

УДК 629.017

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Чжан Ланьчунь¹, доктор технических наук, профессор
Лю Сэнь^{2,3}, аспирант группы Маа-252, 1-го года обучения
Ащеулов А.С.³, к.т.н., доцент

¹Цзянсуский университет технологий,
г. Чанчжоу

²Сучжоуский промышленный профессионально-технический колледж
г. Сучжоу

³Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Стратегия управления энергопотреблением является одним из ключевых факторов, влияющих на топливную экономичность гибридных автомобилей с переменным током (PHEV). Поскольку гибридная система представляет собой высоко нелинейную, тесно взаимосвязанную и временно-переменную систему, её рабочее состояние определяется множеством факторов. Поэтому разработка эффективной стратегии управления аккумулятором, обеспечивающей безопасность, надёжность и оптимальный срок службы батареи, одновременно повышающей топливную экономичность транспортного средства и снижающей выбросы загрязняющих веществ, остаётся ключевой задачей для исследователей в данной области как в Китае, так и за рубежом.

В настоящее время исследования стратегий управления энергией в PHEV (гибридных автомобилях с возможностью переключения на электропривод) в основном делятся на две категории: стратегии управления энергией, основанные на правилах, и стратегии управления энергией, основанные на алгоритмах оптимизации. Тенденции развития этих подходов представлены на рисунке 1.

Исследование стратегий управления энергией в PHEV имеет важное значение для повышения топливной экономичности, оптимизации использования энергии, снижения выбросов и развития индустрии новых энергетических автомобилей. Рациональное распределение энергии позволяет удовлетворять потребности в мощности, одновременно снижая расход топлива и выбросы углерода, способствуя переходу транспортной отрасли к низкоуглеродным технологиям и смягчению энергетического кризиса. В то же время интеллектуальные стратегии, сочетающие технологии интернета транспортных средств и искусственного интеллекта, повышают эффективность работы транспортных средств и комфорт вождения, стимулируя развитие интеллектуальных сетевых автомобилей. Эффективное

управление энергией не только оптимизирует общие характеристики транспортного средства, но и обеспечивает техническую поддержку для создания зелёной и устойчивой транспортной системы.

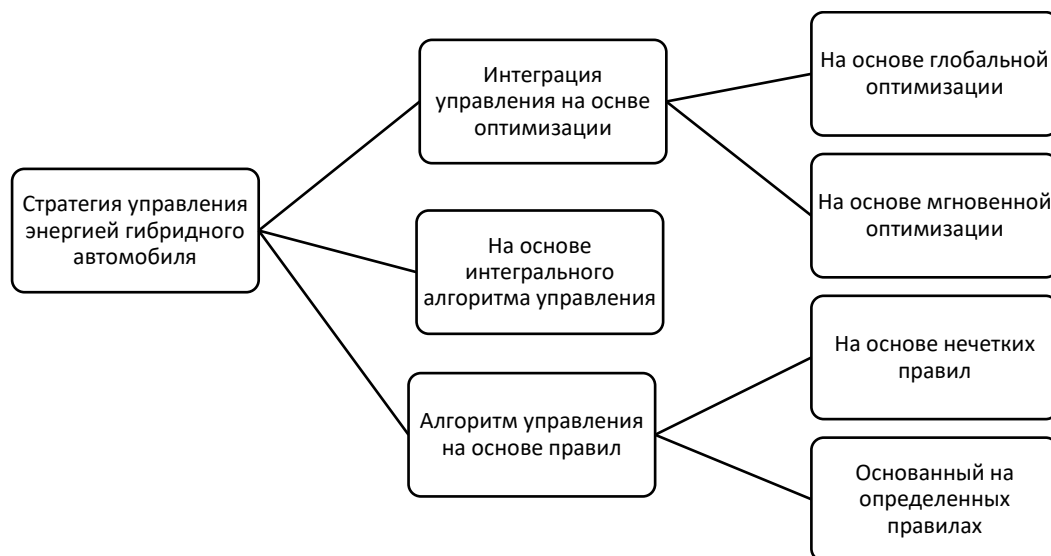


Рисунок 1. Метод классификации стратегий управления энергией гибридных автомобилей

Стратегия управления энергией гибридных автомобилей на основе алгоритмов оптимизированного управления.

Стратегия управления энергией на основе оптимизированного управления решает задачу оптимального распределения энергии при заданных ограничениях с помощью математической оптимизации, что позволяет повысить топливную экономичность и общую эффективность работы гибридных автомобилей (HEV) или plug-in гибридных автомобилей (PHEV). По сравнению с методами управления на основе правил, оптимизированные подходы обеспечивают более точное балансирование потоков энергии в силовой системе и повышают коэффициент совместной работы двигателя и электродвигателя. Стратегии управления энергией в HEV на основе оптимизированного управления можно разделить на локальные и глобальные методы оптимизации в зависимости от области оптимизации. Локальные методы, как правило, направлены на оптимизацию энергии в реальном времени в течение временного окна и подходят для онлайн-контроля транспортного средства, тогда как глобальные методы оптимизируются на основе всего диапазона рабочих режимов движения и используются в основном для офлайн-анализа или в качестве эталона для других методов.

Методы локальной оптимизации.

Методы локальной оптимизации в основном используют реальное время для оптимизации распределения энергии в текущий момент и в

ближайшем будущем с целью повышения топливной экономичности во время динамического движения. К распространённым методам относятся:

Принцип минимального значения Понтрягина (РМР) основан на теории оптимального управления и сводит задачу управления энергопотреблением к минимизации гамильтоновой функции, что позволяет снизить вычислительную нагрузку и обеспечивает его применение в системах реального времени. По сравнению с DP принцип минимального значения Понтрягина обладает низкой вычислительной сложностью, однако его эффективность будет сильно зависеть от выбора весовых коэффициентов уровня заряда аккумулятора и требует точного прогнозирования режимов движения автомобиля для достижения оптимальных результатов, что не всегда реализуемо в постоянно меняющихся условиях движения автомобиля.

Стратегия минимизации эквивалентного расхода топлива (Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS) — это метод, основанный на мгновенной оптимизации расхода заряда аккумулятора при минимальном расходе топлива. ECMS по своей сути похож на РМР, который не прогнозирует, а поддерживает необходимый заряд аккумуляторного блока, но при этом сохраняя минимальный расход топлива. В сравнении с РМР стратегия минимизации расхода топлива более гибкая и способна подстраиваться под различные рабочие режимы движения автомобиля, при этом затраты на вычисления снижаются в сравнении с предыдущим методом. Но есть ряд сложностей, например большая зависимость от коэффициента эквивалентности. Так при его изменении требуются более сложные расчеты и применение других методов управления.

Модельное предиктивное управление (МРС) – этот метод, работающий в режиме реального времени, оптимизирует работу гибридной системы автомобиля на основе динамических моделей, а также при прогнозировании будущих режимов работы.

Данный метод учитывает большое количество потребностей транспортного средства (требуемая мощность, ограничение заряда аккумуляторного блока и топливная экономичность). Но для таких решений требуются большие вычислительные мощности, а также на работу системы будет оказывать, на сколько точным оказался прогноз. Таким образом, не на каждом автомобиле возможно применение этого метода управления гибридной установкой.

Метод глобальной оптимизации. Применение этого метода направлено на оптимизацию всех рабочих режимов движения транспортного средства, при этом использует офлайн расчеты для поиска наилучших решений по энергопотреблению.

Хотя из-за огромного объёма вычислений эти методы трудно применимы непосредственно в реальных автомобилях, они могут служить опорой для других онлайн-стратегий оптимизации. К распространённым методам относятся:

Динамическое программирование (Dynamic Programming, DP) представляет собой метод глобальной оптимизации, который путем перебора всех возможных путей распределения энергии вычисляет оптимальную последовательность управления с целью минимизации расхода топлива или энергопотребления. Однако из-за высокой вычислительной сложности данный метод трудно применим в реальных системах управления транспортными средствами в реальном времени. Он подходит для офлайн-оптимизации и служит оптимальным эталоном для других подходов к управлению энергопотреблением.

Укрепляющее обучение (Reinforcement learning, RL) — это метод обучения с использованием интерактивных механизмов, при котором на основе большого объёма данных симуляций или реального эксплуатационного оборудования формируются интеллектуальные стратегии управления энергопотреблением. По сравнению с традиционными методами оптимизации RL способен обучаться оптимальным управляющим стратегиям в условиях неизвестности или сложной среды, обладает определённой способностью к саморегуляции и подходит для долгосрочной оптимизации энергосбережения. Однако процесс обучения RL длительный, требует высокого качества данных, и для удовлетворения потребностей практического применения необходимо дальнейшее совершенствование.

В целом методы локальной оптимизации, такие как ECMS, благодаря своей высокой оперативности, более пригодны для инженерного применения, в то время как глобальные методы оптимизации (DP, RL) обеспечивают теоретическую основу для дальнейшего совершенствования стратегий управления энергопотреблением. Будущее развитие будет направлено на сочетание методов оптимизационного управления с интеллектуальными алгоритмами с целью повышения энергоэффективности и уровня интеллектуализации гибридных автомобилей.

Стратегия управления энергией гибридных автомобилей на основе алгоритмов интеллектуального управления.

Управление энергией на основе интеллектуальных алгоритмов управления позволяет повысить топливную экономичность и эффективность работы гибридных автомобилей, а также усилить их способность к адаптации в сложных условиях эксплуатации. Фuzzy-логическое управление (FLC) обеспечивает рациональное распределение энергии за счёт правил-инференции, обладает высокой оперативностью и устойчивостью, однако сильно зависит от экспертного опыта и плохо адаптируется к различным условиям вождения. Искусственные нейронные сети (ANN) применяют технологии глубокого обучения работы со сложными моделями управления затратами энергии, что позволяет применять их в различных условиях движения. Для такого метода управления гибридными установками характерны следующие особенности: высокая вычислительная нагрузка, большое количество времени, затрачиваемое на обучение. Благодаря постоянному обучению данная стратегия совершенствуется на протяжении

всего времени, и находить пути постоянного оптимизирования, при этом не требуются точные математические модели. Но так как процесс обучения занимает долгое время, стратегия управления с искусственными сетями не применима в системах реального времени.

Стратегия управления энергией гибридных автомобилей на основе алгоритмов управления по правилам.

Алгоритм управления на основе правил является одним из первых методов, применявшихся в стратегиях управления энергией гибридных автомобилей. Его основная идея заключается в рациональном распределении мощности с учётом текущего состояния движения транспортного средства и его энергетических потребностей, а также в рациональном переключении источников мощности и распределении мощности на основе заранее заданных логических правил. Такой алгоритм управления часто называют стратегией управления энергией гибридных автомобилей на основе статических пороговых значений. В зависимости от используемых управляющих правил алгоритм управления на основе правил можно разделить на два типа: алгоритм управления на основе определённых правил и алгоритм управления на основе нечётких правил.

Контрольные стратегии на основе определённых правил в основном используют заранее заданную математическую логику и эмпирические правила для управления энергопотреблением. К типичным методам относятся управление с помощью автомата состояний (Finite State Machine, FSM) и стратегии управления на основе пороговых значений. Управление FSM осуществляется путём переключения логических условий в зависимости от текущего режима работы транспортного средства (например, режим чистого электропривода, гибридный режим или режим прямого привода двигателя).

Подводя итог по стратегиям управления гибридными установками на основе точных правил просты в реализации и обладают хорошей вычислительной эффективностью, эти особенности позволяют использовать эти стратегии в реальном времени, но с другой стороны усложнены процессы оптимизации. Рассматривая стратегии, основанные на нечетких правилах, наоборот обладают хорошей оптимизацией и гибкостью управления энергопотреблением, но для улучшения эффективности требуются другие методы. В перспективе дальнейшего развития и применения наиболее лучшими стратегиями станут методы с искусственными нейронными сетями и с алгоритмами оптимизации.

Список литературы:

1. Раков, В. А. Оценка эффективности эксплуатации автомобилей с комбинированной энергоустановкой малой электрической мощности «Мягкий гибрид» / В. А. Раков // Вестник Вологодского государственного

университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 2(20). – С. 66-69. – EDN VDKIPD.c

2. Раков, В. А. Оценка экологической безопасности и энергоэффективности гибридных автомобилей / В. А. Раков // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 1(80). – С. 63-71. – EDN DTDJZW.

3. Панкратов, Д. Д. История возникновения гибридных автомобилей, типы гибридных автомобилей и схемы взаимодействия электродвигателя и ДВС / Д. Д. Панкратов, В. Д. Панкратов, Р. Т. Насибуллин // XI Международная научно-практическая заочная конференция "ЭТАП-2024", посвященная 220-летию КФУ, Набережные Челны, 14 ноября 2024 года. – Набережные Челны: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2024. – С. 855-865. – EDN ROSQLT.

4. Раков, В. А. Критерии оценки эффективности использования гибридных автомобилей / В. А. Раков // Двигателестроение. – 2025. – № 4(302). – С. 3-15. – EDN SXPMZR.