

МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЯХ С АДАПТИВНЫМ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТОМ

¹Чжан Цзин, ²Сяо Гуйян, ³Купцова О.В., ¹Му Яннань

¹Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

²Народное правительство поселка Ванъян города Тели, 153000, Ичунь, Китай

³Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: korsuncevaolesy@gmail.com

В статье решается задача повышения энергоэффективности гибридных силовых установок на основе топливных элементов и аккумуляторных батарей. Целью исследования является разработка адаптивной стратегии энергоменеджмента, позволяющей избежать работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и продлить срок службы аккумулятора. Предложена имитационная модель гибридной системы на платформе MATLAB/Simulink, включающая протонно-обменный мембранный топливный элемент (PEMFC), литий-ионную аккумуляторную батарею, DC/DC-преобразователь, синхронный двигатель с постоянными магнитами и систему управления энергией. Научная новизна заключается в разработке адаптивного управления с разделением зон зарядового состояния аккумулятора (SOC): низкая ($\leq 40\%$), средняя (40-80%) и высокая ($\geq 80\%$) с гистерезисным переходом. Вклад авторов: Чжан Цзин – разработка имитационной модели и проведение вычислительных экспериментов; Сяо Гуйян – анализ данных и обобщение результатов. Эксперименты проведены на городском ездовом цикле. Му Яннань – руководство структурой научной работы. Результаты показали, что предложенная стратегия поддерживает SOC в диапазоне 40-80%, предотвращает перезаряд и глубокий разряд, а также обеспечивает работу топливного элемента преимущественно в зоне максимальной эффективности. Разработанная модель может быть рекомендована для геоинформационной поддержки при проектировании энергоустановок гибридных транспортных средств и мониторинге их эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, топливный элемент, гибридная силовая установка, энергоменеджмент, адаптивное управление, SOC, MATLAB/Simulink.

CONSIDERATION OF FUEL CELL EFFICIENCY IN HYBRID VEHICLES WITH ADAPTIVE ENERGY MANAGEMENT

¹Zhang Jing, ²Xiao Guiyang, ³Kuptsova O.V., ¹Mu Yannan

¹Heihe University, 164300, Heihe, China

²Tieli City Wangyang Township People's Government, 153000, Yichun, China

³Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The paper addresses the problem of improving the energy efficiency of hybrid power systems based on fuel cells and batteries. The aim of the study is to develop an adaptive energy management strategy that avoids fuel cell operation in low-efficiency zones and extends battery service life. A simulation model of the hybrid system is proposed using the MATLAB/Simulink platform, including a proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC), a lithium-ion battery, a DC/DC converter, a permanent magnet synchronous motor, and an energy management system. The scientific novelty lies in the development of adaptive control with state-of-charge (SOC) zones: low ($\leq 40\%$), medium (40-80%), and high ($\geq 80\%$) with hysteresis transition. Author contributions: Zhang Jing – development of the simulation model and computational experiments; Xiao Guiyang – data analysis and results generalization. Experiments were conducted on an urban driving cycle. Mu Yannan – helped with the paper structure. The results show that the proposed strategy maintains SOC within the 40-80% range, prevents overcharge and deep discharge, and ensures fuel cell operation predominantly in the maximum efficiency zone. The developed model can be recommended for geoinformation support in designing hybrid vehicle power systems and monitoring their operational parameters.

Keywords: geographic information modelling, fuel cell, hybrid power system, energy management, adaptive control, SOC, MATLAB/Simulink.

Введение

В условиях глобального энергетического перехода и ужесточения экологических требований к автомобильному транспорту гибридные силовые установки на основе топливных элементов (ТЭ) и аккумуляторных батарей (АКБ) привлекают всё большее внимание исследователей и производителей. Топливные элементы обладают высокой энергетической плотностью и нулевым уровнем выбросов, однако характеризуются медленной динамической реакцией при резких изменениях нагрузки. Акку-

муляторные батареи, напротив, обеспечивают быстрый отклик и способны рекуперировать энергию торможения, но имеют ограниченный ресурс и подвержены деградации при глубоких разрядах или перезаряде [1,4,6].

Зарубежные исследования в области топливных элементов активно развиваются на протяжении десятилетий. США реализуют долгосрочную стратегию развития водородной энергетики при поддержке Министерства энергетики (DOE) и международных партнёрств, таких как IPHE и IEA [2-4]. В 2024 году

Monika Singh с коллегами продемонстрировали возможность применения перспективных материалов на основе твёрдых оксидов в полупроводниковых топливных элементах, что открывает новые направления в этой области [5].

Существенный вклад в развитие данного научного направления вносят и научные работники Китая. В 2025 году Lin Liangliang и Chen Qixiu предложили стратегии повышения эффективности преобразования энергии в водородных автомобилях [7]. Gao Zhi с соавторами в 2024 году разработали метод внешней максимизации энергоэффективности, позволяющий снизить нагрузку на топливный элемент и повысить общую экономичность гибридной системы [8]. Li Yan, Yun Zhiting и Sun Qishen исследовали ключевые технологии водородных топливных элементов и их роль в экологизации транспорта [9]. Однако, несмотря на прогресс, доля Китая в мировом патентном портфеле по топливным элементам составляет лишь около 1%, что указывает на необходимость дальнейших исследований.

Настоящее исследование направлено на разработку адаптивной стратегии управления энергией для гибридной системы PEMFC/АКБ. Основная идея заключается в предотвращении работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и поддержании зарядового состояния аккумулятора в безопасном диапазоне путём зонного управления с гистерезисом.

Методы и материалы исследования

Моделирование гибридной системы

Гибридная система включает протонно-обменный мембранный топливный элемент (PEMFC), литий-ионную аккумуляторную батарею, DC/DC-преобразователь, синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM) и систему управления энергией. Моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink, что позволяет с высокой точностью воспроизводить динамические процессы в системе.

Для моделирования топливного элемента использован встроенный блок Fuel Cell Stack библиотеки Simulink. Модель учитывает электрохимические процессы, тепловые потери и динамику газораспределения. Напряжение холостого хода установлено на уровне 400 В, при токе 1 А напряжение снижается до 380 В. Номинальный ток – 285 А, номинальное напряжение – 300 В. Стек состоит из 400 ячеек. Ожидаемая эффективность – 57%, рабочая температура – 95°C. Состав топливной смеси (водород:кислород:водяной пар) задан в пропорции 95:21:1.

Аккумуляторная батарея смоделирована с помощью блока Battery (Simulink), который использует эквивалентную электрическую схему для описания процессов заряда и разряда. Используется литий-ионный аккумулятор номинальной ёмкостью 25 А·ч

и номинальным напряжением 288 В. Напряжение заряда – 335 В, внутреннее сопротивление – 0.2 Ом. Предельная мощность заряда/разряда – 25 кВт.

Поскольку топливный элемент обладает низкой динамической скоростью отклика, для стабилизации выходного напряжения применяется DC/DC-преобразователь. Модель состоит из двух компонентов: Bus DC controller (формирует сигналы управления скважностью) и DC/DC converter (преобразует входное напряжение в требуемое выходное).

Использован синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM) с векторным управлением. Регулирование выходного напряжения инвертора осуществляется методом пространственно-векторной модуляции (SVPWM). Максимальная мощность двигателя – 100 кВт, максимальный крутящий момент – 256 Н·м, максимальная частота вращения – 12500 об/мин.

Динамика транспортного средства реализована с использованием библиотеки Vehicle Dynamics Blockset. Параметры автомобиля: полная масса – 1625 кг, площадь лобового сопротивления – 2.711 м², коэффициент аэродинамического сопротивления – 0.26, радиус колеса – 0.25 м, передаточное число главной передачи – 7.6, КПД трансмиссии – 0.9, коэффициент сопротивления качению – 0.014, коэффициент учёта вращающихся масс – 1.2, уклон дороги – 0°.

Адаптивная стратегия управления энергией

Основными задачами разработанной системы энергоменеджмента являются обеспечение мгновенной подачи мощности при разгоне за счёт аккумулятора; рекуперация энергии торможения; защита аккумулятора от перезаряда и глубокого разряда; предотвращение работы топливного элемента в зонах низкой эффективности; минимизация резких и частых колебаний выходной мощности топливного элемента.

В зависимости от зарядового состояния (State of Charge, SOC) аккумулятора выделены три зоны управления состоянием заряда (табл. 1).

Для предотвращения паразитных колебаний SOC на границах зон введён гистерезисный переход. При снижении SOC ниже 40% активируется режим заряда и сохраняется до достижения 40% при подъёме. При превышении SOC выше 80% активируется режим разряда и сохраняется до снижения до 80%.

Система управления энергией включает два основных модуля Battery Management System (BMS) и Power Management System (PMS).

Battery Management System (BMS) – контролирует SOC, ограничивает мощность заряда/разряда, предотвращает выход за допустимые пределы.

Power Management System (PMS) – на основе сигналов педали акселератора, скорости, крутящего

Таблица 1

Зонное управление состоянием заряда (SOC)

Зона	Диапазон SOC	Режим работы
Низкая	$\leq 40\%$	Запрет разряда АКБ, приоритет работы ТЭ
Средняя	40-80%	Балансировка, ТЭ работает в зоне max КПД
Высокая	$\geq 80\%$	Запрет заряда АКБ, приоритет разряда

момента и данных от BMS формирует целевой крутящий момент двигателя и опорный ток топливного элемента.

Результаты

Моделирование проводилось на городском ездовом цикле с частыми разгонами и торможениями. Параметры компонентов сведены в табл. 2.

Положение педали акселератора в процессе цикла изменялось от -0.8 до 0.8, что соответствует частым ускорениям и замедлениям. Скорость автомобиля колебалась в диапазоне 0-90 км/ч. При резком нажатии педали наблюдалась задержка роста скорости из-за инерции транспортного средства и сопротивления движению.

Максимальная потребляемая мощность системы достигала 105 кВт, при этом мощность топливного элемента ограничивалась 95 кВт, а дефицит

покрывался аккумулятором. На этапах замедления и холостого хода топливный элемент обеспечивал привод электродвигателя, а избыточная энергия направлялась на подзаряд АКБ. На установившихся режимах основную нагрузку нес топливный элемент, работая в зоне максимальной эффективности.

Ток DC/DC-преобразователя изменялся в диапазоне 0-350 А, обеспечивая стабильное преобразование напряжения между топливным элементом (300-450 В) и аккумулятором (200-350 В). SOC аккумулятора поддерживался в узких диапазонах 40-40.6% или 74-74.6% в зависимости от фазы цикла (рис. 1). Благодаря зонному управлению с гистерезисом удалось избежать перезаряда и глубокого разряда, что способствует продлению срока службы АКБ.

Таблица 2

Параметры компонентов гибридной системы

Компонент	Параметр	Значение
Транспортное средство	Масса, кг	1625
	Площадь лоб. сопротивления, м ²	2.711
	Коэфф. аэродин. сопротивления	0.26
Двигатель PMSM	Макс. мощность, кВт	100
	Макс. крутящий момент, Н·м	256
	Макс. частота вращения, об/мин	12500
Топливный элемент	Тип	PEMFC
	Ном. мощность, Вт	85500
	Ном. напряжение, В	300
Аккумулятор	Ном. ток, А	258
	Ном. емкость, А·ч	25
	Ном. напряжение, В	288
	SOCL / SOCH	40% / 80%

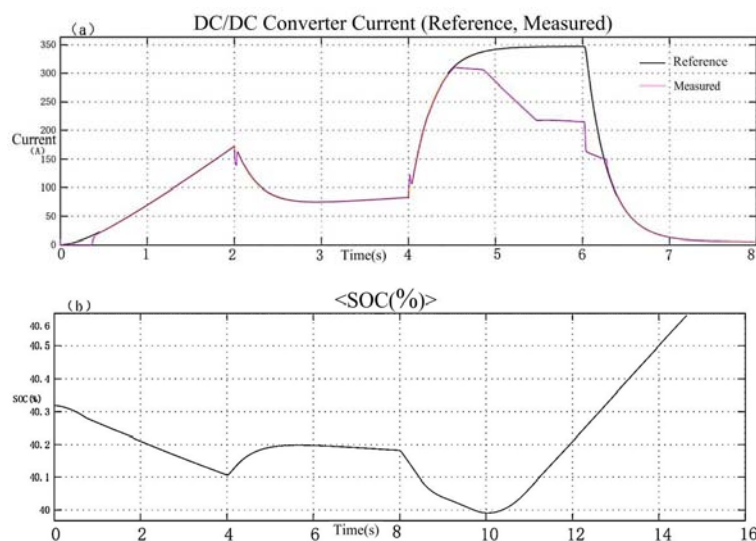


Рис. 1. Изменение состояния заряда аккумуляторной батареи (SOC) в процессе городского ездового цикла

Заключение

В работе представлена адаптивная стратегия энергоменеджмента для гибридной системы на основе топливного элемента PEMFC и литий-ионного аккумулятора, реализованная в среде MATLAB/Simulink.

Защита аккумулятора: зонное управление SOC с гистерезисом поддерживает SOC в диапазоне 40–80%, предотвращает перезаряд и глубокий разряд, что продлевает срок службы АКБ.

Повышение эффективности топливного элемента: адаптивное управление позволяет избежать работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и поддерживать его преимущественно в

области максимального КПД.

Рациональное распределение мощности: в режимах максимальной нагрузки дефицит мощности покрывается аккумулятором, а при торможении осуществляется рекуперация энергии, что повышает общую топливную экономичность.

Перспективы дальнейших исследований связаны с уточнением моделей топливного элемента и аккумулятора на основе экспериментальных данных, внедрением методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки, а также экспериментальной верификацией предложенной стратегии на реальном гибридном автомобиле.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Департамента образования провинции Хэйлуцзян (проект №2023-KYYWF-1135). Работа также выполнялась в рамках гос. задания Мин. науки и высшего образования РФ (тема «Лаборатория мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций с применением беспилотных авиационных систем», номер государственного учёта ЕГИСУ НИОКТР 1025091500035-5, шифр FEFF-2026-0005). Авторы выражают благодарность Хэйхэскому университету (Китай) и Сахалинскому государственному университету (Российская Федерация) за содействие в проведении исследований.

Список литературы

- Gao Z., Zhang J.Y., Jin D.H. Fuel Cell Hybrid System Design and Control Research. Tractor and Agricultural Transport Vehicle. 2024. V. 51. No. 6. Pp. 73-82. (in Chinese).
- Guan L., Li D.J., Ji S.S. Structural Regulation and Performance Enhancement of Carbon Based Supercapacitors. Materials. 2025. V. 27. Article 312034.
- Han E.F. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling and Validation. Value Engineering. 2025. V. 44. No. 4. Pp. 5-8. (in Chinese).
- Haiyu G., Bifeng Y., Fei H.D. Optimization of Purge Strategy under Fuel Cell Startup Conditions Based on CFD Simulink Collaborative Simulation. Ionics. 2024. V. 30. No. 5. Pp. 2969-2987.
- Li Y., Yun Z.T., Sun Q.S. Research Status of Key Technologies of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Internal Combustion Engine and Parts. 2024. No. 7. Pp. 134-136. (in Chinese).
- Lin L.L., Chen Q.Y., Lyu J.P. Strategies for Improving Energy Conversion Efficiency of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Automotive Knowledge. 2025. V. 25. No. 3. Pp. 4-6. (in Chinese).
- Mou L., Zou Y., Jiang H.M. Research Status, Existing Problems and Future Development Trends of New Energy Vehicles. Auto Maintenance Technician. 2024. No. 16. Pp. 81-82. (in Chinese).
- Ren Z. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System Modeling and Control. Chongqing: Chongqing University of Technology. 2024. (in Chinese).
- Singh M., Mittal A.P., Singh A.K. Heuristic Power Management of Hybrid Source Electric Vehicle Based on PV Battery PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 8. Pp. 80.
- Singh M. Recent Advancement of Solid Oxide Fuel Cells towards Semiconductor Membrane Fuel Cells. Energy Materials. 2024. V. 40. Article 400012.
- Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S. Materials, Technological Status, and Fundamentals of PEM Fuel Cells: A Review. Materials Today. 2020. V. 38. Pp. 300122.
- Bi Y.S., Pei B.H., Yu P. Simulation Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Henan Science and Technology. 2023. V. 42. No. 8. Pp. 50-56. (in Chinese).

References

- Gao Z., Zhang J.Y., Jin D.H. Fuel Cell Hybrid System Design and Control Research. Tractor and Agricultural Transport Vehicle. 2024. V. 51. No. 6. Pp. 73-82. (in Chinese).
- Guan L., Li D.J., Ji S.S. Structural Regulation and Performance Enhancement of Carbon Based Supercapacitors. Materials. 2025. V. 27. Article 312034.
- Han E.F. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling and Validation. Value Engineering. 2025. V. 44. No. 4. Pp. 5-8. (in Chinese).
- Haiyu G., Bifeng Y., Fei H.D. Optimization of Purge Strategy under Fuel Cell Startup Conditions Based on CFD Simulink Collaborative Simulation. Ionics. 2024. V. 30. No. 5. Pp. 2969-2987.
- Li Y., Yun Z.T., Sun Q.S. Research Status of Key Technologies of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Internal Combustion Engine and Parts. 2024. No. 7. Pp. 134-136. (in Chinese).
- Lin L.L., Chen Q.Y., Lyu J.P. Strategies for Improving Energy Conversion Efficiency of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Automotive Knowledge. 2025. V. 25. No. 3. Pp. 4-6. (in Chinese).
- Mou L., Zou Y., Jiang H.M. Research Status, Existing Problems and Future Development Trends of New Energy Vehicles. Auto Maintenance Technician. 2024. No. 16. Pp. 81-82. (in Chinese).
- Ren Z. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System Modeling and Control. Chongqing: Chongqing University of Technology. 2024. (in Chinese).
- Singh M., Mittal A.P., Singh A.K. Heuristic Power Management of Hybrid Source Electric Vehicle Based on PV Battery PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 8. Pp. 80.

10. Singh M. Recent Advancement of Solid Oxide Fuel Cells towards Semiconductor Membrane Fuel Cells. Energy Materials. 2024. V. 40. Article 400012.
11. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S. Materials, Technological Status, and Fundamentals of PEM Fuel Cells: A Review. Materials Today. 2020. V. 38. Pp. 300122.
12. Bi Y.S., Pei B.H., Yu P. Simulation Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Henan Science and Technology. 2023. V. 42. No. 8. Pp. 50-56. (in Chinese).

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Чжан Цзин

преподаватель, Институт естественных наук, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Сяо Гуйян

специалист, Народное правительство поселка Ванъян города Тели, 153000, Ичунь, Китай

Купцова Олеся Витальевна

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия

Му Яннань

профессор, Институт естественных наук, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Information about authors
Affiliations

Zhang Jing

Lecturer, Institute of Natural Sciences, Heihe University, 164300, Heihe, China

Xiao Guiyang

Specialist, Tieli City Wangyang Township People's Government, 153000, Yichun, China

Kuptsova Olesya Vitalievna

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Life Safety, Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Mu Yannan

Professor, Institute of Natural Sciences, Heihe University, 164300, Heihe, China

Поступила в редакцию 19.05.2026 г.