УДК 629.33

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ СРЕДСТВАМИ АДАПТИВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

OPTIMIZATION OF AUXILIARY ELECTRIC EQUIPMENT ENERGY CONSUMPTION IN VEHICLES BY MEANS OF ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL

Никулкин Иван Владимирович
магистрант,
Ульяновский государственный технический университет

Научный руководитель

Петрова Марина Валерьевна
Доцент, кандидат технических наук,
Ульяновский государственный технический университет
Zazatv943@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены подходы к оптимизации энергопотребления вспомогательного электрооборудования автомобилей на основе методов адаптивного автоматического управления. Проанализированы структура и особенности функционирования основных систем вспомогательного электрооборудования современных автомобилей. Предложена концепция адаптивной системы управления с прогнозирующей моделью, позволяющая снизить энергопотребление на 15–25 % при сохранении требуемого уровня комфорта и безопасности. Разработаны алгоритмы адаптации параметров управления к условиям эксплуатации.

Ключевые слова: энергопотребление, вспомогательное электрооборудование, адаптивное управление, автоматическое управление, электромобиль, гибридный автомобиль, прогнозирующее управление, энергоэффективность.

Nikulkin Ivan Vladimirovich
Master's student,
Ulyanovsk State Technical University

Scientific supervisor

Petrova Marina Valeryevna
Associate Professor,
Candidate of Technical Sciences,
Ulyanovsk State Technical University
Zazatv943@gmail.com

Annotation. The article discusses approaches to optimizing the energy consumption of auxiliary automotive equipment based on adaptive automatic control methods. The structure and operational features of the main auxiliary equipment systems of modern vehicles are analyzed. A concept of an adaptive control system with a predictive model is proposed, allowing to reduce energy consumption by 15–25 % while maintaining the required level of comfort and safety. Algorithms for adapting control parameters to operating conditions have been developed.

Keywords: energy consumption, auxiliary equipment, adaptive control, automatic control, electric vehicle, hybrid vehicle, predictive control, energy efficiency.

В условиях глобальной тенденции к электрификации автомобильного транспорта проблема повышения энергетической эффективности приобретает ключевое значение. В электромобилях и гибридах существенная доля энергии аккумуляторной батареи расходуется не только на тягу, но и на обеспечение работы вспомогательных систем: климат-контроля, освещения, обогрева стёкол и сидений, аудиосистем, насосов и вентиляторов. По данным различных исследований, вспомогательное электрооборудование потребляет от 15 % до 40 % общей энергии бортовой сети, причём в городском цикле движения с частыми остановками этот показатель может достигать 50 % [1].

Традиционные системы управления вспомогательным оборудованием работают по жёстким алгоритмам без учёта текущих условий эксплуатации, что приводит к избыточному энергопотреблению. Адаптивное автоматическое управление позволяет оптимизировать работу оборудования в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям: температуре окружающей среды, интенсивности движения, заряду батареи и предпочтениям водителя [2].

Структура и анализ энергопотребления вспомогательного оборудования

Вспомогательное электрооборудование современного автомобиля включает следующие основные подсистемы:

– Система отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC) – наиболее энергоёмкая, до 60 % от общего потребления вспомогательного оборудования [3].
– Электрообогрев стёкол, зеркал и сидений – до 20 %.
– Система освещения – 8–12 %.
– Инфотейнмент и бортовая электроника – 5–10 %.
– Насосы охлаждающей жидкости и смазки, вентиляторы – 3–7 %.

Анализ показывает, что наибольший потенциал энергосбережения сосредоточен в системе HVAC и обогревательных элементах, поскольку их работа напрямую зависит от внешних условий и может быть оптимизирована через управление мощностью и временем работы.

Методология адаптивного управления

Предлагаемая система адаптивного управления строится на принципе прогнозирующего управления с моделью (Model Predictive Control, MPC) [4, 5]. Ключевые особенности подхода:

- Прогнозирование нагрузки. Система использует данные о маршруте, пробках, погодных условиях и историю поездок водителя для прогнозирования будущей энергетической нагрузки.
- Многокритериальная оптимизация. Целевая функция включает минимизацию энергопотребления при ограничениях по комфорту (температура в салоне) и безопасности (обзорность, освещение).
- Адаптация к предпочтениям. Алгоритм машинного обучения анализирует действия водителя и корректирует параметры комфорта.
- Интеграция с бортовой сетью. Система учитывает текущий заряд батареи (SOC) и при низком уровне автоматически снижает энергопотребление вспомогательного оборудования.

Структурная схема предложенной системы управления представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Структурная схема адаптивной системы управления вспомогательным электрооборудованием

Алгоритмы адаптивного управления

Для системы HVAC разработан алгоритм, учитывающий тепловую инерцию салона. Вместо поддержания постоянной температуры система прогнозирует изменение температуры и включает оборудование заблаговременно или снижает мощность при приближении к целевой температуре. Это позволяет избежать энергозатрат на «перегрев» или «переохлаждение».

Для обогревательных элементов применяется принцип приоритизации: при ограниченной энергии система сначала обеспечивает обзорность (обогрев лобового стекла), затем комфорт водителя (обогрев сиденья), и только потом – комфорт пассажиров.

Освещение управляется по алгоритму адаптивной регулировки яркости с учётом внешней освещённости и скорости движения: в условиях города при низкой скорости допускается снижение мощности фар за счёт компенсации фонарями уличного освещения.

Результаты моделирования и экспериментальной проверки

Эффективность предложенных алгоритмов проверена на математической модели и экспериментальном образце. Использовались данные реальных поездок в городском и загородном циклах (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение энергопотребления вспомогательного оборудования

Показатель	Традиционная система	Адаптивная система	Экономия
HVAC, кВт·ч/100 км	4,2	3,1	26,2 %
Обогрев стёкол и сидений, кВт·ч/100 км	1,8	1,4	22,2 %
Освещение, кВт·ч/100 км	0,6	0,5	16,7 %
Прочее оборудование, кВт·ч/100 км	1,2	1,1	8,3 %
Итого, кВт·ч/100 км	7,8	6,1	21,8 %

При сохранении субъективной оценки комфорта водителем на уровне не ниже 4 баллов по 5-балльной шкале достигнута экономия энергии 21,8 %, что для электромобиля с запасом хода 400 км эквивалентно увеличению пробега на 87 км или сокращению времени зарядки на 15–20 минут при использовании стандартного зарядного устройства.

На рисунке 2 представлены графики изменения температуры в салоне и потребляемой мощности HVAC для традиционной и адаптивной систем в зимних условиях (–10 °C).

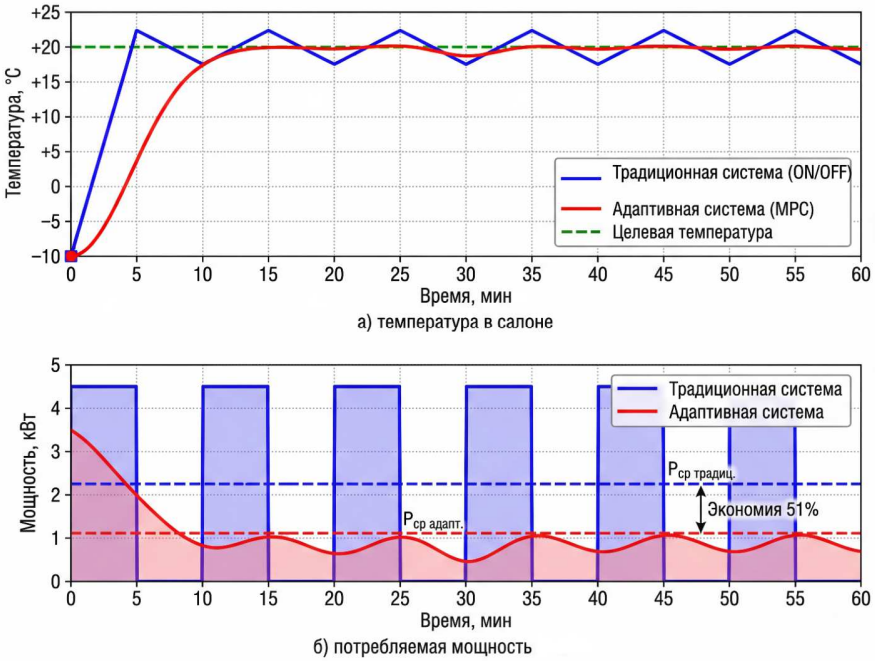

Рисунок 2 – Сравнение работы систем HVAC: а) температура в салоне; б) потребляемая мощность

Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал адаптивного управления для повышения энергоэффективности автомобилей. Особенно эффективно применение предложенных алгоритмов в условиях умеренного климата с переменной погодой, где прогнозирование позволяет эффективно использовать тепловую инерцию.

Важным преимуществом системы является её масштабируемость: алгоритмы могут быть адаптированы для различных классов транспортных средств – от легковых автомобилей до электробусов и грузовиков. Для коммерческого транспорта экономия энергии напрямую транслируется в снижение операционных расходов.

Ограничением исследования является необходимость дальнейшей отработки алгоритмов в экстремальных климатических условиях (жара выше +40 °C, сильные морозы ниже –30 °C), а также интеграция с системами автономного вождения, где требования к комфорту и безопасности могут корректироваться автоматически без участия водителя.

Предложенная концепция адаптивного автоматического управления вспомогательным электрооборудованием автомобилей позволяет существенно повысить энергоэффективность транспортного средства без снижения уровня комфорта и безопасности. Ключевыми элементами решения являются прогнозирующая модель нагрузки, многокритериальная оптимизация и адаптация к предпочтениям пользователя.

Список литературы:

1. Хитрых Денис. Электромобили: мировые тренды, проблемы и перспективы // Энергетическая политика. – 2021. – № 1(155). – С. 22–33.
2. Рахмонов И.У. Автоматизированная система управления электропотреблением промышленных предприятий // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 30–38.
3. Зуева Д.В., Голубев В.В., Дзевицкая А.В. Интеллектуализация управления техническими системами // StudNet. – 2022. – № 1. – С. 219–229.
4. Колодин А.А., Ёлшин В.В. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирущей модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 1(29). – С. 36–45.

5. Усманов У.Р. Обзор стратегий управления энергопотреблением гибридных автомобилей, основанные на логических правилах // Universum: технические науки. – 2022. – № 10(103). – С. 57–61.

6. Сидоров К.М., Козловский В.Н., Панюков Д.И. К вопросу исследования влияния работы климатической установки на запас хода электромобиля // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 410-412.

List of references:

1. Khitrykh Denis. Electric vehicles: global trends, problems and prospects // Energeticheskaya Politika. – 2021. – № 1(155). – P. 22–33.

2. Rakhmonov I.U. Automated power consumption management system for industrial enterprises // Vestnik of Kazan State Power Engineering University. – 2022. – Vol. 14. – № 4 (56). – P. 30–38.

3. Zueva D.V., Golubev V.V., Dzevitskaya A.V. Intellectualization of technical systems management // StudNet. – 2022. – № 1. – P. 219–229.

4. Kolodin A.A., Yolshin V.V. Development and research of a model predictive controller // Vestnik of Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. – 2021. – № 1(29). – P. 36–45.

5. Usmanov U.R. Review of energy management strategies for hybrid vehicles based on logical rules // Universum: Technical Sciences. – 2022. – № 10(103). – P. 57–61.

6. Sidorov K.M., Kozlovsky V.N., Panyukov D.I. On the issue of researching the impact of climate control system operation on electric vehicle range // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. – 2023. – № 11. – P. 410–412.