

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГИЕЙ, ОСНОВАННЫХ НА ПРАВИЛАХ В КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Карабаджак И.Д.

Петербургский государственный университет путей сообщения, г. Санкт-Петербург,
Россия

iwan.karabajack@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в моделировании и исследовании работы стратегий управления потоками энергии, основанных на правилах, применительно для комбинированной электроэнергетической установки с аккумуляторной батареей и батареей топливных элементов. ЦЕЛЬ работы: рассмотреть проблемы повышения энергоэффективности, экономичности и долговечности источников в комбинированных энергоустановках при помощи стратегий управления, разработать имитационную модель гибридной системы двумя источниками энергии, провести расчёт модели управляемой четырьмя стратегиями основанных на правилах. РЕЗУЛЬТАТЫ. При решении поставленных задач были разработаны модели и алгоритмы в программном комплексе MatLab. В статье описана актуальность темы, рассмотрены стратегии управления потоками энергии и особенности их работы. Проведено моделирование работы гибридной энергоустановки с различными стратегиями управления, рассмотрена возможность обеспечить работу энергоустановки в заданном диапазоне нагрузки с требуемыми условиями. Представлены результаты моделирования работы в виде общей эффективности и экономичности работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Все исследованные стратегии обеспечивают работу энергоустановки во всём диапазоне нагрузки с высокой эффективностью. Наиболее эффективной стратегией является стратегия состояний, так как на представленном цикле нагрузки стратегия обеспечивает максимальный КПД 95,43%. Самой экономичной стратегией, при которой расход водорода и воздуха минимален (452,3 и 1076,5 л) – стратегия, основанная на алгоритмах нечёткой логики.

Ключевые слова: энергоустановка; батарея топливных элементов; стратегия управления энергией.

Для цитирования: Карабаджак И.Д. Исследование работы стратегий управления энергией, основанных на правилах в комбинированных энергоустановках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 53-66. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-53-66.

RESEARCH OF RULE-BASED ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID POWERTRAINS

Karabadzhak I.D.

Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Peterburg, Russia

iwan.karabajack@yandex.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in modeling and studying the operation of energy management systems based on rule-based strategies as applied to a hybrid electric powertrain with a battery and a fuel cell stack. THE PURPOSE of the work: to consider the problems of increasing energy efficiency, cost-effectiveness and durability of power sources in a hybrid electric powertrain using energy control strategies, to design a simulation model of a hybrid system with two energy sources, to develop the model controlled by four rule-based strategies. RESULTS. During researching the problems, models and algorithms were developed in the MatLab software. The article describes the relevance of the research, considers energy

management control strategies and features of their operation. Simulation of the hybrid powertrain with different control strategies was described, the possibility of ensuring the operation of the powertrain with a given load cycle with the required conditions was considered. The results of the simulation of the operation are presented in the form of overall efficiency and cost-effectiveness of the hybrid powertrain with different control strategies. **CONCLUSION.** All the studied strategies ensure the operation of the powertrain in the entire load range with high efficiency. The most effective strategy is the state machine control strategy, it implements maximum efficiency on the presented load cycle. The most cost-effectiveness strategy, in which the consumption of hydrogen and air is minimal, is the strategy based on fuzzy logic algorithms.

Keywords: powertrain; fuel cell stack; rule-based strategy.

For citation: Karabadzhak I.D. Research of rule-based energy management strategies for hybrid powertrains. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 53-66. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-53-66.

Введение (Introduction)

В течение последнего десятилетия интерес транспортной отрасли к разработке эффективных и экологически чистых тяговых систем сделал транспортные средства на топливных элементах реальностью. В настоящее время топливные элементы используются в автомобилях, автобусах, трамваях, поездах и самолетах. Они обеспечивают электроэнергию с высокой эффективностью, меньшим шумом и практически нулевыми выбросами по сравнению с обычными двигателями внутреннего сгорания. Согласно Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации, развитие науки и технологии планируется направить на водородную энергетику, как в области производства водорода, так и в области технологий и промышленной продукции. В России первый тестовый проезд трамвая на водородном топливе состоялся на Московском проспекте в Санкт-Петербурге 20 октября. Для улучшения динамики и плотности мощности систем топливных элементов требуется гибридизация топливных элементов с новыми устройствами хранения энергии, такими как литий-ионные батареи или суперконденсаторы. Эта гибридизация позволяет оптимизировать систему топливных элементов для достижения лучшей экономии топлива и производительности. Эта оптимизация достигается с помощью стратегий управления потоками энергии, которые распределяют мощность нагрузки между источниками энергии. Применение стратегий управления в гибридных силовых установках сможет повысить срок службы силовых агрегатов и снизить расход топлива, как например было реализовано в зарубежной автомобильной промышленности на автомобилях Honda Insight, Toyota Prius, Toyota Mirai и др. В 2000 году был продемонстрирован Chevrolet Suburban с гибридной силовой установкой. Используя контроллер управления, реализующий оптимизационную стратегию управления, переделанный внедорожник достиг значительных улучшений в топливной экономичности, сохранив при этом большинство эксплуатационных характеристик исходного автомобиля. Усреднив участки цикла по шоссе и городу, средняя экономия топлива в эквиваленте бензина составила 11,2 л/100 км. Это примерно в 1,5 раза меньше расхода топлива оригинального Suburban с его 5,3-литровым бензиновым двигателем. Общая эффективность гибридной силовой установки от бака до колёс (tank-to-wheels) составила чуть менее 33% [1].

Один из самых распространённых и простых способов реализовать менеджмент энергии в гибридных установках – это использование алгоритмов управления, основанных на правилах (rule-based). Принцип работы таких алгоритмов состоит во включении или отключении источников и регулировании их выходной мощности на основе заранее заданных, эвристических правил.

Главным преимуществом алгоритмов, основанных на правилах, является их простота и возможность реализации в реальном времени. Однако эти стратегии управления имеют несколько недостатков. Первым из них является отсутствие оптимальности при необходимости получения информации о цикле нагрузки заранее. Кроме того, требуются значительные усилия по калибровке, чтобы гарантировать производительность в удовлетворительном диапазоне для любого цикла нагрузки. Также правила настройки не масштабируются для различных размеров компонентов.

Rule-based стратегии можно разделить на детерминированные и нечеткие. В детерминированных стратегиях правила могут быть заданы вручную исходя из опыта, следуя этим правилам источники энергии работают оптимальных рабочих условиях или в

области высокой эффективности. К детерминированным стратегиям относятся стратегия термостата (ON/OFF), стратегия базовой линии (baseline / power follower), и стратегию состояний (state machine).

Нечёткие стратегии основаны на использовании алгоритмов нечёткой логики (fuzzy logic). Поскольку нечеткие правила можно легко настраивать, преимуществом этого метода является его надежность благодаря его независимости от математической модели контролируемой системы и ее адаптации.

В статье «Powertrain design and control in electrified vehicle. A critical review» авторства Ху С., Хань Ц., Тан С. и др. представлен всесторонний критический обзор текущего состояния и перспектив проектирования электрифицированных силовых агрегатов и управления энергопотреблением. Рассматривается и обсуждается статус исследований в области проектирования силовых агрегатов и развития управления энергопотреблением. Подробно описываются принципы работы стратегий, основанных на правилах [2].

Авторы Тран Д., Вафаейпур М., Эль Багдади М., и др. в работе «Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies» изучают системы менеджмента энергии для качественного исследования, классификации и сравнения существующих подходов с точки зрения принципов, преимуществ и недостатков посредством всестороннего обзора. Рассматриваются как классические стратегии, основанные на правилах так и системы оптимального управления и стратегии на них основанные. Также стратегии управления оцениваются с учётом топологии гибридного и электрических транспортных средств [3].

Литературный обзор (Literature Review)

Стратегия термостата (ON/OFF). В стратегии термостата основным источником энергии является аккумуляторная батарея (АКБ), а батарея топливных элементов (БТЭ) может работать в своей оптимальной точке эффективности, обеспечивая поддержание заряд аккумулятора между predetermined верхним и нижним пределами. Этого можно достичь, включая/выключая БТЭ при необходимости. Разница между мощностью оптимальной точкой эффективности и мощностью нагрузки будет либо подаваться на зарядку аккумулятора, либо поддерживать заряд аккумулятора для подачи требуемой мощности в гибридном режиме. Стратегия термостата (вкл./выкл.) обеспечивает высокий КПД источников энергии, однако частые включения и выключения источников и высокие нагрузки для АКБ негативно сказываются на долговечности источников. Эта стратегия применяется в основном в гибридных транспортных средствах с последовательной гибридной установкой и городском транспорте с частыми остановками.

Яо Д., Лу С., Чао С., и др. в исследовании «Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle» разработали стратегию управления для гибридного электромобиля с увеличенным ходом. Так же для сравнения была представлена классическая стратегия термостата, являющаяся распространённой для данного вида транспортных средств [4].

Парк Дж., О Дж., Парк Й. и др. в работе «Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles» представлена стратегия распределения мощности для гибридного транспортного средства, основанная на стратегии термостата, которая использует карты управления для минимизации потерь в потоке мощности и работы двигателя в эффективной точке [5].

Ханнан М., Азидин Ф., Мохамед А., в работе «Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles» разработана система менеджмента энергии, основанная на стратегии термостата с контроллером мощности, которая позволяет использовать источники энергии в номинальных условиях нагрузки [6].

Стратегия базовой линии. Эта стратегия разработана на основе мощности нагрузки и заряда АКБ. В настоящее время стратегия используется в ADVISOR. Единственным недостатком является то, что она не учитывает напрямую эффективность компонентов и стратегии минимизации расхода топлива/выбросов. Эта стратегия использовалась Honda Insight и Toyota Prius. В стратегии в качестве основного источника питания используется БТЭ, а контроллер регулирует выходную мощность в соответствии с требованиями к мощности системы. АКБ работает только в режиме высокого заряда и низкой нагрузки, а БТЭ заряжает батарею. Стратегия может предложить преимущества общей эффективности системы и улучшенной долговечности батарей по сравнению со стратегией термостата. Стратегия также обеспечивает устойчивый заряд со стабильным напряжением шины.

Ким М., Юнг Д., Мин К. в исследовании «Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus» предлагают новую стратегию управления.

Предлагаемая стратегия основана на стратегии термостата и включает в себя достоинства стратегии базовой линии, что позволяет преодолеть слабые стороны этой стратегии и достичь значительного повышения эффективности. Разработка предлагаемой стратегии основана на совместном моделировании AMESim и Simulink с оптимизацией метода Simplex [7].

Кэ С., Син Х., Чжэнь Ц., и др. в работе «Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control» разрабатывают стратегию управления энергией, основанную на технологии нелинейного модельного прогнозирующего управления для решения проблемы экономичности и долговечности гибридного транспортного средства с топливными элементами. Предложенная стратегия сравнивается со стратегиями основанных на правилах, таких как стратегия термостата и стратегия базовой линии [8].

В исследовании «Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles» авторы Ан К. и Папаламброс Я. разработали систему управления энергией, позволяющей работать силовой установке гибридного транспортного средства либо в режиме форсирования мощности, либо в режиме энергосбережения. Первый режим используется для реагирования на полную нагрузку, а второй — для достижения высокой топливной экономичности с учетом увеличенного числа степеней свободы в управлении энергией. Формулируются задачи оптимизации для двух режимов работы, а проектные пространства анализируются для общих архитектур с разделением мощности. В основе разработанной системы лежит стратегия базовой линии [9].

Сун Д., Линь С., Цинь Д., и др. в работе «Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus» предлагают тип стратегии управления питанием с мгновенной оптимизацией балансировки мощности для нового последовательно-параллельного гибридного электробуса. В соответствии с характеристикой новой последовательно-параллельной архитектуры разрабатываются граничные условия переключения между последовательным и параллельным режимами, а также правила управления стратегии балансировки мощности. По средством моделирования в программном комплексе MATLAB проводится сравнение предложенной стратегии управления с стратегией базовой линии [10].

Хеми Х., Гуили Дж., Черити А. в работе «A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS» представляют стратегию управления энергией в реальном времени для транспортного средства на топливных элементах. Она основана на стратегии базовой линии, в сочетании с эквивалентной стратегией минимизации потребления. Эта стратегия разрабатывается и моделируется с использованием динамической модели транспортного средства, разработанной в среде MatLab/Simulink. В конечном итоге предоставляются результаты моделирования для проверки стратегии при различных массах транспортного средства [11].

Стратегия состояний (state machine). Стратегия, также известная как стратегия многорежимности (multi-mode), управляет состоянием энергоустановки, используя блок-схему или дерево решений стабильных условий, связанных с предыдущими условиями и текущими входными значениями. Стратегия состояний диктует режимы работы, например, режим работы от БТЭ, режим форсирования мощности и режим зарядки. Переход между режимами работы решается на основе изменения требований нагрузки, условий эксплуатации и неисправностей системы/подсистемы. Реализация контроллера энергоустановки через стратегию состояний облегчает отказоустойчивый контроль всей системы.

Сонг К., Ли Ф., Ху Х., и др. в работе «Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm» предлагают многорежимную стратегию управления энергией для электромобилей с расширенным запасом хода на топливных элементах. Эта многорежимная стратегия может автоматически переключаться на оптимизированную генетическим алгоритмом стратегию термостата при определенных условиях вождения с учетом различий в результатах распознавания условий вождения [12].

Ван, Х., Чан, Ч., Пан, З. в исследовании «Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data» провели работу по оптимизации системы менеджмента энергии для многорежимного гибридного электромобиля. Во-первых, скорость движения была установлена интервально с помощью анализа охвата данных, и были построены городские комплексные циклы вождения на основе пропорции времени вождения. Затем была разработана система управления,

оптимизированная на основе информации о состоянии дороги, в соответствии с рабочими кривыми и пороговыми значениями интервалов двигателей [13].

Кануни, Б., Бадуд Е., Мехилеф, С. в исследовании «Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system» предлагают стратегию управления энергией, которая направлена на достижение следующих целей: поддержание параметров шины постоянного тока на заданном уровне, увеличение срока службы батареи и удовлетворение требований мощности. Основным источником энергии является фотоэлектрическая система. Предлагаемое управление отдает приоритет батарее топливных элементов в качестве вторичного источника для зарядки батареи, когда мощности достаточно, а уровень заряда низкий [14].

Для повышения эффективности гибридной системы беспилотного летательного аппарата и продления срока службы в статье «A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs» авторами Чу Кю, Ци Чж., Тонг С., и др. предлагается метод управления энергией гибридных систем питания на основе трехпортового импульсного преобразователя постоянного напряжения. В этом методе стратегия эквивалентного потребления эффективно сочетается со стратегией состояний, которая использует взаимодополняющие преимущества обеих стратегий. Она не только решает проблему неравномерного распределения мощности от стратегии эквивалентного потребления, но и преодолевает ограничение стратегией состояний в достижении оптимальной производительности системы [15].

Стратегия нечёткой логики. Стратегия преобразует человеческий опыт и рассуждения в набор правил IF-THEN. Производительность стратегии определяется функцией принадлежности и нечеткими правилами на этапе нечеткого рассуждения. Поскольку нечеткие правила можно легко настраивать, преимуществом этого метода является его надежность благодаря его независимости от математической модели контролируемой системы и ее адаптации, однако стратегия не может гарантировать оптимальную производительность.

В исследовательской работе «Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life» авторами Шраддха С., Сачин Г., Бин С. представлен сравнительный анализ оптимизации срока службы батареи с различными стратегиями управления в параллельном гибридном транспортном средстве. Рассматривается влияние нескольких параметров, включая температуру и ток, на старение батареи, что обеспечивает более точный прогноз срока службы батареи. Анализируются четыре различные стратегии управления, включая стратегию термостата, стратегию нечеткой логики, адаптивную стратегию минимизации эквивалентного потребления. Сравниваются результаты, касающиеся старения батареи и экономии топлива [16].

Авторами Ян Х., Сан И., Ся Ц., и др. в работе «Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization» предлагается гибридный трактор с батареей топливных элементов в качестве основного источника питания и аккумуляторной батареей в качестве вспомогательного. Также была разработана новая стратегия управления энергией, которая объединяет стратегию термостата, стратегию базовой линии и стратегию нечеткой логики. Стратегия управления энергией использует преимущества различных алгоритмов и реализует рациональное распределение выходной мощности батареи топливных элементов и аккумулятора. Результаты моделирования показывают, что предлагаемая стратегия управления энергией может хорошо работать в различных состояниях SOC и уменьшать колебания мощности топливного элемента [17].

В статье «Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review» авторами Марфироу Х., Вахюнгоро О. и Кахьяди А. всесторонне рассматриваются различные применения контроллеров, основанных на нечёткой логике в качестве систем менеджмента энергии в гибридных транспортных средствах. Проводится сравнительный анализ с другими методами управления и рассматриваются преимущества и проблемы, связанные с каждым методом. Проведено детальное исследование различных типов контроллеров, представляя широкий обзор предлагаемых методологий в каждой категории [18].

Саид Б., Абдельфатах Н., Теджини Х., и др. в исследовании «Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply» разработали алгоритм управления на основе нечеткой логики для управления энергией, чтобы поддерживать батарею и суперконденсатор в их оптимальном состоянии заряда, удовлетворять требованиям нагрузки во время торможения и противонагрузки и повышать независимость энергетической системы. Производительность электроскутера при

изменяющихся нагрузках моделируется в MatLab для проверки эффективности системы управления [19].

Материалы и методы (Materials and methods)

Согласно концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации развитие науки и технологии планируется направить на водородную энергетику, как в области производства водорода, так и в области технологий и промышленной продукции. Одним из направлений является внедрение энергоустановок с водородными топливными элементами. Промежуточным этапом может являться гибридизация имеющихся систем, однако для эффективной работы комбинированных систем необходимо реализации стратегий распределения потоков энергии между источниками энергии. Исследования работы стратегий управления комбинированными электроэнергетическими системами в отечественной литературе практически отсутствуют.

В данной работе рассматриваются различные стратегии управления основанные на правилах на примере энергоустановки с батареей топливных элементов (блок Fuel cell stack) и аккумуляторной батареей (блок Battery) работающей на трёхфазную нагрузку частоты 50 Гц фазного напряжения 220 В активного характера (блок three-phase RLC load). Структурная схема исследуемой гибридной электроустановки и её параметры представлены на рисунке 1 и в таблице 1. График изменения нагрузки представлен на рисунке 2. Моделирование работы энергоустановки и систем управления проводится в программном комплексе MatLab. MatLab – это среда и язык технических расчетов, предназначенный для решения широкого спектра инженерных и научных задач любой сложности в любых отраслях. Это одновременно: язык инженерных расчетов, графические приложения (приложения с графическим интерфейсом), средства разработки программного обеспечения, более сотни прикладных программ (toolboxes) – профессиональных расширений системы и ее адаптации под решение определенных классов математических и научно-технических задач. В Matlab включен Simulink – визуальный редактор для моделирования динамических систем. Несомненным достоинством Simulink является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее устойчивость и скорость работы.

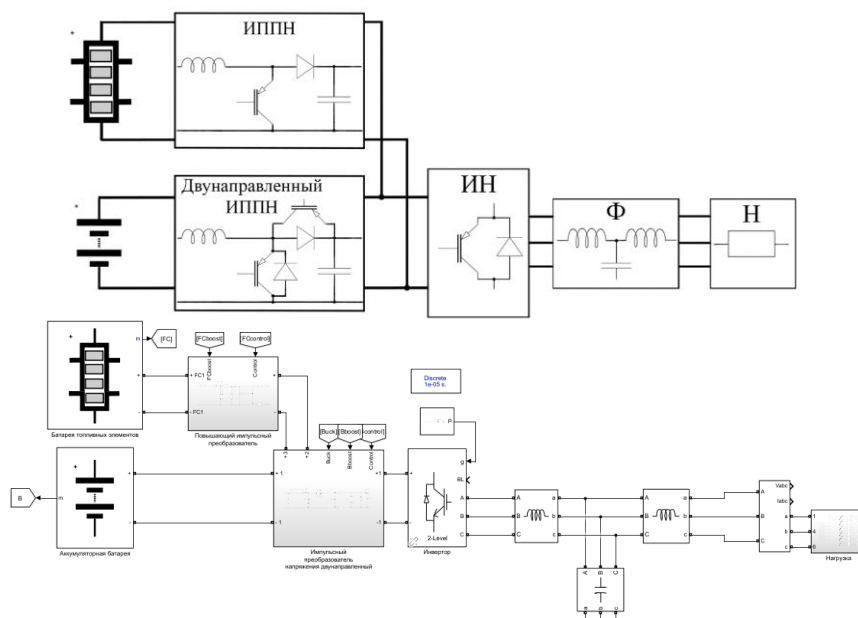


Рис. 1. Структурная схема гибридной энергоустановки и модель реализованная в Simulink

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

Таблица 1
Table 1Параметры электроэнергетической установки
Parameters of the power plant

Батарея топливных элементов	Мощность номинальная, кВт	100
	Напряжение номинальное, В	390
	Напряжение холостого хода, В	520
	Ток номинальный, А	252
Аккумуляторная батарея	Мощность номинальная, кВт	90
	Напряжение номинальное, В	300
	Ток разряда номинальный, А	300
	Ёмкость, Ач	4
Нагрузка	Мощность, кВт	0 – 100
	Коэффициент мощности	1
	Частота, Гц	50
	Число фаз	3
Инвертор	Частота коммутации ключей, кГц	10
	Число фаз	3

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



Рис. 2. График изменения нагрузки

Fig. 2. Load cycle

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

Результаты (Results)

Для моделирования работы стратегии уровень заряда батареи (SOC) будет поддерживаться в пределах 85-90%. Величины, выводимые на блок осциллографа (Scope): действующее значение напряжения фазы нагрузки, уровень заряда АКБ, расход водорода и воздуха БТЭ, напряжение шины постоянного тока, мощность АКБ на выходе преобразователя напряжения, мощность БТЭ на выходе преобразователя напряжения. Результаты моделирования представлены на рисунках 3 и 4. Интерес представляют графики действующего напряжения фазы нагрузки (измеряется при помощи блока Three-phase measurement), расход водорода и кислорода (выводится из стандартного блока Fuel cell stack), уровень заряда батареи (выводится из стандартного блока Battery), напряжение общей шины постоянного тока (измеряется блоком Voltage measurement), а также выходной мощности источников (из стандартных блоков выводятся значения тока и напряжения источника и умножается блоком Product).

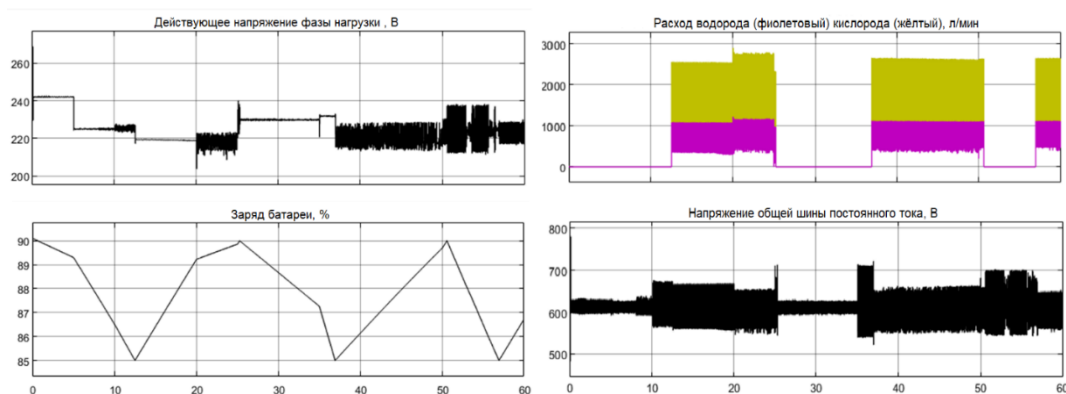


Рис. 3. Результаты моделирования работы стратегии термостата (ON/OFF) Fig. 3. Results of the simulation of the thermostat strategy (ON/OFF)

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

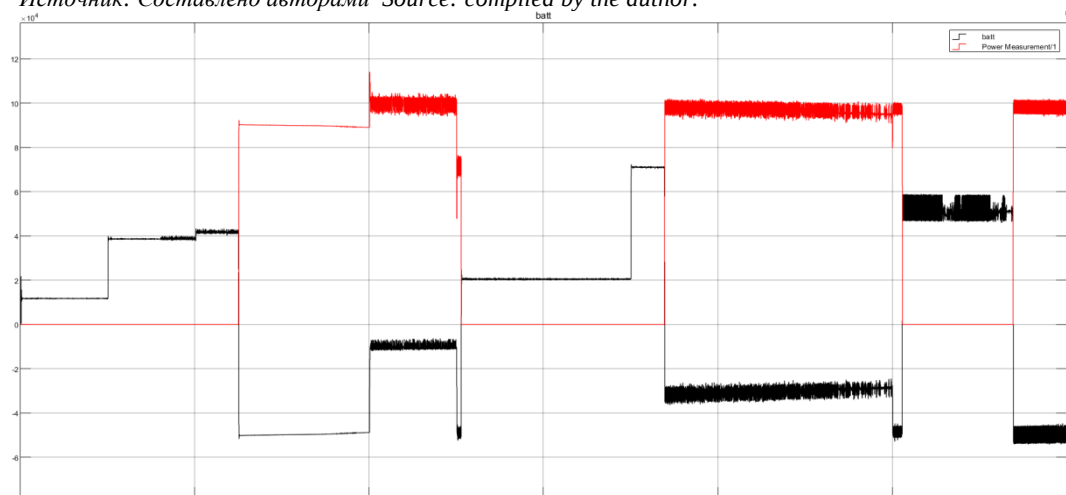


Рис. 4. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ Fig. 4. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

Правила заложенные в стратегию управления базовой линии изображены на рисунке 5. При высоком уровне заряда АКБ и нагрузке менее 30 кВт система работает исключительно от АКБ (тёмно-серый участок). В случае низкого заряда АКБ или нагрузок свыше 40 кВт система работает только от БТЭ, часть энергии отправляется на зарядку АКБ. Заштрихованная область на графике представляет собой гистерезис, используемый для предотвращения переключений между АКБ и БТЭ. Гистерезис реализуется блоком Relay. Результаты моделирования представлены на рисунках 6 и 7.

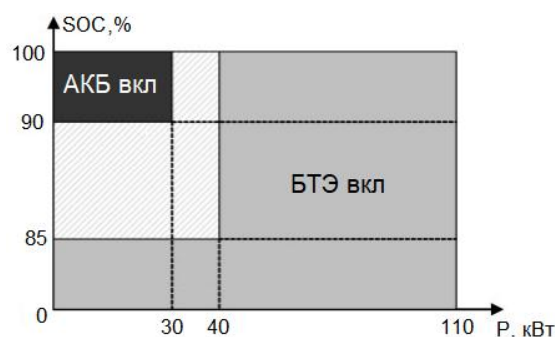


Рис. 5. Принципы управления, реализуемые стратегией базовой линии Fig. 5. Management principles implemented by the baseline strategy

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

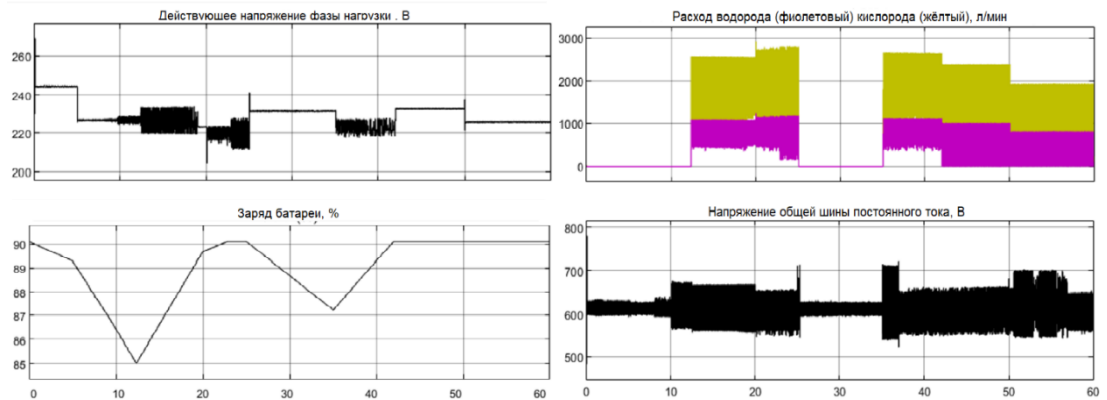


Рис. 6. Результаты моделирования работы стратегии базовой линии

Fig. 6. Results of modeling the operation of the baseline strategy

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

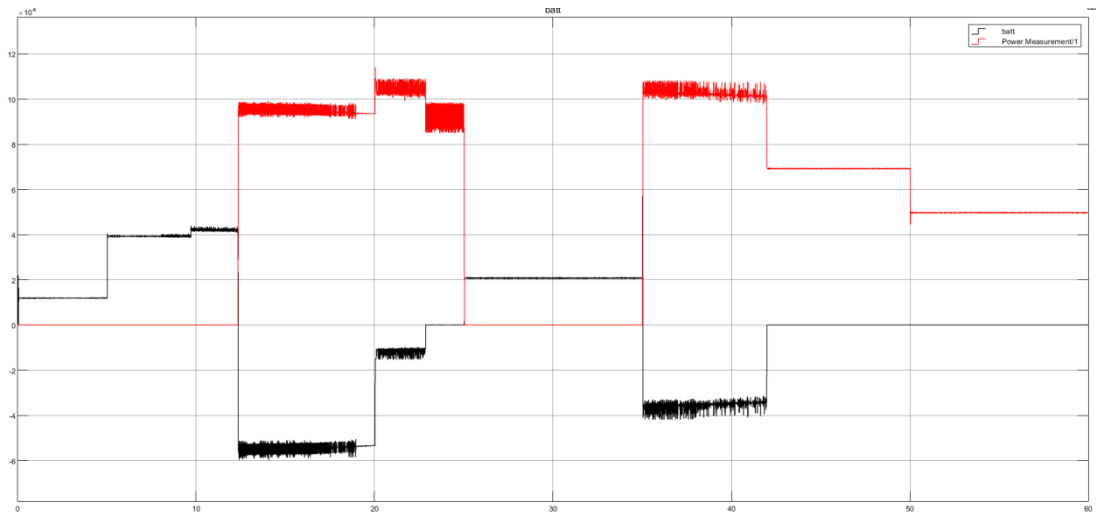


Рис. 7. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 7. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

Правила, заложенные в стратегию состояний, реализуются при помощи блока MatLab-function и описаны в таблице 2. Результаты моделирования представлены на рисунках 8 и 9.

Таблица 2
Table 2

Принципы управления, реализуемые стратегией состояний
Management principles implemented by the state strategy

№	Заряд батареи %	Мощность нагрузки кВт	Мощность источников кВт
1	SOC > 89	$P_H \geq 80$	$P_{БТЭ} = P_H; P_{АКБ} = 0$
2		$45 \leq P_H < 80$	$P_{БТЭ} = P_H + P_{АКБ}; P_{АКБ} = -10$
3		$P_H \leq 45$	$P_{БТЭ} = 0; P_{АКБ} = P_H$
4	$86 < SOC < 89$	$P_H \geq 70$	$P_{БТЭ} = P_H; P_{АКБ} = 0$
5		$45 \leq P_H < 70$	$P_{БТЭ} = P_H + P_{АКБ}; P_{АКБ} = -40$
6		$P_H \leq 45$	$P_{БТЭ} = 0; P_{АКБ} = P_H$
7	SOC < 86	$P_H > 60$	$P_{БТЭ} = P_H; P_{АКБ} = 0$
8		$P_H \leq 60$	$P_{БТЭ} = P_H + P_{АКБ}; P_{АКБ} = -50$

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

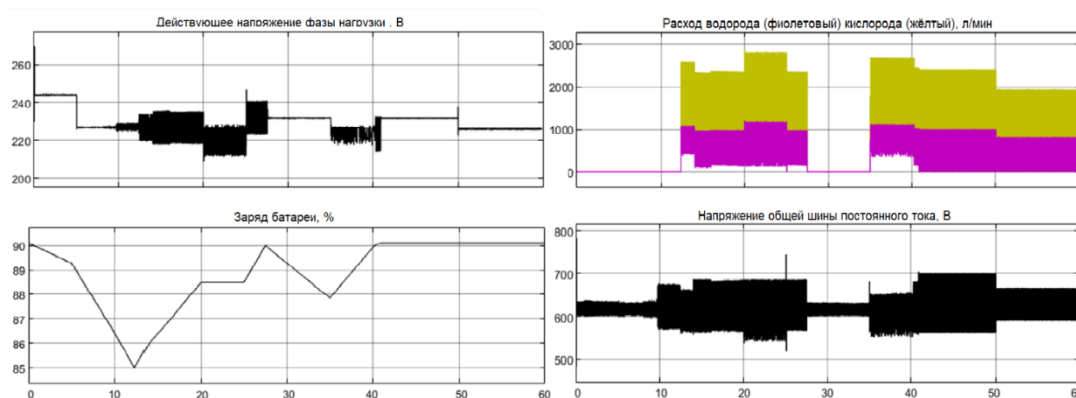


Рис. 8. Результаты моделирования работы стратегии состояний

Fig. 8. Results of modeling the operation of the state machine strategy

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

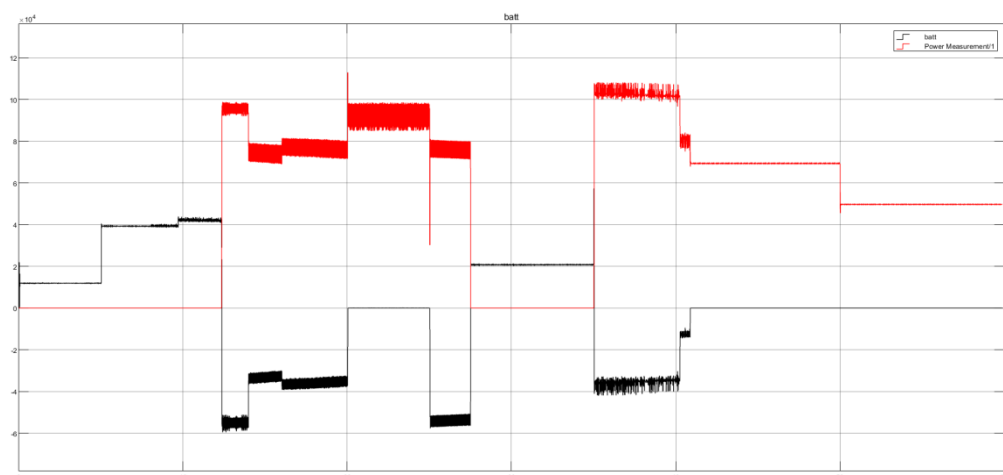


Рис. 9. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 9. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

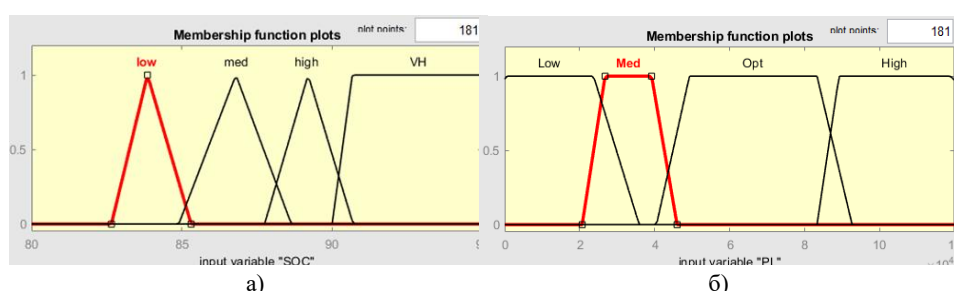
Алгоритмы нечёткой логики задаются при помощи MatLab fuzzy logic toolbox. Правила заложенные в стратегию управления нечёткой логики изображены на рисунках 10 и 11. Результаты моделирования представлены на рисунках 12 и 13.

1. If (SOC is high) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
2. If (SOC is high) and (PL is Opt) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
3. If (SOC is high) and (PL is Med) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
4. If (SOC is high) and (PL is Low) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
5. If (SOC is med) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
6. If (SOC is med) and (PL is Opt) then (Bcontrol is Low)(FCcontrol is ON) (1)
7. If (SOC is med) and (PL is Med) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
8. If (SOC is med) and (PL is Low) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is OFF) (1)
9. If (SOC is low) and (PL is High) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)
10. If (SOC is low) and (PL is Opt) then (Bcontrol is Low)(FCcontrol is ON) (1)
11. If (SOC is low) and (PL is Med) then (Bcontrol is Med)(FCcontrol is ON) (1)
12. If (SOC is low) and (PL is Low) then (Bcontrol is High)(FCcontrol is ON) (1)
13. If (SOC is VH) then (Bcontrol is 0)(FCcontrol is ON) (1)

Рис. 10. Правила, реализуемые стратегией нечёткой логики

Fig. 10. Rules implemented by the fuzzy logic strategy

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



a)

b)

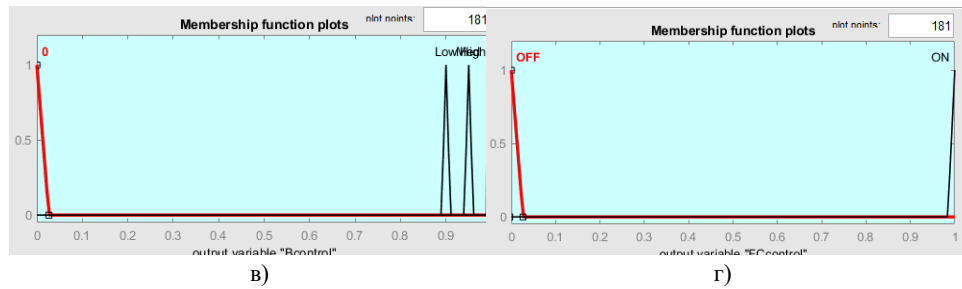


Рис. 11. Функции принадлежности для: а) заряда батареи SOC; б) Мощности нагрузки; в) коэффициент заполнения ИППН АКБ; г) Вкл/выкл БТЭ

Fig. 11. Membership functions for: a) battery charge SOC; b) load power; c) duty cycle; d) Fuel cell stack on/off

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

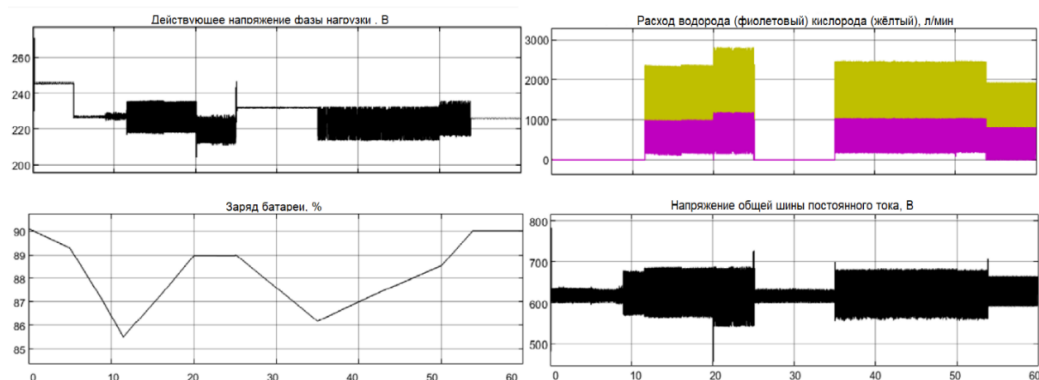


Рис. 12. Результаты моделирования работы стратегии нечёткой логики

Fig. 12. Results of modeling the operation of the fuzzy logic strategy

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

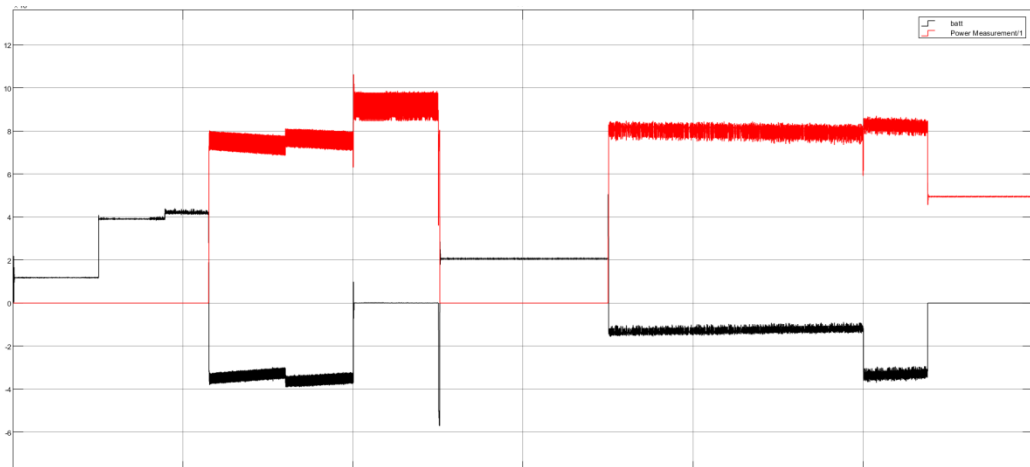


Рис. 13. Выходная мощность источников. Красный – БТЭ, чёрный – АКБ

Fig. 13. Output power of sources. Red – Fuel cell stack, black – Battery

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

Обсуждение (Discussions)

В таблице 3 представлены общая эффективность и экономичность работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления. Все исследованные стратегии обеспечивают работу энергоустановки во всём диапазоне нагрузки с высокой эффективностью.

При реализации стратегии термостата необходимо учитывать, что АКБ может работать при высоких нагрузках, в других стратегиях возможно задать ограничения мощности работы батареи.

Наиболее эффективной стратегией является стратегия состояний, так как на представленном цикле нагрузки реализует максимальный КПД. Самой экономичной стратегией, при которой расход водорода и воздуха минимален – стратегия, основанная на алгоритмах нечёткой логики. Обе эти стратегии обеспечивают высокие экономические и

энергоэффективные показатели, и обладают широкими возможностями настройки и регулировки.

Таблица 3

Table 3

Общая эффективность и экономичность работы гибридной энергоустановки с разными стратегиями управления

Overall efficiency and cost effectiveness of a hybrid power plant with different control strategies

	Стратегия термостата	Стратегия базовой линии	Стратегия состояний	Стратегия нечёткой логики
Общий КПД, %	93,95	94,13	95,43	94,31
Расход водорода, л	452,8	467,9	460,2	452,3
Расход воздуха, л	1077,5	1113,5	1095,1	1076,5

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

Заключение (Conclusions)

В работе был проанализирован зарубежный опыт в сфере стратегии управления потоками энергии в гибридных электроэнергетических установках. Особенно рассматривались стратегии, основанные на правилах. Такие стратегии являются самыми широко используемыми, простыми в реализации и обеспечивающими быстрое действие в условиях реального времени.

Также в программном комплексе MatLab была создана имитационная модель комбинированной энергоустановки, имеющая в качестве источников энергии батарею топливных элементов и аккумуляторную батарею. На основе этой модели были реализованы четыре стратегии управления энергией основанных на правилах. И проведено сравнение этих стратегий с точки зрения эффективности и экономичности.

В ходе проведённого моделирования можно сделать вывод, что все исследуемые стратегии обеспечивают работу установки в заданном цикле нагрузки с высокой эффективностью и экономичностью. При этом самой экономичной стратегией оказалась стратегия нечёткой логики, а самой эффективной – стратегия состояний.

Исследованные стратегии применимы для любых топологий гибридных энергоустановок с различными видами используемых источников энергии. Применение стратегий в реальных системах позволит увеличить срок службы силовых агрегатов и снизить расход топлива.

В рамках дальнейших исследований следует обратить внимание на теорию оптимального управления и возможность интеграции в rule-based стратегии методов оптимального управления, например, принципа минимума Понтрягина или динамического программирования.

Литература

1. Paganelli G., Ercole G., Brahma A., et al. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles // JSAE Review. 2001 Vol. 22, N4. pp 511-518.
2. Hu X., Han J., Tang X., et al. Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2021. Vol. 7, N3. pp. 1990-2009.
3. Tran 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. 2020. Vol. 119, доступно по <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308044>
4. Yao D., Lu X., Chao X., et al. Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle // Sustainability. 2023. Vol. 15, N5, pp. 4607 – 4625
5. Park J., Oh J., Park Y., et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles. In: IEEE “2006 International Forum on Strategic Technology”; 18-20 Oct 2006. Ulsan, Korea (South). 2006. pp. 37–42. Доступно по <https://ieeexplore.ieee.org/document/4107305>. Ссылка активна на 1 июня 2025.
6. Hannan M., Azidin F., Mohamed A., Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles // Energy Conversion and Management. 2012. Vol. 62, pp. 123–130.
7. Kim M., Jung D., Min K., Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014. Vol. 63, N 8. pp. 3569–3579.

8. Ke S., Xing H., Zhen C., et al. Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 50, Pt. B. pp 1604 – 1621.
9. Ahn K., Papalambros Y., Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles // *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*. 2009. Vol. 223, Pt. D. pp. 1149–1162.
10. Sun D., Lin X., Qin D., et al. Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012. Vol. 25. Pp. 1161–1170.
11. Hemi H., Ghouili J., Cheriti A. A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS. In: 2013 IEEE “Electrical Power & Energy Conference”; 21-23 Aug 2013; Halifax, NS, Canada; 2013. pp. 1–6. Доступно по <https://ieeexplore.ieee.org/document/6802927>. Ссылка активна на 1 июня 2025.
12. Song K., Li F., Hu X., et al. Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 389, pp. 230–239.
13. Wang H., Chang C., Pan Z., et al. Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, доступно по https://www.researchgate.net/publication/390733685_Optimization_of_energy_management_strategies_for_multi-mode_hybrid_electric_vehicles_driven_by_travelling_road_condition_data
14. Kanouni B., Badoud A.E., Mekhilef S., et al. Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, доступно по https://www.researchgate.net/publication/379602451_Advanced_efficient_energy_management_strategy_based_on_state_machine_control_for_multi-sources_PV-PEMFC-batteries_system
15. Chu K., Qi Z., Tong X., et al. A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs. In: Qu Y., Gu M., Niu Y., editors. *Proceedings of “3rd 2023 International Conference on Autonomous Unmanned Systems”*; 27 April 2024; Springer, Singapore; 2024. vol 1176.
16. Shradhdha S., Sachin G., Bin X. Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life // *Energy*. 2021. Vol. 228. pp 150–161. Доступно по https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1099-7_15. Ссылка активна на 1 июня 2025.
17. Yang H., Sun Y., Xia C., et al. Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization // *Energies*. 2022. Vol. 15, N 17. pp. 6389 – 6404.
18. Maghfiroh H., Wahyunggoro O., Cahyadi A. Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. pp. 56097-56109.
19. Saied B., Abdelfatah N., Tedjini H., et al. Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply // *Journal of Engineering Research*. 2024. Vol. 12. Pt. 1. pp. 148-159.

Авторы публикации

Карабаджак Иван Дмитриевич – ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники и энергетики» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-5368-6373>. iwan.karabajack@yandex.ru

References

1. Paganelli G., Ercole G., Brahma A., et al. General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles. *JSAE Review*. 2001;22(4):511-518. doi.org/10.1016/S0389-4304(01)00138-2
2. Hu X., Han J., Tang X., et al. Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021;7(3):1990-2009. doi: 10.1109/TTE.2021.3056432
3. Tran 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*. 2020; 119 doi: 10.1016/j.rser.2019.109596. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119308044>

4. Yao D., Lu X., Chao X., et al. Adaptive Equivalent Fuel Consumption Minimization Based Energy Management Strategy for Extended-Range Electric Vehicle. *Sustainability*. 2023;15(5): 4607–4625. doi.org/10.3390/su15054607.
5. Park J., Oh J., Park Y., et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles. In: *IEEE “2006 International Forum on Strategic Technology”; 18-20 Oct 2006*. Ulsan, Korea (South); 2006. pp. 37–42. doi.org/10.1109/IFOST.2006.312240. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4107305>. Accessed: 1 Jun 2025.
6. Hannan M., Azidin F., Mohamed A. Multi-sources model and control algorithm of an energy management system for light electric vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2012;62:123–130. doi.org/10.1016/j.enconman.2012.04.001.
7. Kim M., Jung D., Min K. Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014;63(8):3569–3579. doi.org/10.1109/TVT.2013.2290700.
8. Ke S., Xing H., Zhen C., et al. Research on energy management strategy of fuel-cell vehicles based on nonlinear model predictive control. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;50(Pt B):1604–1621. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.304.
9. Ahn K., Papalambros Y. Engine optimal operation lines for power-split hybrid electric vehicles. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*. 2009;223(Pt D):1149–1162. doi.org/10.1243/09544070JAUTO1124.
10. Sun D., Lin X., Qin D., et al. Power-balancing instantaneous optimization energy management for a novel series-parallel hybrid electric bus. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012;25:1161–1170. doi.org/10.3901/CJME.2012.06.1161.
11. Hemi H., Ghouili J., Cheriti A. A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS. In: *2013 IEEE “Electrical Power & Energy Conference”; 21-23 Aug 2013*; Halifax, NS, Canada; 2013. pp. 1–6. doi.org/10.1109/EPEC.2013.6802927. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6802927>. Accessed: 1 Jun 2025.
12. Song K., Li F., Hu X., et al. Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm. *Journal of Power Sources*. 2018;389:230–239. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.024.
13. Wang H., Chang C., Pan Z., et al. Optimization of energy management strategies for multi-mode hybrid electric vehicles driven by travelling road condition data. *Scientific Reports*. 2025;15. doi.org/10.1038/s41598-025-97521-2 Available at: https://www.researchgate.net/publication/390733685_Optimization_of_energy_management_strategies_for_multi-mode_hybrid_electric_vehicles_driven_by_travelling_road_condition_data
14. Kanouni B., Badoud A.E., Mekhilef S., et al. Advanced efficient energy management strategy based on state machine control for multi-sources PV-PEMFC-batteries system. *Scientific Reports* 2024;14. doi.org/10.1038/s41598-024-58785-2 Available at: https://www.researchgate.net/publication/379602451_Advanced_efficient_energy_management_strategy_based_on_state_machine_control_for_multi-sources_PV-PEMFC-batteries_system
15. Chu K., Qi Z., Tong X., et al. A State Machine EMS Based on Equivalent Consumption Minimization for Hybrid Power System in UAVs. In: Qu Y., Gu M., Niu Y., editors. *Proceedings of “3rd 2023 International Conference on Autonomous Unmanned Systems”; 27 Apr 2024*; Springer, Singapore; 2024. vol 1176. doi.org/10.1007/978-981-97-1099-7_15
16. Shradhdha S., Sachin G., Bin X. Comparative analysis of hybrid vehicle energy management strategies with optimization of fuel economy and battery life. *Energy*. 2021;228:150–161. doi.org/10.1016/j.energy.2021.120604. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-1099-7_15. Accessed: 1 Jun 2025.
17. Yang H., Sun Y., Xia C., et al. Research on Energy Management Strategy of Fuel Cell Electric Tractor Based on Multi-Algorithm Fusion and Optimization. *Energies*. 2022;15(17):6389–6404. doi.org/10.3390/en15176389
18. Maghfiroh H., Wahyunggoro O., Cahyadi A. Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review. *IEEE Access*. 2024;12:56097–56109. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3390436.
19. Saied B., Abdelfatah N., Tedjini H., et al. Fuzzy logic-based Energy Management System (EMS) of hybrid power sources: Battery/Super capacitor for electric scooter supply. *Journal of Engineering Research*. 2024;12(Pt. 1):148–159. doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.008.

Authors of the publication

Ivan D. Karabadzhak – Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-5368-6373>. iwan.karabajack@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено ***11.06.2025 г.***

Отредактировано ***28.08.2025 г.***

Принято ***01.10.2025 г.***