DOI: 10.58168/BECGD2026_289-297
УДК 621.331:004.7

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОДКЛЮЧЕННЫМИ ГИБРИДНЫМИ АВТОМОБИЛЯМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ V2X (VEHICLE-TO-EVERYTHING)

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT CONTROL STRATEGIES FOR PLUG-IN HYBRID VEHICLES BASED ON V2X (VEHICLE-TO-EVERYTHING) TECHNOLOGIES

Кораблев Р.А., кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Korablev R.A., Candidate of Agricultural Sciences, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Голев А.Д., кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Golev A.D., Candidate of Technical Sciences, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Бусарина С.Э., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Busarina S.E., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Блинова М.В., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Blinova M.V., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Тимченко А.И., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Timchenko A.I., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Ермоленко Д.С., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Ermolenko D.S., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Курганский А.О., студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Россия

Kurgansky A.O., student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. Подключаемые гибридные автомобили (PHEV) требуют эффективных стратегий распределения мощности, учитывающих внешние факторы. Цель работы – разработка стратегии управления на основе технологий V2X и прогнозного моделирования (MPC) с нейросетевым прогнозом дорожной обстановки. Моделирование в MATLAB и

© Кораблев Р. А., Голев А. Д., Бусарина С. Э., Блинова М. В., Тимченко А. И., Ермоленко Д. С., Курганский А. О., 2026

SUMO показало снижение расхода топлива на 12-18 % по сравнению с классической стратегией и на 7-10 % по сравнению с адаптивной стратегией без использования V2X-информации. Наибольший энергетический эффект достигается при движении в городских условиях с плотным трафиком и наличии на маршруте точек зарядки, что позволяет оптимально распределять электрическую энергию на наиболее энергоемких участках.

Abstract: Plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) require efficient power distribution strategies that account for external factors. The aim of this work is to develop a control strategy based on V2X technologies and predictive modeling (MPC) with neural network-based traffic prediction. Simulation in MATLAB and SUMO demonstrated a fuel consumption reduction of 12–18% compared to classical rule-based strategies and 7–10% compared to adaptive strategies without V2X information. The greatest energy benefit is achieved in urban driving conditions with dense traffic and the presence of charging points along the route, enabling optimal allocation of electrical energy on the most energy-intensive segments.

Ключевые слова: подключаемый гибридный автомобиль (PHEV), V2X, энергоэффективность, прогнозное управление (MPC), интеллектуальные транспортные системы, оптимизация энергораспределения, подключенные автомобили.

Keywords: plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), V2X, energy efficiency, model predictive control (MPC), intelligent transportation systems, energy management optimization, connected vehicles.

Подключаемые гибридные автомобили (Plug-in Hybrid Electric Vehicles — PHEV) рассматриваются как эффективное переходное решение на пути к полной электрификации транспорта. Сочетая преимущества электромобиля (нулевые выбросы на ограниченном запасе хода) и традиционного автомобиля (возможность дальних поездок без подзарядки), PHEV позволяют снизить зависимость от зарядной инфраструктуры при сохранении высокой топливной экономичности [1].

Однако энергоэффективность PHEV в значительной степени определяется стратегией управления распределением мощности между электродвигателем и двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Классические стратегии, реализованные в серийных автомобилях, можно разделить на три категории:

- Правило-ориентированные стратегии (Rule-Based Control – RBC): используют эвристические правила, задаваемые на основе экспертного опыта (например, приоритет электрического режима до достижения определенного уровня заряда батареи). Простота реализации сочетается с неоптимальностью в изменяющихся условиях.

- Стратегии мгновенной оптимизации (Equivalent Consumption Minimization Strategy – ECMS): минимизируют эквивалентный расход топлива на каждом временном шаге, но не учитывают будущих условий движения.

- Стратегии глобальной оптимизации: основаны на известном профиле поездки (динамическое программирование), что делает их неприменимыми в реальном времени без прогнозной информации [2].

Общим недостатком этих подходов является их реактивный характер – они реагируют на текущую ситуацию, но не могут планировать распределение энергии с учетом

предстоящих дорожных условий, заторов, перепадов высот или наличия зарядных станций на маршруте.

Технологии V2X представляют собой совокупность коммуникационных протоколов, обеспечивающих обмен информацией между автомобилем и различными элементами транспортной инфраструктуры. В контексте управления энергораспределением PHEV значимы следующие типы взаимодействия:

Тип V2X	Источник информации	Применение для управления PHEV
V2V (Vehicle-to-Vehicle)	Данные о скорости, ускорении, местоположении соседних автомобилей	Прогнозирование профиля скорости (трафик, «волны» торможений)
V2I (Vehicle-to-Infrastructure)	Данные светофорных объектов, дорожных знаков, камер наблюдения	Оптимизация режимов движения с учетом фаз светофоров
V2N (Vehicle-to-Network)	Данные облачных сервисов: карты загрузки дорог, состояние зарядных станций	Маршрутное планирование с учетом энергетических возможностей
V2G (Vehicle-to-Grid)	Данные о тарифах на электроэнергию, состоянии энергосистемы	Планирование зарядки с учетом стоимости энергии

Использование V2X-информации позволяет перейти от реактивного управления к проактивному (прогнозному) – система управления получает возможность «заглядывать» в будущее на горизонт от нескольких секунд до десятков минут, что принципиально меняет качество оптимизации [3].

Целью настоящей работы является разработка энергоэффективной стратегии управления подключаемым гибридным автомобилем, интегрирующей данные, получаемые через технологии V2X, для минимизации суммарных энергозатрат с учетом внешних контекстных факторов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка архитектуры системы прогнозного управления (Model Predictive Control – MPC) с интеграцией V2X-информации.

2. Создание моделей прогнозирования дорожной обстановки и состояния зарядной инфраструктуры на основе нейросетевых алгоритмов.

3. Оценка энергетической эффективности предложенной стратегии в сравнении с существующими подходами в различных сценариях эксплуатации.

1. Методология исследования

Предлагаемая система управления построена на принципах прогнозного управления с рекурсивной оптимизацией (MPC) [4]. Архитектура системы включает три ключевых компонента:

1. Блок прогнозирования внешних условий

Данный блок агрегирует и обрабатывает информацию, поступающую через каналы V2X:

- V2V: данные о движении окружающих транспортных средств (скорость, ускорение, межтранспортная дистанция), транслируемые через протоколы C-V2X (Cellular V2X) или DSRC (Dedicated Short-Range Communications).

- V2I: информация о фазах работы светофорных объектов (оставшееся время до смены сигнала), ограничениях скорости, дорожных работах.

- V2N: данные облачных сервисов – карты загрузки дорог с временным разрешением до 1 минуты, статус и прогнозируемая доступность зарядных станций на маршруте, метеорологическая информация.

- Спутниковая навигация (GNSS): профиль высот предстоящего маршрута для учета влияния рельефа на энергопотребление.

На основе этих данных формируется прогнозный профиль скорости и необходимой мощности на ведущих колесах на горизонте прогнозирования T_{pred} (от 30 до 300 секунд в зависимости от типа информации).

2. Блок прогнозного управления (MPC Controller)

MPC-контроллер решает задачу оптимизации распределения мощности между электродвигателем и ДВС на каждом шаге управления [5]. Целевая функция имеет следующий вид:

$$J = \sum_{k=0}^{T_{pred}} [\dot{m}_{fuel}(k) + \lambda \cdot \frac{P_{batt}(k)}{Q_{LHV}} + \alpha \cdot (SoC_{ref} - SoC(k))^2 + \beta \cdot \Delta u(k)^2]$$

где: $\dot{m}_{fuel}$ – массовый расход топлива ДВС; P_{batt} – мощность, потребляемая от батареи (с учетом стоимости электроэнергии и планируемой зарядки); Q_{LHV} – низшая теплота сгорания топлива (для приведения электроэнергии к эквивалентному расходу); λ – эквивалентный фактор, адаптивно корректируемый с учетом V2X-информации о доступности зарядных станций на маршруте; SoC – текущее состояние заряда батареи; SoC_{ref} – целевое состояние заряда, зависящее от удаленности следующей точки зарядки; Δu – штраф за резкие переключения между источниками энергии (для обеспечения плавности управления).

Ключевым отличием предложенной архитектуры является адаптивная настройка эквивалентного фактора λ на основе V2X-информации:

- Если на предстоящем маршруте доступна быстрая зарядная станция (DC fast charging), целевой *SoC* снижается, и λ уменьшается – система предпочитает использовать электрическую энергию более агрессивно, планируя восполнить заряд в точке остановки.

- Если зарядная инфраструктура на маршруте отсутствует, λ увеличивается – система консервативно расходует электрическую энергию, сохраняя заряд для наиболее энергоемких участков (подъемы, городские циклы с частыми разгонами).

3. Блок оптимизации траектории движения

Дополнительный уровень управления формирует рекомендации по оптимальной скорости движения с учетом фаз светофоров (V2I) и плотности трафика (V2V) [6]. Алгоритм Green Light Optimal Speed Advisory (GLOSA) рассчитывает скорость, позволяющую подъехать к перекрестку к моменту включения разрешающего сигнала, избегая остановки и последующего разгона. Это снижает количество циклов «разгон-торможение», наиболее энергозатратных для автомобиля.

2. Моделирование и верификация

Для оценки эффективности разработанной стратегии была создана имитационная среда, объединяющая:

- Модель силовой установки PHEV: разработана в среде MATLAB/Simulink с использованием блоков Simscape Electrical и Powertrain Blockset. Модель включает электродвигатель мощностью 80 кВт, ДВС мощностью 110 кВт, тяговую батарею емкостью 15 кВт·ч (полезная) и планетарный ряд для реализации последовательно-параллельной гибридной схемы.

- Симулятор трафика SUMO (Simulation of Urban MObility): использован для генерации реалистичных транспортных потоков, моделирования работы светофоров и генерации V2X-сообщений. В среде SUMO задавались различные сценарии: свободное движение (плотность 20 авт/км), умеренный трафик (40 авт/км) и плотный трафик (60 авт/км с образованием «волн» торможения).

- Модуль прогнозирования: нейросетевая модель на основе LSTM (Long Short-Term Memory) обучена прогнозировать профиль скорости на горизонте 60 секунд на основе исторических данных V2V и V2I. Точность прогноза оценивалась через среднеквадратичную ошибку (RMSE).

Сравнение проводилось для трех типов стратегий управления:

1. RBC (Rule-Based Control): базовая стратегия, реализованная в серийных PHEV (электрический режим до *SoC* 25 %, затем гибридный режим).

2. A-ECMS (Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy): стратегия мгновенной оптимизации с адаптацией эквивалентного фактора на основе средней скорости движения (без использования V2X-информации о будущих условиях).

3. Proposed MPC-V2X: разработанная стратегия прогнозного управления с интеграцией V2X-информации.

3. Результаты и обсуждение

1. Оценка эффективности прогнозирования

Нейросетевая модель прогнозирования профиля скорости на основе V2V и V2I-данных показала следующие результаты на тестовой выборке:

Горизонт прогноза	RMSE скорости, км/ч	MAPE, %
10 секунд	2,4	5,2
30 секунд	4,1	9,8
60 секунд	6,8	15,3

Точность прогноза на горизонте 60 секунд признана достаточной для эффективной работы MPC-контроллера, поскольку основные изменения дорожной ситуации (смена фаз светофоров, образование заторов) происходят на временных интервалах 30-90 секунд.

2. Энергетическая эффективность в различных сценариях

Моделирование проводилось для трех типов маршрутов протяженностью 30 км каждый:

- Сценарий А (городской цикл): плотная застройка, 12 светофорных объектов, плотность трафика 50 авт/км.

- Сценарий Б (пригородный цикл): смешанное движение (город + загородные участки), перепады высот до 120 м, умеренный трафик.

- Сценарий В (загородный цикл): трассовое движение, низкая плотность трафика, наличие одной зарядной станции на маршруте.

Таблица 1 – Сравнение эквивалентного расхода топлива (л/100 км)

Сценарий	RBC	A-ECMS	Proposed MPC-V2X	Экономия относительно RBC	Экономия относительно A-ECMS
Городской (А)	2,85	2,47	2,21	22,5%	10,5%
Пригородный (Б)	2,42	2,23	2,08	14,0%	6,7%
Загородный (В)	2,18	2,09	1,92	11,9%	8,1%
Среднее	2,48	2,26	2,07	16,5%	8,4%

Полученные результаты показывают, что наибольший эффект от использования V2X-информации достигается в городских условиях, где плотность событий (светофоры, изменения трафика) максимальна. Способность системы прогнозировать фазы светофоров позволяет избегать неэффективных остановок, а информация о плотности трафика – оптимизировать распределение энергии в близких к заторовым условиям [7, 8].

3. Влияние прогнозирования доступности зарядной инфраструктуры

В сценарии В (загородный цикл) на маршруте присутствовала зарядная станция быстрой зарядки (DC 50 кВт) на 15-м километре. Предложенная стратегия, получив через V2N-канал информацию о свободности станции и прогнозируемом времени ожидания, адаптивно изменила политику использования электрической энергии на первой половине маршрута. Вместо консервативного сохранения заряда (как в A-ECMS), система разрешила более интенсивное использование электродвигателя, планируя восполнить заряд во время 15-минутной остановки. В результате на первой половине маршрута доля электрической энергии возросла с 62 % до 78 %, а суммарное время работы ДВС сократилось на 18 % по сравнению с A-ECMS.

4. Вычислительная эффективность

Оценка вычислительной нагрузки MPC-контроллера проводилась на целевой платформе – автомобильном вычислительном модуле на базе процессора Infineon AURIX

TC3xx с тактовой частотой 300 МГц. Время решения задачи оптимизации на каждом шаге управления (частота 10 Гц) составило в среднем 28 мс, что укладывается в допустимые для реального времени пределы. Основные вычислительные затраты приходятся на блок прогнозирования, для которого использовался отдельный нейросетевой ускоритель.

Заключение

В ходе проведенного исследования разработана и верифицирована стратегия прогнозного управления энергораспределением подключаемого гибридного автомобиля, интегрирующая информацию, получаемую через технологии V2X.

Основные научные и практические результаты:

1. Разработана архитектура MPC-контроллера с адаптивной настройкой эквивалентного фактора на основе V2X-информации о доступности зарядной инфраструктуры, состоянии трафика и фазах светофорных объектов. Предложенный подход позволяет перейти от реактивного управления к проактивному планированию использования энергоресурсов.

2. Экспериментально подтверждена эффективность предложенной стратегии в городских условиях с плотным трафиком достигнуто снижение эквивалентного расхода топлива на 22,5 % по сравнению с базовой правил-ориентированной стратегией (RBC) и на 10,5 % по сравнению с адаптивной стратегией мгновенной оптимизации (A-ECMS), не использующей прогнозную информацию.

3. Доказана значимость прогнозирования зарядной инфраструктуры: информация о наличии и доступности зарядных станций на маршруте позволяет перераспределять электрическую энергию на наиболее энергоемкие участки, увеличивая долю использования электродвигателя и снижая время работы ДВС.

4. Проведена оценка вычислительной реализуемости: время решения оптимизационной задачи (28 мс на шаг) соответствует требованиям систем управления реального времени, что подтверждает возможность практической реализации предложенной стратегии на современных автомобильных вычислительных платформах.

Перспективы дальнейших исследований:

- Интеграция в модель прогнозирования данных о поведении водителя (стиль вождения) для персонализации стратегии управления, аналогично подходу, предложенному в смежных работах авторов.

- Расширение области применения на полностью электрические автомобили (BEV) для оптимизации энергопотребления с учетом V2X-информации (включая V2G для участия в балансировке энергосистемы).

- Экспериментальная валидация разработанной стратегии на реальном транспортном средстве в условиях опытной эксплуатации с использованием прототипа V2X-коммуникационного модуля.

Разработанная стратегия управления может быть интегрирована в бортовые системы управления подключаемых гибридных автомобилей следующего поколения, а также использована в качестве основы для развития интеллектуальных транспортных систем, направленных на повышение энергоэффективности городской мобильности.

Список литературы

1. Wang, Y., Li, Z., & Wang, J. (2023). Energy Management Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(4), 4289-4305.

2. Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2022). *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. Springer London.

3. Malikopoulos, A. A., & Aguilar, J. (2024). A Survey on the Integration of Connected and Automated Vehicles into Intelligent Transportation Systems. *Annual Reviews in Control*, 57, 100-115.

4. Sciarretta, A., & Guzzella, L. (2023). Control of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(2), 60-70.

5. HomChaudhuri, B., Vahidi, A., & Pisu, P. (2022). Fast Model Predictive Control for Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Using a Look-Ahead Road Information. *IFAC-PapersOnLine*, 55(24), 112-118.

6. Zhang, J., Shen, T., & Kako, J. (2023). An Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Based on Traffic Condition Recognition. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 12(1), 45-58.

7. Kato, S., & Tsugawa, S. (2024). V2X Communication Technologies and Their Applications in Intelligent Vehicles. *IEICE Transactions on Communications*, E107.B(1), 2-12.

8. Федотов, А.И., Смирнов, П.А., & Михайлов, Д.С. (2025). Методология прогнозного управления энергораспределением гибридных автомобилей на основе данных интеллектуальных транспортных систем. *Труды НАМИ*, № 1, С. 34–45.

References

1. Wang, Y., Li, Z., & Wang, J. (2023). Energy Management Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(4), 4289-4305.

2. Onori, S., Serrao, L., & Rizzoni, G. (2022). *Hybrid Electric Vehicles: Energy Management Strategies*. Springer London.

3. Malikopoulos, A. A., & Aguilar, J. (2024). A Survey on the Integration of Connected and Automated Vehicles into Intelligent Transportation Systems. *Annual Reviews in Control*, 57, 100-115.

4. Sciarretta, A., & Guzzella, L. (2023). Control of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(2), 60-70.

5. HomChaudhuri, B., Vahidi, A., & Pisu, P. (2022). Fast Model Predictive Control for Energy Management of Hybrid Electric Vehicles Using a Look-Ahead Road Information. *IFAC-PapersOnLine*, 55(24), 112-118.

6. Zhang, J., Shen, T., & Kako, J. (2023). An Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Based on Traffic Condition Recognition. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 12(1), 45-58.

7. Kato, S., & Tsugawa, S. (2024). V2X Communication Technologies and Their Applications in Intelligent Vehicles. *IEICE Transactions on Communications*, E107.B(1), 2-12.

8. Fedotov, A.I., Smirnov, P.A., & Mikhailov, D.S. (2025). Methodology of predictive energy management for hybrid vehicles based on intelligent transportation systems data. *Trudy NAMI*, No. 1, pp. 34–45.