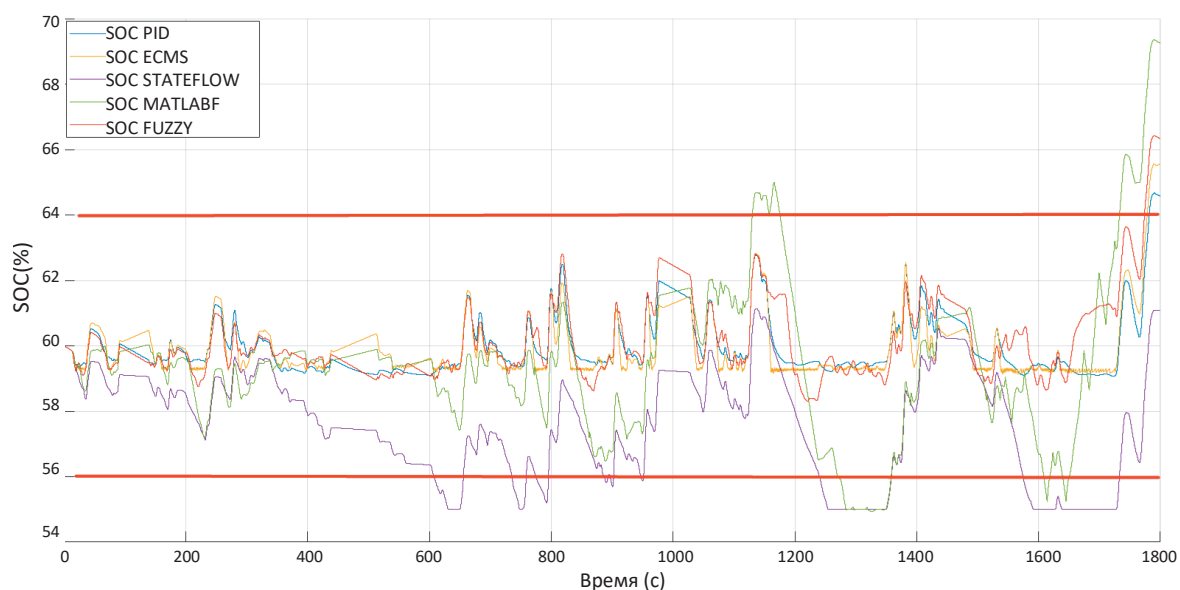


Рис. 18. График значений *SOC* при различных стратегиях: PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; STATEFLOW — стратегия с использованием машины состояний; MATLABF — стратегия с использованием машины состояний; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 18. Graph of *SOC* values for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; STATEFLOW: Strategy using a state machine; MATLABF: Strategy using a state machine; FUZZY: Fuzzy logic strategy.

заданного интервала времени моделирования с 450 по 850 секунду.

На данном рисунке выделена область, где график *SOC* при применении стратегии ECMS демонстрирует резкие пилообразные колебания в отличие от двух других

графиков. Хотя значения заряда батареи остаются в достаточно узких пределах, такая динамика *SOC* негативно сказывается на работе топливного элемента, поскольку зарядный и разрядный токи батареи также будут испытывать нестабильность.

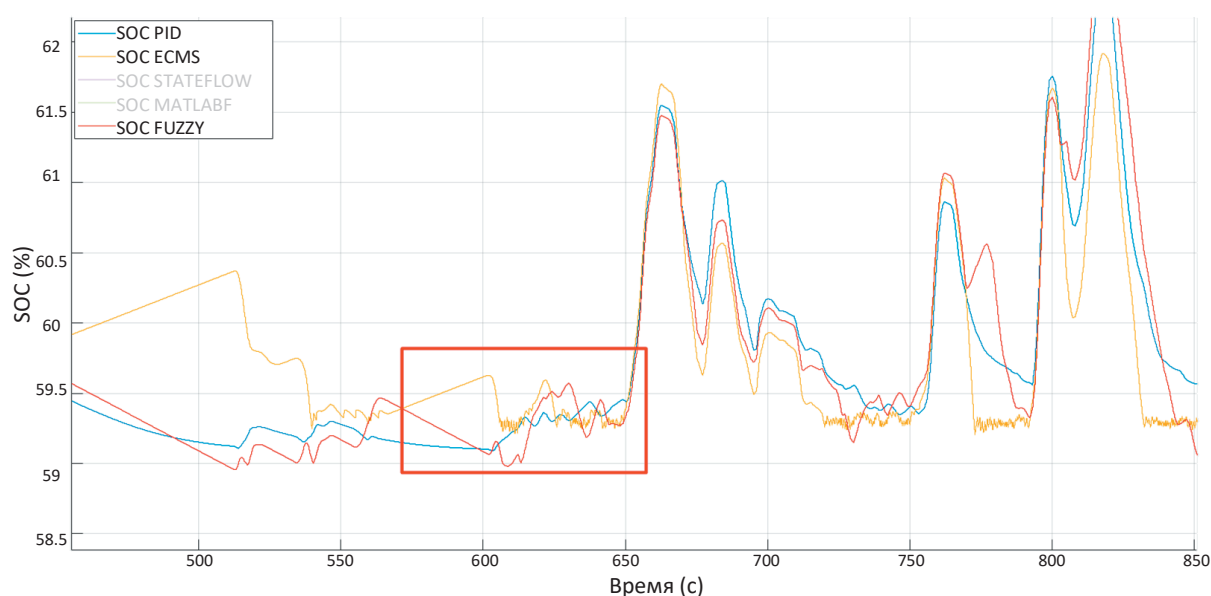


Рис. 19. График значений SOC с 450 по 850 секунду; PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 19. The SOC values graph from 450 to 850 seconds: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy.

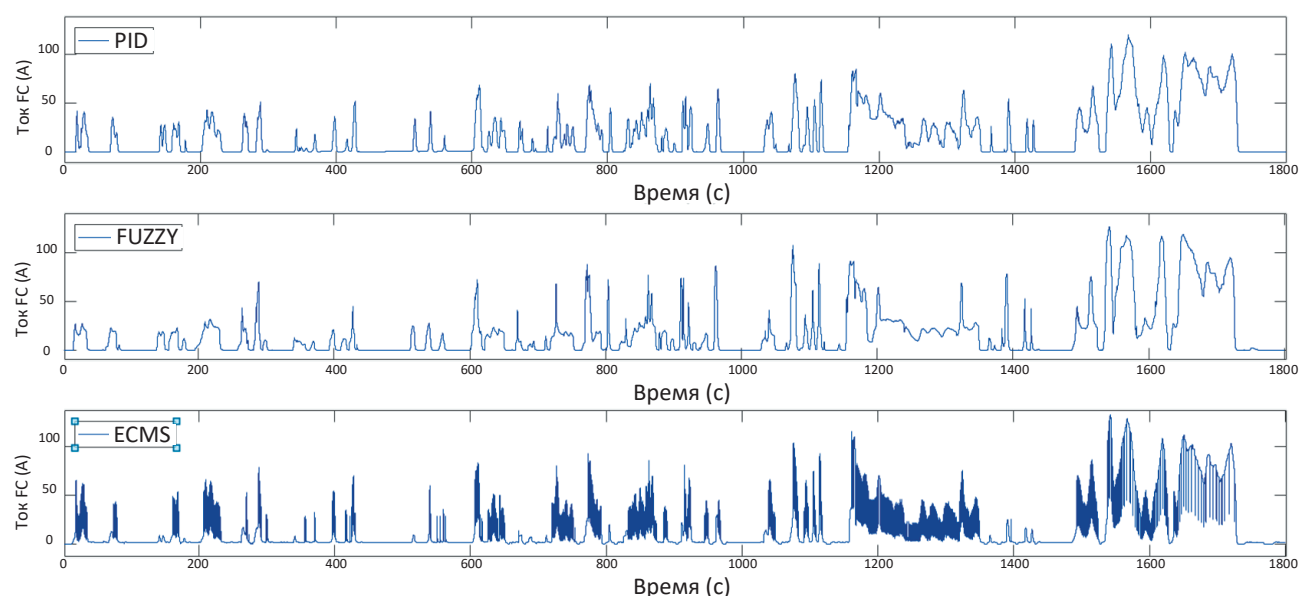


Рис. 20. Графики тока FC при различных стратегиях: PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 20. The FC current graphs for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy; Ток FC (A): Current (A); Время (с): time (s).

Сравнение опорных токов топливного элемента (рис. 20) было проведено в течение заданного времени моделирования с использованием различных стратегий управления запросом мощности.

На рис. 21 представлены графики, которые демонстрируют, что при применении стратегии эквивалентной минимизации потребления опорный ток топливного элемента проявляет нестабильность и характеризуется значительным количеством резких колебаний.

На рис. 22 показана область, где происходят наибольшие колебания кривых опорных токов топливного элемента в течение заданного времени моделирования. Такое поведение не соответствует целям по увеличению срока службы тягового аккумулятора и топливного элемента (FC — fuel cell), которые были установлены на этапе разработки алгоритма управления мощностью топливного элемента. Хотя интегральная составляющая тока топливного элемента находится в пределах запрашиваемого

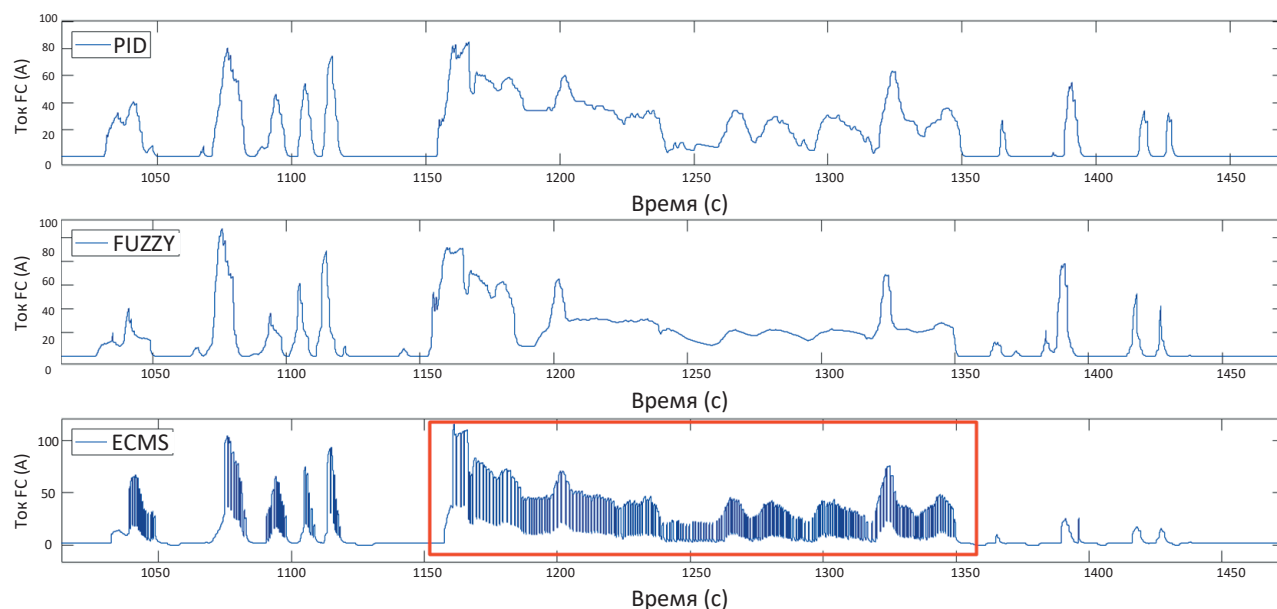


Рис. 21. Увеличенный графики тока FC при различных стратегиях: PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 21. Zoomed graphs of the FC current for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy; Ток FC (A): Current (A); Время (с): Time (s).

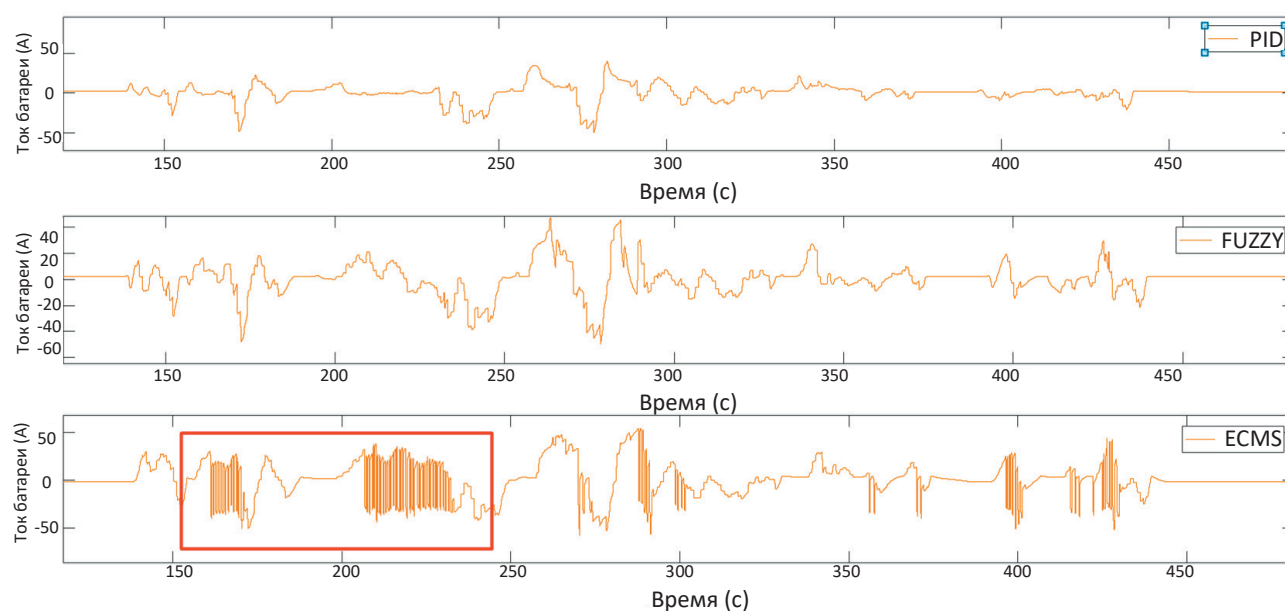


Рис. 22. График значения тока батареи при различных стратегиях: PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 22. Graph of the battery current value for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy; Ток батареи (A): Current (A); Время (с): Time (s).

значения, характер импульсного заряда не отвечает поставленным задачам, и подобный метод заряда не может быть использован.

Получены графики взаимосвязи зарядного и разрядного тока батареи при различных стратегиях управления мощностью топливного элемента, которые можно видеть на рис. 23.

Из представленных графиков видно, что при применении стратегии ECMS ток топливной ячейки демонстрирует значительные колебания. Область графика, обведённая прямоугольником, выделяет участки, где эти колебания наиболее выражены. Данная характеристика тока негативно сказывается на сроке службы батареи и требует более сглаженного профиля кривой заряда и разряда.

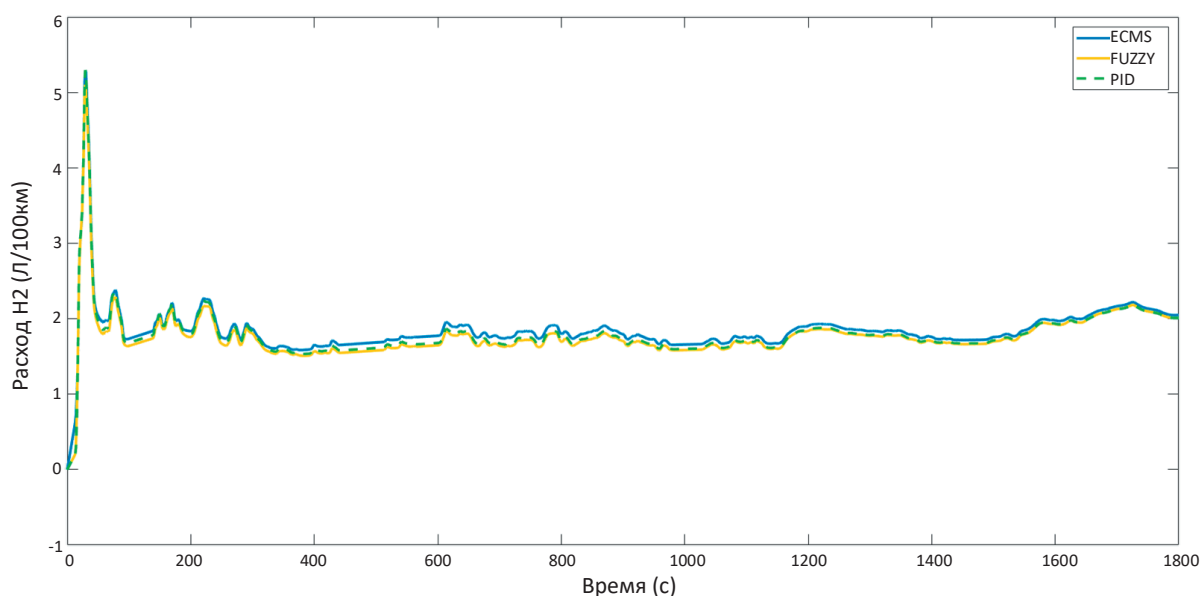


Рис. 23. График расхода H_2 при различных стратегиях: PID — стратегия с использованием ПИД регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 23. Graph of the H_2 consumption for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy; Расход H_2 (л/100км): H_2 Consumption (l/100km), Время (с): Time (s).

В процессе выполнения сравнительного численного анализа расчётных значений расхода водорода топливным элементом в условиях реализации запроса мощности при использовании стратегий управления ECMS, Fuzzy и PID в рамках выбранного ездового цикла были получены зависимости расхода водорода. График, сравнивающий расход H_2 , представлен на рис. 24. Анализируя график, можно заметить, что отклонение в потреблении водорода при выбранных стратегиях управления мощностью

составляет менее 0,1 л/100 км, что требует более детального изучения для более точной оценки.

При анализе кривых расхода водорода H_2 в увеличенном масштабе на рис. 24 наблюдается, что стратегии управления мощностью топливного элемента приводят к различиям в расходе в пределах от 0,05 до 0,2 л/100 км. График демонстрирует, что использование контроллера на основе нечёткой логики обеспечивает наименьший расход водорода по сравнению с двумя другими

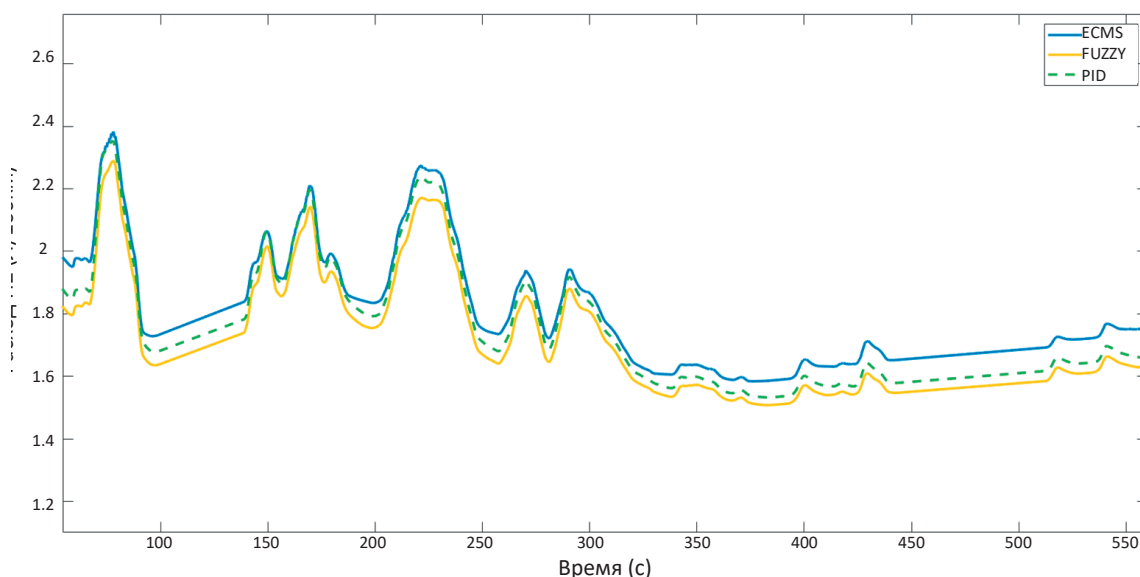


Рис. 24. График расхода H_2 при различных стратегиях в крупном масштабе: PID — стратегия с использованием ПИД-регулятора; ECMS — стратегия с использованием алгоритма ECMS; FUZZY — стратегия с использованием нечёткой логики.

Fig. 24. Zoomed graph of the H_2 consumption for different strategies: PID: Strategy using the PID controller; ECMS: Strategy using the ECMS algorithm; FUZZY: Fuzzy logic strategy; Расход H_2 (л/100км): H_2 Consumption (l/100km); Время (с): Time (s).

стратегиями, основанными на работе ПИД-регулятора и ECMS.

Анализ показал, что стратегия, основанная на использовании машины состояний, не обеспечивает требуемый уровень заряда аккумулятора *SOC*. В то же время стратегия, использующая алгоритм эквивалентной минимизации потребления, приводит к неудовлетворительному управляющему току топливной ячейки FC. В то же время сравнительный анализ расхода водорода показал, что стратегии управления позволяют добиться различий в потреблении в пределах 0,05–0,2 л/100 км, причём использование нечёткой логики обеспечивает наименьший расход по сравнению с ПИД-регулятором и ECMS.

Таким образом, численное моделирование подтвердило, что разработанная имитационная модель водородного транспортного средства позволяет оценивать применяемые стратегии управления мощностью. При этом стратегия управления с использованием контроллера нечёткой логики является более эффективной для управления запросом мощности, чем другие предложенные методы. Результаты моделирования уровня заряда батареи (*SOC*) с использованием различных стратегий управления показали, что подходы на основе машины состояний неэффективны, так как приводят к значительным отклонениям *SOC* за допустимые пределы. Стратегия ECMS также продемонстрировала резкие колебания *SOC*, что негативно сказывается на работе топливного элемента.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.В. Дебелов — формулирование целей, задач исследования, научное руководство, формулирование основных направлений исследования, планирование исследований, редактирование статьи, участие в обсуждении материалов статьи; Е.И. Рахматуллин — проведение исследований и экспериментов, обработка результатов исследования, подготовка и написание текста статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Исследование и подготовка публикации проведены в рамках опытно-конструкторских работ и поисковых исследований в рамках НТЗ.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими

лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы использовали фрагменты ранее опубликованных собственных сведений (текст, иллюстрации, данные), отмеченные ссылками на источники в списке литературы.

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: V.V. Debelov: formulation of research goals, objectives, scientific guidance, formulation of the main directions of research, research planning, editing of the manuscript, participation in the discussion of the materials of the manuscript; E.I. Rakhmatullin: conducting research and experiments, processing research results, preparing and writing the text of the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: The research and preparation of the paper were carried out as a part of experimental design and exploratory research within the framework of the technological advance.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Bethoux O. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles and Their Infrastructure: An Option towards an Environmentally Friendly Energy Transition. *Energies*. 2020(13):6132. doi: 10.3390/en13226132
2. Tran D-D, Vafaeipour M, El Baghdadi M, et al. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 119(80). doi: 10.1016/j.rser.2019.109596
3. Trinh H-A, Truong, H-V-A, Ahn K-K. Energy management strategy for fuel cell hybrid power system using fuzzy logic and frequency decoupling methods. *24th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)*. Singapore; 2021:1–6. doi: 10.1109/ICMT53429.2021.9687291
4. Yao G, Du C, Ge Q, et al. Traffic-Condition-Prediction-Based HMA-FIS Energy-Management Strategy for Fuel-Cell Electric Vehicles. *Energies*. 2019;12(23):4426. doi: 10.3390/en12234426

5. Zhang P, Wu X, Du C, et al. Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Heavy-Duty Truck Based on Driving Condition Recognition and Parameter Optimization. *Energies*. 2020;13(20):5407. doi:10.3390/en13205407
6. Zavatsky AM, Debelov VV, Malyshev AN, Keller AV. Mathematical model of the algorithm for distributing torque along the axles of an electric vehicle with a two-motor scheme. *Bulletin of MGTU MAMI*. 2023;17(2):187–194. doi: 10.17816/2074-0530-123092 (In Russ.).
7. Mizin MD, Malyshev AN, Zavatsky AM, Debelov VV. Development of a simulation model for testing the torque distribution function along the axles of an electric vehicle with a two-motor scheme. *Bulletin of MGTU MAMI*. 2023;17(3):295–304. doi: 10.17816/2074-0530-321934 (In Russ.).
8. Malyshev AN, Debelov VV, Endachev DV, et al. Mathematical and simulation model for testing the management system of high voltage batteries for hybrid and electric vehicles. *AIP Conference Proceedings*. Moscow, April 01–02, 2020. Moscow; 2022:020010. doi: 10.1063/5.0074952
9. Malyshev AN, Panarin AN, Debelov VV, Mizin MD. Simulation and physical modeling of synchronous electric drive for electric and hybrid vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*. Novorossiysk, Virtual, June 15–16, 2021. Novorossiysk, Virtual; 2021:012050. doi: 10.1088/1742-6596/2061/1/012050
10. Malyshev AN, Debelov VV, Kozlovsky VN, Stroganov VI. Analysis and prospects for the development of design and production processes of hybrid vehicles. *AutoGasFilling Complex + Alternative Fuel*. 2021;20(2):82–89. (In Russ.)
11. Yakunov DM, Debelov VV, Kozlovsky VN, Brachunova UV. Trends in scientific and technical development of lithiumion batteries in motor transport. *Truck*. 2021(11):3–7. doi: 10.36652/1684-1298-2021-11-3-7 (In Russ.).
12. Yakunov DM, Debelov VV, Kozlovsky VN, Zayatrov AV. Actual problems and directions of development of electrical energy storage devices in cars with electrical technologies. *Truck*. 2021(12):3–7. (In Russ.).
13. Malyshev AN, Debelov VV, Kozlovsky VN. Development of the concept of a complex for simulation and physical modeling of a hybrid power plant of a vehicle. *Truck*. 2020(11):3–13. doi: 10.36652/1684-1298-2020-11-3-13 (In Russ.).
14. Skripko LA. On the issue of developing a fuzzy logic controller for a hybrid hydrogen car. *Works of NAMI*. 2021(2):87–92. doi: 10.51187/0135-3152-2021-2-87-92 (In Russ.).
15. Toyota Mirai. [Electronic resource]. Wikipedia: [site]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai (access date: 03/29/2024).

ОБ АВТОРАХ

* Дебелов Владимир Валентинович,

канд. техн. наук, доцент,
начальник отдела технологии программного обеспечения
центра программного обеспечения;
адрес: Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, д. 2;
ORCID: 0000-0001-6050-0419;
eLibrary SPIN: 8701-7410;
e-mail: vladimir.debelov@nami.ru

Рахматуллин Евгений Игоревич,

инженер Центра программного обеспечения Сектора
калибровочных работ гибридных транспортных средств;
ORCID: 0009-0006-5651-4176;
e-mail: evgenii.rahmatullin@nami.ru

AUTHORS' INFO

* Vladimir V. Debelov,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor,
Head of the Software Technology Department
at the Software Center;
address: 2 Avtomotornaya st, Moscow, Russia, 125438;
ORCID: 0000-0001-6050-0419;
eLibrary SPIN: 8701-7410;
e-mail: vladimir.debelov@nami.ru

Evgeny I. Rakhmatullin,

Engineer of the Software Center at the Hybrid Vehicle
Calibration Sector;
ORCID: 0009-0006-5651-4176;
e-mail: evgenii.rahmatullin@nami.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author