

Научная статья
УДК 629.33
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>
EDN: LRLUCM



СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

А. В. Пузаков

Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург, Россия

And-rew78@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9754-8165>

АННОТАЦИЯ

Введение. Для оптимального функционирования системы электроснабжения автомобиля необходимо совершенствовать принципы и стратегии управления. В основе принципов управления может лежать постоянство напряжения, обеспечение заряженности батареи, снижение расхода топлива и т.п.

Материалы и методы. Отличительной особенностью стратегии управления первого уровня является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению стратегии управления второго уровня, направленной на обеспечение заряженности стартерной батареи, что достигается организацией взаимодействия электронного блока управления двигателя с генератором. В стратегии управления третьего уровня на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля. Рассмотрены целевые функции перечисленных стратегий управления.

Результаты. Предложена стратегия управления четвертого уровня, целью которой является снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрена структура затрат на эксплуатацию системы электроснабжения, в которые входят затраты на перерасход топлива, вызванный неисправностями в работе агрегатов, а также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

Обсуждение и заключение. Практическое применение предложенной стратегии позволит учесть все виды затрат и минимизировать расходы на эксплуатацию системы электроснабжения как автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, так и гибридных автомобилей и электромобилей, в которых электроэнергия имеет еще большую значимость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система электроснабжения автомобиля, автомобильный генератор, аккумуляторная батарея, целевая функция, стратегии управления, напряжение бортовой сети

БЛАГОДАРНОСТИ: выражаю благодарность анонимным рецензентам.

Статья поступила в редакцию 10.08.2023; одобрена после рецензирования 20.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Пузаков А. В. Стратегии управления системой электроснабжения автомобилей // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 474-486. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>

© Пузаков А. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>
EDN: LRLUCM

VEHICLE POWER SUPPLY MANAGEMENT STRATEGIES

Andrei V. Puzakov

Orenburg State University,
Orenburg, Russia

And-rew78@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9754-8165>

ABSTRACT

Introduction. To optimize the performance of the vehicle electrical system, it is necessary to improve the control principles and strategies. The control principles may be based on voltage constancy, ensuring battery charge, reducing fuel consumption, etc.

Materials and methods. A distinctive feature of the first level control strategy is the absence of additional sensors in the power supply system. Their occurrence led to the emergence of the second level control strategy aimed at ensuring the starter battery charge, which is achieved by organizing the interaction between the electronic engine control unit and the generator. In the control strategy of the third level the first place is given to the reduction of the vehicle fuel consumption. The target functions of the listed control strategies are considered.

Results. The fourth level management strategy, the purpose of which is to reduce the costs of power supply system operation at all stages of the life cycle, is proposed. The structure of power supply system operation costs is considered, which includes the costs of fuel overconsumption caused by malfunctions in the operation of units, as well as the costs of maintenance, diagnostics, repair (replacement) and utilization.

Discussion and conclusions. Practical application of the proposed strategy will make it possible to take into account all types of costs and minimize the cost of operating the power supply system for both vehicles with internal combustion engines and hybrid and electric vehicles, in which electricity is even more important.

KEYWORDS: vehicle power supply system, automotive generator, battery, target function, control strategies, on-board voltage

ACKNOWLEDGEMENT. I express my gratitude to anonymous reviewers.

The article was submitted 10.08.2023; approved after reviewing 20.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Andrei V. Puzakov Vehicle power supply management strategies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 474-486. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-474-486>

© Puzakov A. V., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития транспортных средств характеризуется значительным увеличением числа электрифицированных устройств, отвечающих за безопасность движения, автоматизацию рабочих процессов, комфортабельность салона и т.д. Мировая тенденция роста мощности потребителей электроэнергии на борту автомобилей составляет 15–20% за каждые 3–4 года. Рост мощности генераторов при сохранении воздушного охлаждения ограничен величиной 3–4 кВт.

Однако рост мощности генератора приведет к увеличению затрат энергии (топлива) на его привод относительно текущих 10–20% мощности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1]. К тому же генераторы большой мощности сложно разместить в условиях плотной компоновки подкапотного пространства. Сейчас при высоких требованиях к установленной мощности автопроизводители устанавливают два генератора на легковые и легкие коммерческие автомобили и три и более на автобусы большой вместимости.

Для увеличения возможностей хранения электроэнергии на борту автомобиля используют суперконденсаторы и литий-ионные батареи. Они позволяют запасать электроэнергию в процессе торможения транспортного средства.

Таким образом, непрерывно усложняющаяся система электроснабжения стала одной из наиболее важных систем автомобиля и для оптимального её функционирования необходимо совершенствовать принципы и стратегии управления.

В работах [1, 2] выполнен обзор стратегии управления электроэнергией с точки зрения их реализации на автомобилях с указанием достоинств и недостатков. Предложена собственная стратегия, реализованная в интеллектуальных регуляторах напряжения, позволяющая снизить расход топлива за счет периодической деактивации генератора.

В статье [3] проведены экспериментальные исследования и моделирование влияния генератора на экономию топлива. В результате в автомобиле с управляемым генератором можно добиться экономии топлива на 0,64% по сравнению с автомобилем с обычным генератором в условиях нового европейского ездового цикла.

Авторы работы [4] разработали интеллектуальную систему управления генератором, с помощью которой реализовано использование

энергии торможения. Результаты эксперимента на автомобиле показали, что с помощью этой системы расход топлива можно снизить примерно на 2–3%.

Исследование [5] направлено на экспериментальный анализ генератора, оснащенного системой механической развязки коленчатого вала ДВС. Система состоит из интегрированного шкива с электромагнитной муфтой. Развязка производится по степени заряженности аккумуляторной батареи и условиям работы ДВС. В испытаниях, проведенных с легковым автомобилем, было получено снижение энергопотребления на 2,8% в совмещенном городском и шоссейном циклах.

В работах [6, 7] принцип минимума Понtryгина применяется для решения задачи оптимального управления электроэнергией в транспортных средствах. Стратегия управления может изменять мощность интеллектуального генератора и аккумуляторной батареи в зависимости от изменения электрической нагрузки и условий движения в режиме реального времени. Экспериментальные результаты показывают, что по сравнению с традиционной стратегией управления без обратной связи, предлагаемая стратегия управления может эффективно снизить расход топлива, который уменьшается примерно на 1,7%.

В статье [8] предлагается стратегия снижения расхода топлива за счет зарядки аккумуляторной батареи с использованием остаточной кинетической энергии при торможении. Стратегия предлагает один из трех режимов управления, таких как зарядка, удержание и разрядка, в зависимости от состояния движения транспортного средства. Режим управления определяет мощность, вырабатываемую генератором переменного тока путем регулирования величины крутящего момента.

Цель статьи [9] состоит в том, чтобы улучшить эффект экономии топлива от системы Старт-Стоп путем оптимизации стратегии управления при различных ездовых циклах. В статье проанализирована причина неэффективной остановки на холостом ходу и предложены два параметра управления (время задержки действия и установленный порог скорости), которые использовались для предотвращения неэффективной остановки на холостом ходу и частых проблем с запуском-остановкой. Были выбраны четыре типичных ездовых цикла и предложена многорежимная стратегия управления, которая может улучшить эффект экономии топлива.

В статье [10] исследуются преимущества электрических нагрузок с гибким потреблением мощности. На основе методов оптимизации представлены оптимальная офлайн-стратегия, а также каузальная онлайн-стратегия. Реальные эксперименты на роликовом динамометрическом стенде подтверждают правильность стратегии. Измеренная прибыль от экономии топлива достигает 2,6% при минимальных изменениях в оборудовании автомобиля.

В работе [11] исследуется система управления электроэнергией, необходимая для координации потоков мощности в системе электроснабжения. Для того чтобы подача напряжения не была недостаточной для критически важных с точки зрения безопасности потребителей, можно отключить некоторые потребители комфорта. Заключительные измерения показывают, что метод способен увеличить напряжение в наиболее критических ситуациях системы электроснабжения примерно на 0,6 В.

Анализируя рассмотренные и другие публикации [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19], можно сделать вывод, что в большинстве случаев в них исследуется задача снижения расхода топлива или повышения напряжения бортовой сети на основе управления генератором или потребителями электроэнергии. В тоже время не выполнен комплексный анализ актуальных и ранее применявшихся стратегий управления с целью разработки перспективных стратегий, объединяющих в себе достоинства предыдущих.

Целью статьи является рассмотрение существующих задач и принципов управления системой электроснабжения, формирование целевых функций и разработка стратегии более высокого иерархического уровня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Следует различать задачи и стратегии управления системой электроснабжения. Стратегии носят более глобальный характер и за все время существования системы электроснабжения изменялись незначительно. На сегодняшний день можно выделить три стратегии управления, расположив их в иерархическом порядке.

Стратегия первого уровня возникла в начале XX века вместе с появлением на автомобиле электрических машин для выработки электроэнергии путем преобразования механической энергии двигателя – *генераторов*. Так как напряжение генератора пропорцио-

нально частоте вращения ротора, появилась задача ограничения напряжения с целью сохранения ресурса ламп системы освещения и аккумуляторной батареи. Затем данная задача была дополнена необходимостью исключить перезаряд батареи при высоких температурах и повысить эффективность заряда при низких температурах (термокомпенсация).

Дальнейшее изменение в конструкции генераторов было вызвано необходимостью решить проблему разряда батареи на обмотку возбуждения генератора при включенном зажигании и неработающем двигателе. Это привело к появлению в конструкции выпрямителя дополнительного плеча диодов, предотвращающих разряд батареи. Параллельно решалась задача оповещения водителя о возникновении нештатных ситуаций в системе электроснабжения, сначала с помощью амперметра (наиболее информативного прибора), затем с помощью вольтметра, и наконец сейчас с помощью контрольной лампы, диагностические возможности которой ограничены [20].

Внедрение в конструкцию генераторов многофункциональных регуляторов напряжения позволило решить еще несколько задач. Для исключения негативного влияния тормозящего действия генератора на процесс запуска ДВС активация генератора происходит с помощью сигнала от электронного блока управления двигателем. Одновременное включение ряда мощных потребителей сопровождается плавным нарастанием тока нагрузки для снижения просадки напряжения бортовой сети.

Рассмотрим целевые функции стратегии управления первого уровня.

Постоянство напряжения бортовой сети обеспечивается путем регулирования тока обмотки возбуждения автомобильного генератора при вариации нагрузки и частоты вращения ротора. Преимущества: сравнительно простая схемная реализация. Недостатки: снижение возможности заряда батареи при низких температурах и возможность перезаряда батареи при высоких температурах. Такая схема регулирования широко использовалась на автомобильных генераторах до конца 80-х годов прошлого века.

$$U_{BC} = U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} = \text{const},$$

$$I_B = \frac{U_{\Gamma}}{C_e \cdot n_{\text{ДВС}} \cdot i_{\Gamma} \cdot w_B \cdot \left(1 - \frac{r_{\Gamma}}{R_H}\right)}, \quad (1)$$

где U_{Γ} – текущее напряжение генератора, В; $U_{\Gamma}^{\text{НОМ}}$ – номинальное (диапазон регулирования)

напряжение генератора, $U_{Г}^{НОМ} = 14.0 \pm 0.4$ В; $r_{Г}$ – внутреннее сопротивление автомобильного генератора, Ом; $R_{Н}$ – сопротивление нагрузки, Ом; C_e – конструктивная постоянная автомобильного генератора; $n_{ДВС}$ – частота вращения автомобильного двигателя, 1/мин; $i_{Г}$ – передаточное отношение ременной (зубчатой) передачи вал двигателя – вал ротора генератора; $w_{В}$ – число витков обмотки возбуждения автомобильного генератора.

Регулирование напряжения бортовой сети с учетом температуры окружающего воздуха обеспечивается на основе информации от датчика температуры генератора (встроен в регулятор напряжения) или от внешнего датчика температуры батареи.

Преимущества: сравнительно простая схемная реализация. Недостатки: температура генератора в процессе работы повышается значительно быстрее температуры батареи. Так как по мере повышения температуры генератора его напряжение снижается, то в холодное время это не позволяет компенсировать разряд батареи на запуск двигателя и работу нагревательных устройств.

$$U_{BC} = U_{Г}^{НОМ} + k_t \cdot T_{Г(Б)},$$

$$I_{В} = \frac{\left(\frac{U_{Г}}{\left(1 - \frac{r_{Г}}{R_{Н}}\right)} - k_t \cdot T_{Г(Б)} \right)}{C_e \cdot n_{ДВС} \cdot i_{Г} \cdot w_{В}}, \quad (2)$$

где k_t – коэффициент терморегулирования напряжения генератора. Обычно составляет (-10 мВ/°С); $T_{Г(Б)}$ – температура генератора (батареи), °С.

Отличительной особенностью стратегии первого уровня, как правило, является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению **стратегии второго уровня**.

Необходимым условием обеспечения заряженности аккумуляторной батареи является оперативное измерение ее напряжения, силы тока и температуры. Что касается измерения температуры батареи, то достаточно измерения температуры полюсного вывода (терминала) батареи, так как скорость изменения и числовые значения его температуры и температуры электролита практически совпадают.

Для измерения вышеперечисленных параметров используется комбинированный датчик аккумуляторной батареи (Intelligent Battery Sensor), который включает в себя чувствительные элементы для измерения температуры батареи, силы тока и напряжения, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор для обработки данных в режиме реального времени и сетевой интерфейс для передачи импульсных сигналов в блок управления двигателем/генератором.

Основной принцип мониторинга состояния аккумуляторной батареи заключается в отслеживании ее способности к последующему запуску автомобильного двигателя. Причиной появления в составе системы электроснабжения датчика аккумуляторной батареи стало внедрение системы Старт-Стоп. Работа системы подразумевает остановку автомобильного двигателя при снижении скорости движения транспортного средства до нуля. По замыслу разработчиков это позволит снизить время работы автомобильного двигателя на холостых оборотах и повысить тем самым топливную экономичность с одновременным снижением токсичности отработавших газов.

Для компенсации затраченной энергии на запуск автомобильного двигателя необходимо от 5 до 15 мин работы генератора, в зависимости от температуры окружающей среды. Если остановки автомобиля происходят чаще, заряженность батареи снижается (рисунок 1). Критическое значение заряженности батареи определяется температурой окружающей среды.

Вычисление степени заряженности батареи на борту автомобиля является нетривиальной задачей, поскольку точное определение возможно при обесточивании цепи аккумуляторной батареи. Однако отключение батареи на борту автомобиля неприемлемо, так как способно привести к выходу из строя потребителей и требует прописки батареи после включения в блоке управления.

На сегодняшний день сложилась следующая последовательность вычисления степени заряженности¹. На первом этапе, при включении зажигания вычисляется начальное значение степени заряженности.

¹ Пузаков А. В. Концепция оперативного мониторинга системы электроснабжения автомобиля // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции. Оренбург: ОГУ. 2019. С.515 – 522.

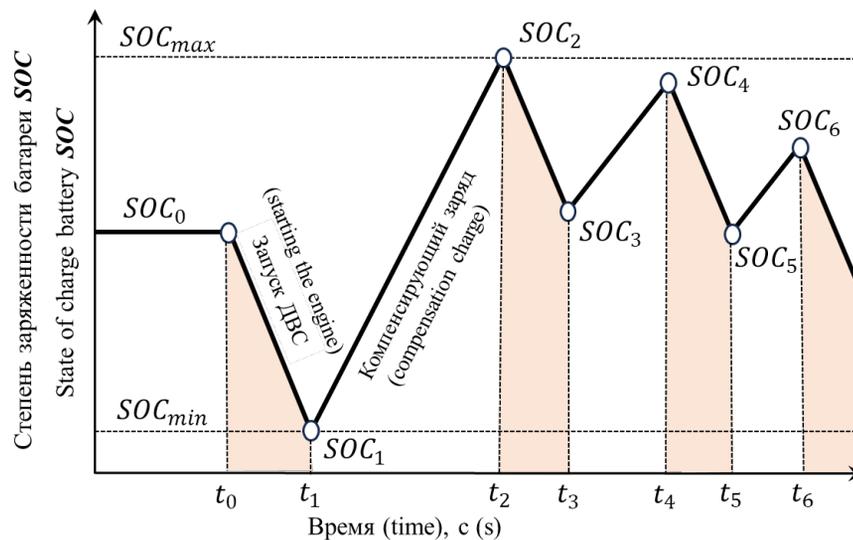


Рисунок 1 – Динамическое изменение степени заряженности батареи
Источник: составлено автором

Figure 1 – Dynamic change of battery charge level
Source: compiled by the author

$$SOC_0 = \frac{OCV - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}, \quad (3)$$

где OCV – напряжение разомкнутой цепи батареи; U_{\max} – максимальное значение напряжения, соответствующее полностью заряженной батарее, В; U_{\min} – минимально допустимое напряжение батареи, В.

Затем с помощью датчика тока непрерывно измеряется величина и направление (заряд/разряд) тока батареи [21]. Интегрируя полученные значения с учетом временных интервалов, получают заряд, полученный или затраченный в процессе эксплуатации и определяют абсолютное приращение степени заряженности батареи.

$$SOC_i = SOC_0 \pm \Delta SOC = SOC_0 \pm \frac{1}{C_{20}} \int I_B \cdot dt, \quad (4)$$

где SOC_i – текущее значение степени заряженности батареи; SOC_0 – начальное (исходное) значение степени заряженности батареи; ΔSOC – изменение степени заряженности батареи в процессе работы; C_{20} – номинальная ёмкость батареи, А·ч; I_B – зарядный (разрядный) ток батареи, А.

Высокая нагрузка на генератор на холостом ходу приводит к неравномерности работы

двигателя и разряду аккумуляторной батареи. Взаимодействие системы электроснабжения с электронным блоком управления двигателя позволяет повысить частоту вращения холостого хода.

Оптимизация мощности потребителей возможна с помощью динамического включения/отключения энергоёмких устройств. Примером решения такой задачи можно считать отключение потребителей с низким приоритетом в случае дефицита электроэнергии, реализованное на автомобилях высокого класса.

Кроме того, суммарная потребляемая мощность может быть снижена за счет правильно организованного управления потребителями. Сюда можно отнести ограничение включения мощных потребителей (например, отключение обогрева и электропривода зеркал в то время, когда включается насос антиблокировочной тормозной системы). Пример подобного управления приведен на рисунке 2.

Еще одним преимуществом взаимосвязи генератора и ЭБУ двигателя можно считать бортовое диагностирование ряда неисправностей генератора, направленное на предупреждение водителя о возможности обесточивания автомобиля и прекращении движения².

² Пузаков А. В. Бортовое диагностирование системы электроснабжения автомобилей // Прогрессивные технологии в транспортных системах: Евразийское сотрудничество: сборник материалов XV Международной научно-практической конференции. Оренбург, ОГУ. 2020. С. 497 – 504.

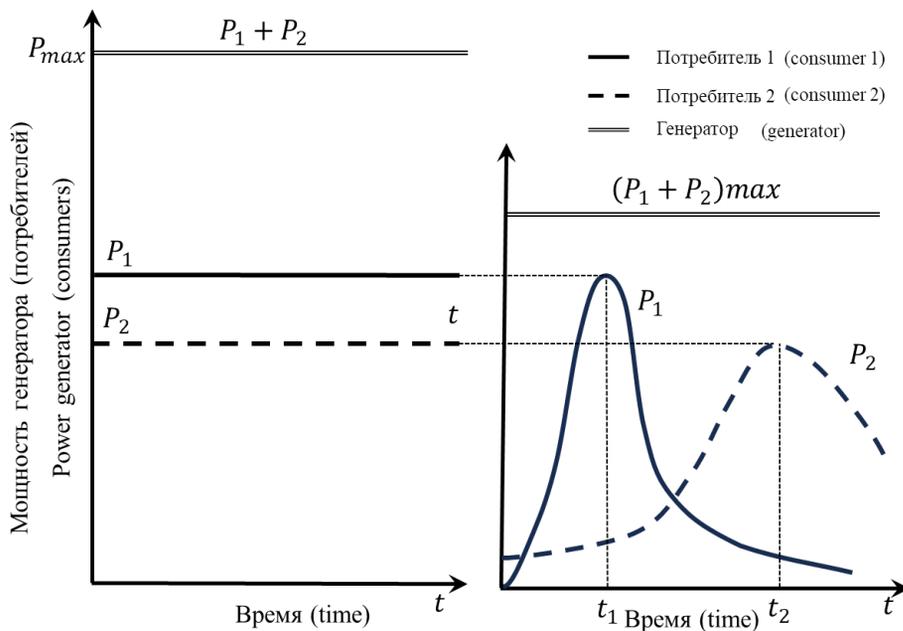


Рисунок 2 – Пример регулирования мощности нагрузки³

Figure 2 – Example of load power regulation

Целевая функция стратегии второго уровня заключается в постоянстве напряжения бортовой сети и максимизации заряженности батареи для выполнения запусков автомобильного двигателя. Это достигается асинхронностью напряжений генератора и аккумуляторной батареи

$$U_{\Gamma} = U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} = \text{const},$$

$$U_{\Gamma} = (C_e \cdot n_{\text{ДВС}} \cdot i_{\Gamma} \cdot I_B \cdot w_B + k_t \cdot T_{\Gamma}) \cdot \left(1 - \frac{r_{\Gamma}}{R_H}\right); \quad (5)$$

Если степень заряженности батареи падает ниже критической, понижается температура батареи или снижается её функциональность, оцениваемая степенью работоспособности система Старт-Стоп деактивируется. Еще одним критерием деактивации является включение кондиционера. После деактивации целевая функция будет аналогична рассмотренной выше.

$$T_B \leq T_B^{\text{КРИТ}};$$

$$U_B \leq 0.5 \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) + U_{\text{min}}; \quad (6)$$

$$SOH_i = \frac{U_{cr} - U_0}{U_{new} - U_0} \leq SOH_{кр},$$

где SOH_i – текущее значение степени работоспособности батареи; U_{cr} – минимальное напряжение в процессе запуска двигателя, В; U_0 – минимально необходимое напряжение в процессе запуска двигателя, В; U_{new} – минимальное напряжение в процессе запуска двигателя новой батареей, В; $SOH_{кр}$ – минимальное (критическое) значение степени работоспособности батареи.

Таким образом, стратегия второго уровня в целом направлена на обеспечение заряженности стартерной (пусковой) батареи и достигается оснащением автомобиля дополнительными датчиками и организацией взаимодействия ЭБУ двигателя с автомобильным генератором.

³ Ютт В. Е. Электрооборудование автомобилей и электромобилей: учебник для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2019. – 480 с.

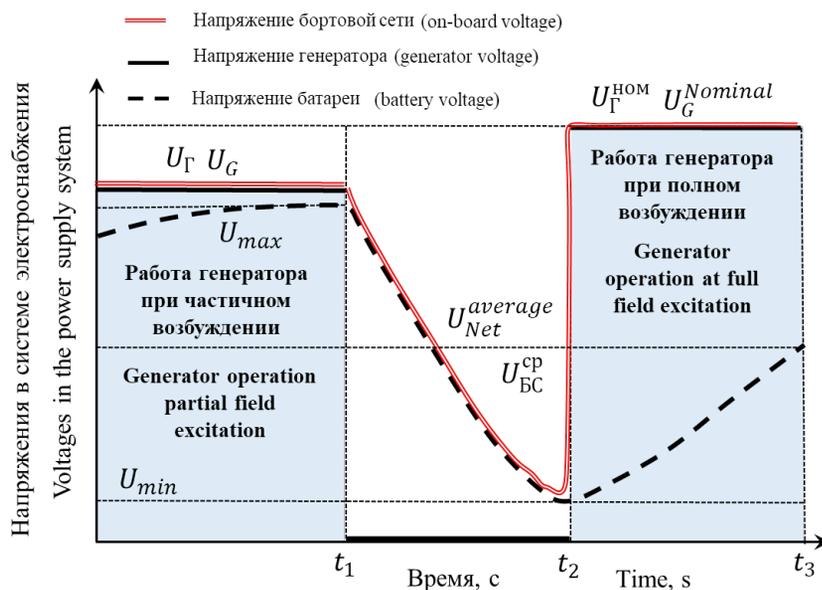


Рисунок 3 – Изменение напряжений в системе электроснабжения при периодическом отключении генератора
Источник: составлено автором

Figure 3 – Change of voltages in the power supply system at periodic generator shutdown
Source: compiled by the author

Стратегия третьего уровня часто пересекается с предыдущей, однако на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля^{4,5} [22, 23, 24, 25]. Поскольку уровень выбросов отработавших газов напрямую связан с расходом топлива, одновременно решается задача снижения токсичности автомобиля.

В этом случае кратковременным снижением заряженности батареи можно пренебречь. Часто для управления генератором применяется отдельный блок управления, взаимодействующий с датчиком батареи и ЭБУ двигателя с помощью цифровых шин передачи данных. Внедрение ряда энергоёмких потребителей (электромеханический стабилизатор, электронагреватель отработавших газов, отопитель высокой мощности) потребовало увеличения уровня напряжения бортовой сети.

Для повышения динамических свойств автомобиля возможно отключение генератора во время ускорения. Достигается командами элек-

тронного блока управления двигателем, который отключает ток возбуждения генератора.

Одним из нововведений является рекуперация электроэнергии в процессе замедления автомобиля. Возникающую при преобразовании кинетической энергии движущегося автомобиля электрическую энергию необходимо эффективно запастись. Традиционные свинцово-кислотные батареи в этом случае практически бесполезны, используются литий-ионные батареи и двойнослойные электрохимические конденсаторы (суперконденсаторы) [26]. Появилась задача эффективного распределения электроэнергии между накопителями разного типа.

Произошла трансформация задачи обеспечения заряженности батареи, так как для эффективной рекуперации необходима степень заряженности менее 100% (как правило, около 80%). Это требует периодического снижения выработки электроэнергии путем ослабления возбуждения или полного отключения генератора (рисунок 3).

⁴ Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т. У. Асмус, К. Боргнакке, С. К. Кларк [и др.]; под ред. Д. Хиллиарда, Дж. С. Спрингера; пер. с англ. А. М. Васильева; под ред. А. В. Кострова. М.: Машиностроение, 1988. 504 с.

⁵ Влияние электрических потребителей на расход топлива автомобиля / Т. Т. Амрин, А. А. Мелентьев, Б. Т. Нукубаев, А. Н. Чебоксаров // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24 – 25 ноября 2022 г. Омск. 2022. С. 115 – 118. EDNNKBТNP

Целевой функцией стратегии третьего уровня является снижение расхода топлива на привод генератора, для чего необходимо снизить вырабатываемую им мощность. Это можно реализовать двумя способами: периодически отключать ток возбуждения с целью снижения выходного напряжения генератора или снизить нагрузку путем отключения части потребителей. В качестве ограничения этой стратегии управления выступает степень заряженности батареи, которая не должна быть меньше критической.

$$g_e \rightarrow \min; g_e = g_0 + k_p \cdot P_{\Gamma}^i; \\ P_{\Gamma}^i = I_{\Gamma}^i \cdot (U_{\Gamma}^{\text{НОМ}} - I_{\Gamma}^i \cdot r_{\Gamma}); U_{\Gamma}^{\text{min}} = \alpha \cdot U_{\Gamma}^{\text{НОМ}}; \quad (7) \\ U_{\Gamma}^{\text{min}} = SOC_{\text{крит}} \cdot (U_{\text{max}} - U_{\text{min}}) + U_{\text{min}},$$

где g_e – расход топлива, л/100 км; g_0 – часть расхода топлива, не зависящая от работы (деактивации) генератора, л/100 км; k_p – коэффициент, учитывающий влияние мощности потребителей на расход топлива на привод генератора, л/(100 км·Вт); P_{Γ}^i – текущая мощность генератора, Вт; I_{Γ}^i – текущее значение силы тока генератора, А; α – коэффициент заполнения импульса тока возбуждения генератора ($\alpha = 0 \dots 100\%$).

Особенностью рассмотренных выше стратегий является отсутствие практического решения ещё одной актуальной задачи, связанной с изменением технического состояния агрегатов системы электроснабжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Следующая стратегия развивает предыдущую и логически из нее вытекает. Помимо затрат на топливо в процессе эксплуатации системы электроснабжения возникают и другие затраты. Следовательно, снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла – стратегия управления следующего иерархического уровня (рисунок 4).

На современном этапе развития вычислительной техники возможен контроль эффективности работы системы электроснабжения, численно равной отношению мощности источников электроэнергии к мощности ДВС, расходуемой на привод автомобильного генератора [25].

$$E = \frac{P_2}{P_1}, \quad (8)$$

где P_1 – потребляемая мощность (затраты на привод генератора), кВт; P_2 – мощности источников электроэнергии, кВт.

$$P_2 = P_{\Gamma} \pm P_{\text{АКБ}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{АКБ}}$ – зарядная или разрядная мощность батареи, кВт.

Снижение энергоэффективности системы электроснабжения в процессе эксплуатации обусловлено возникновением неисправностей и естественным износом (старением) основных агрегатов. При этом изменяется как полезная, так и потребляемая мощность.

Прогнозирование изменения технического состояния с вычислением остаточного ресурса агрегатов возможно на основе учета внутреннего омического сопротивления. При этом необходима информация о напряжениях и силе тока в ключевых точках бортовой сети и устройство для её обработки. Возможно добавление соответствующего программного обеспечения в блок управления генератором или оснащение системы электроснабжения дополнительным бортовым устройством.

Затраты на эксплуатацию системы электроснабжения включают в себя помимо затрат на этапе нормальной эксплуатации также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{ТОР}} \pm C_{\text{топл}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{экспл}}$ – затраты на эксплуатацию системы электроснабжения, р.; $C_{\text{топл}}$ – экономия (перерасход) топлива в процессе эксплуатации системы электроснабжения, р.; $C_{\text{ТОР}}$ – затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию агрегатов системы электроснабжения, р.

$$C_{\text{топл}} = \frac{N \cdot L_{\text{год}}}{100} \cdot \Delta g_e \cdot \Pi_{\text{топл}}, \quad (11)$$

где Δg_e – экономия (перерасход) топлива при работе системы электроснабжения относительно нормативного, л/100 км; $\Pi_{\text{топл}}$ – стоимость одного литра топлива, р.

$$C_{\text{ТОР}} = C_{\text{ТО}} + \sum_{i=1}^m C_{\text{д}} + \sum_{j=1}^k C_{\text{р}} + C_{\text{ут}}. \quad (12)$$

Техническое обслуживание системы электроснабжения включает в себя оценку технического состояния аккумуляторной батареи, долив или замену электролита, а также профилактическую зарядку. Техническое обслуживание генератора, как правило, не проводится. Периодичность таких мероприятий прописана в регламенте процедур технического обслуживания автомобилей. В случае коммерческой эксплуатации автомобилей или эксплуатации в тяжелых условиях периодичность техниче-

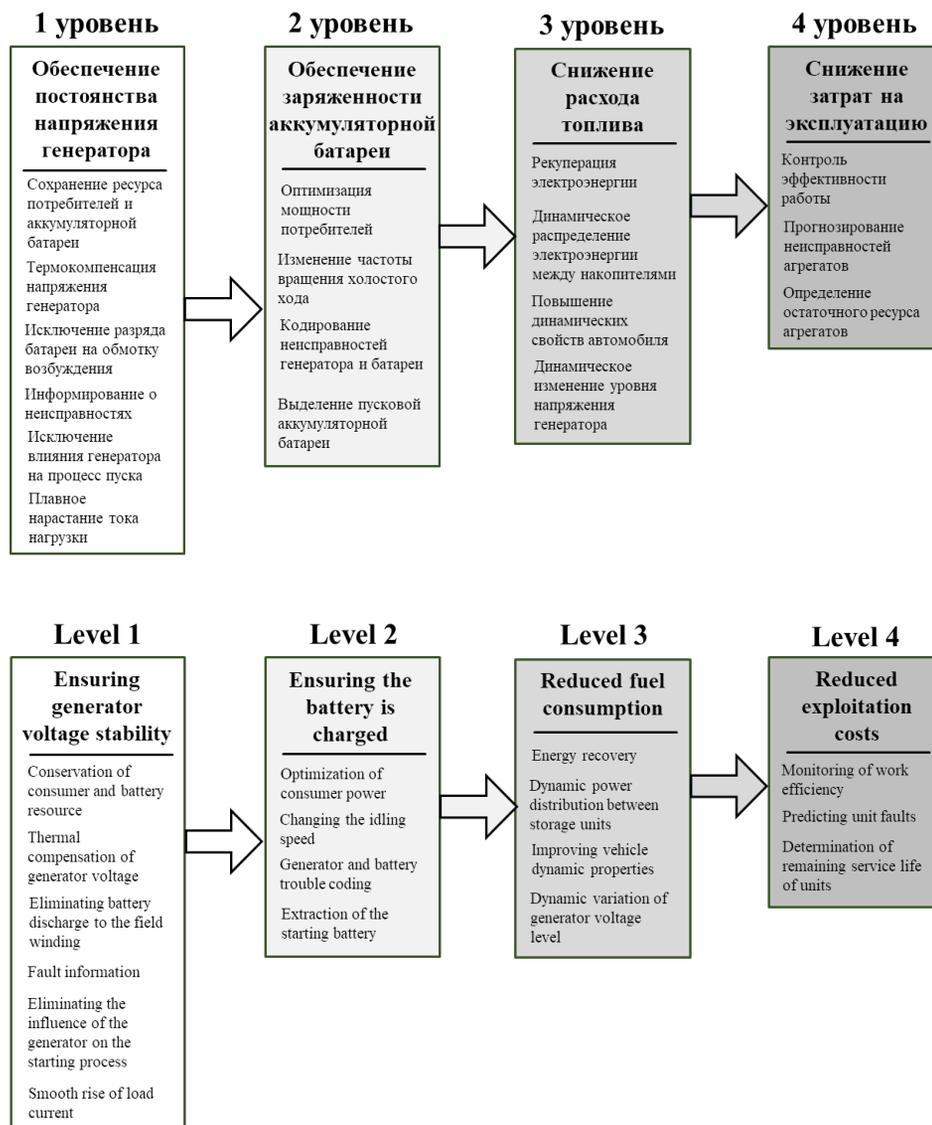


Рисунок 4 – Стратегии и задачи управления системой электроснабжения автомобилей
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Strategies and challenges of managing the vehicle power supply system
 Source: compiled by the author.

ского обслуживания аккумуляторных батарей должна быть снижена для предотвращения внезапного выхода из строя.

$$C_{ТО} = N \cdot \left(\frac{L_{год}}{L_{ТО}} \cdot C_{ТО} + 2 \cdot C_{СО} \right), \quad (13)$$

где $C_{ТО}$ – затраты на техническое обслуживание, р.; N – количество лет эксплуатации; $L_{год}$ – годовой пробег автомобиля, тыс. км; $L_{ТО}$ – периодичность технического обслуживания, тыс. км; $C_{ТО}$ – стоимость сезонного обслуживания, р.; $C_{СО}$ – стоимость сезонного обслуживания, р.

Затраты на диагностирование

$$\sum_{i=1}^m C_D = N \cdot \frac{L_{год}}{L_D^i} \cdot C_D^i, \quad (14)$$

где $\sum C_D$ – суммарные затраты на диагностирование, р.; L_D^i – периодичность диагностирования i -го агрегата, тыс. км; C_D^i – стоимость диагностирования i -го агрегата, р.; m – число диагностируемых агрегатов.

Затраты на ремонт (замену)

$$\sum_{j=1}^k C_P = \frac{p_P(L) \cdot N \cdot L_{год}}{RS_{арп}^j} \cdot (C_P^j + C_{арп}^j), \quad (15)$$

где ΣC_p – суммарные затраты на ремонт (замену) агрегатов, р.; $p_p(L)$ – вероятность ремонта агрегатов от пробега; $RS_{\text{агр}}^j$ – ресурс работы j -го агрегата до ремонта (замены), тыс. км; Π_p^j – стоимость ремонта (замены) j -го агрегата, р.; $\Pi_{\text{агр}}^j$ – стоимость нового агрегата, р.

Затраты на утилизацию

$$C_{\text{ут}} = \frac{n \cdot N \cdot L_{\text{год}}}{RS_B} \cdot (\Pi_B + \Pi_{\text{ут}}), \quad (16)$$

где $C_{\text{ут}}$ – затраты на утилизацию аккумуляторных батарей, р.; RS_B – ресурс работы аккумуляторных батарей, тыс. км; n – количество установленных аккумуляторных батарей; $\Pi_{\text{ут}}$ – стоимость услуг по утилизации аккумуляторной батареи, р.; Π_B – стоимость новой аккумуляторной батареи, р.

Целевой функцией стратегии четвертого уровня является максимизация отношения энергоэффективности к затратам на эксплуатацию

$$\begin{aligned} \text{ЦФ} = \frac{E}{C} \rightarrow \max; E = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow \max; \\ C_{\text{экспл}} = C_{\text{ТОР}} \pm C_{\text{топл}} \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (17)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение мощности потребителей электроэнергии, ужесточение требований к экологическим показателям автомобилей приводят к появлению новых задач и принципов управления системой электроснабжения. Анализ опубликованных работ показал, что в основном они посвящены интеллектуальному управлению генераторами, обеспечению зарядного баланса, оптимизации мощности потребителей, рекуперации электроэнергии и главной целью имеют снижение расхода топлива. В тоже время не выполнен комплексный анализ актуальных и ранее применявших стратегий управления с целью разработки перспективных стратегий, объединяющих в себе достоинства предыдущих.

2. Стратегии управления можно разделить на три иерархических уровня, причем каждый следующий включает в себя задачи, решенные на предыдущем этапе. Отличительной особенностью стратегии первого уровня, как правило, является отсутствие дополнительных датчиков в системе электроснабжения. Их появление привело к возникновению стратегии второго уровня. Стратегия второго уровня направлена на обеспечение заряженности стартерной батареи и достигается оснащением автомобиля дополнительными датчиками

и организацией взаимодействия ЭБУ двигателя с генератором. Стратегия третьего уровня часто пересекается с предыдущей, однако на первое место выходит снижение расхода топлива автомобиля. Рассмотрены целевые функции перечисленных стратегий управления.

3. Предложена стратегия управления четвертого уровня, целью которой является снижение затрат на эксплуатацию системы электроснабжения на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрена структура затрат на эксплуатацию системы электроснабжения, в которые входят затраты на перерасход топлива, вызванный неисправностями в работе агрегатов, а также затраты на техническое обслуживание, диагностирование, ремонт (замену) и утилизацию.

4. Практическое применение предложенной стратегии позволит учесть все виды затрат и минимизировать расходы на эксплуатацию системы электроснабжения как автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, так и гибридных автомобилей и электромобилей, в которых электроэнергия имеет еще большую значимость.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зуев С. М., Малеев Р. А., Чернов А. Е. Энергетическая эффективность систем электрооборудования автономных объектов: монография. М.: ИНФРА – М. 2022. 170 с.
2. Чернов А. Е., Акимов А. В. Повышение энергетической эффективности системы электрооборудования автотранспортных средств // Известия МГТУ МАМИ. 2019. № 1 (39). С.67 – 76.
3. Cho, G.-J., Wi, H.-S., Lee, J., Park, J.-II and Park, K.-S. (2009). Effect of Alternator Control on Vehicle Fuel Economy. Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol. 17, No. 2, pp. 20 – 25.
4. Li, B., Yang, D., Kong, W. and Lian, X. (2013). Research of Intelligent Automotive Alternator Control System to Reduce the Fuel Consumption. Applied Mechanics and Materials. Vol. 321-324. pp. 1578 – 1582. 10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.1578.
5. Sales, L., Pacheco, E., Monteiro, L., Souza, L. and Mota, M. (2017). Evaluation of the Influence of an Alternator with Mechanical Decoupling on Energy Consumption and CO₂ Emission in a Flex Fuel Vehicle. SAE Technical Paper 2017-36-0116.
6. Wang, Y., Hu, H., Zhang, L., Zhang, N. and Sun, X. (2016). Real-Time Vehicle Energy Management System Based on Optimized Distribution of Electrical Load Power. Applied Sciences vol. 6, no. 10: pp. 285. <https://doi.org/10.3390/app6100285>
7. Wang, Y., Zhang, N., Wu, Y., Liu, B. and Wu, Y. (2018). A strategy of electrical energy management for internal combustion engine vehicle based on driving cycle recognition and electrical load perception. Ad-

vances in Mechanical Engineering. vol. 10(11). <https://doi.org/10.1177/1687814018809236>

8. Shin, J., Kim, H., Baek, S., Sunwoo, M., and Han, M. (2019) Rule-Based Alternator Control Using Predicted Velocity for Energy Management Strategy. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 141(12): 121005. <https://doi.org/10.1115/1.4044616>

9. Zhong, Q. & Qin, H. & Xu, R. (2018) Study on the Start-Stop System Control Strategy under Different Driving Cycle, 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 223 – 228. DOI: 10.1109/ICCA.2018.8444176.

10. Kessels, J.T.B.A., Koot, M., de Jager, B., van den Bosch, P.P.J., Aneke, N.P.I. and Kok, D.B. (2007) Energy Management for the Electric Powertrain in Vehicles With a Conventional Drivetrain, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 494 – 505, doi: 10.1109/TCST.2007.894646.

11. Tan, Ö., Jerouschek, D., Kennel, R., Taskiran, A. (2022) Energy Management Strategy in 12-Volt Electrical System Based on Deep Reinforcement Learning. *Vehicles*, 4, pp. 621-638. <https://doi.org/10.3390/vehicles4020036>

12. Lakshminarasimhan, V., & Athani, G. (2013). An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2. pp. 217 – 225. 10.4271/2013-01-1750.

13. Sayahan, A. and Asaei, B. (2013). An intelligent alternator control approach for fuel consumption reduction. 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 296 – 300, <https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737925>.

14. Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemonek E. (2016) Energy balance in motor vehicles. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 148. DOI: 012035. 10.1088/1757-899X/148/1/012035.

15. Lee, W. & Choi, D. & Sunwoo, M. (2002) Modelling and simulation of vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*. Vol. 109. pp. 58-66. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.

16. Debelov, V. & Dzhodzhuva, O. & Sednev, K. & Endachev, D. (2020) Charging balance management system modeling and implementation in intelligent vehicle with combined power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 819. DOI: 012037. 10.1088/1757-899X/819/1/012037.

17. Capano, G. & Mozzone, M. & Kar, N.C. (2013) Study of the electric power balance in a vehicle for the choice of the battery, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp. 1-6. DOI: 10.1109/ITEC.2013.6573476.

18. Colin W., Sabarish G., Lisa F., Marcello C. (2015) A model-based supervisory energy management strategy for a 12V vehicle electrical system, *Control Engineering Practice*, Vol. 44, pp. 20-30, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.011>.

19. Puzakov A. (2021) Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles. *Transport Problems*. Vol. 16. no. 2. pp. 113 – 120.

20. Пузаков А. В. Оценка эффективности работы системы электроснабжения автотранспорт-

ных средств. *Транспорт Урала*. 2022. № 4 (75). С. 62 – 67.

21. Козловский В. Н. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля / В. Н. Козловский, У. В. Брачунова, А. В. Крицкий, А. С. Саксонов // *Грузовик*. 2021. № 7. С. 17 – 26.

22. Дрючин Д. А., Булатов С. В., Загидуллин Р. Р. Методика корректировки нормативной периодичности технического обслуживания автотранспортных средств на основе данных о фактическом расходе топлива // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2022. № 1. С. 93 – 101.

23. Тарасик В. П., Пузанова О. В. Влияние режима движения автомобиля на его топливную экономичность // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2020. № 1 (66). С. 76 – 85. https://doi.org/10.53078/20778481_2020_1_76. - EDN MSQGQR

24. Теренченко А. С., Аникеев С. А. Современные международные требования по ограничению выбросов диоксида углерода и расхода топлива транспортными средствами // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2022. №1 (85). С. 60 – 65.

25. Пузаков А. В. Оценка влияния автомобильного генератора на расход топлива автомобиля // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023. № 4. С. 83 – 93, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-83>.

26. Вышков Ю. Д., Томилин М. М. Применение суперконденсаторов в бортовых электротехнических комплексах: монография. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. 160 с.

REFERENCES

1. Zuev S. M., Maleev R. A., Chernov A. E. *Energeticheskaya effektivnost sistem elektrooborudovaniya avtonomnih obektov* [Energy efficiency of electrical equipment systems of autonomous objects] monograph Moscow: INFRA-M, 2022:170. (In Russ.)

2. Chernov A. E., Akimov A. V. Povishenie energeticheskoi effektivnosti sistem elektrooborudovaniya avtotransportnih sredstv [Increasing the energy efficiency of the electrical equipment system of motor vehicles] *Izvestiya MSTU MAMI*. 2019; 1 (39): 67 – 76. (In Russ.)

3. Cho, G.-J., Wi, H.-S., Lee, J., Park, J.-II and Park, K.-S. (2009). Effect of Alternator Control on Vehicle Fuel Economy. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*. 2009; Vol. 17, No. 2: 20 – 25.

4. Li, B., Yang, D., Kong, W. and Lian, X. (2013). Research of Intelligent Automotive Alternator Control System to Reduce the Fuel Consumption. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; Vol. 321-324: 1578-1582. 10.4028/www.scientific.net/AMM.321-324.1578.

5. Sales, L., Pacheco, E., Monteiro, L., Souza, L. and Mota, M. (2017). Evaluation of the Influence of an Alternator with Mechanical Decoupling on Energy Consumption and CO2 Emission in a Flex Fuel Vehicle. *SAE Technical Paper* 2017-36-0116.

6. Wang, Y., Hu, H., Zhang, L., Zhang, N. and Sun, X. (2016). Real-Time Vehicle Energy Manage-

ment System Based on Optimized Distribution of Electrical Load Power. *Applied Sciences*. 2016; vol. 6, no. 10: 285. <https://doi.org/10.3390/app6100285>

7. Wang, Y., Zhang, N., Wu, Y., Liu, B. and Wu, Y. (2018). A strategy of electrical energy management for internal combustion engine vehicle based on driving cycle recognition and electrical load perception. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018; vol. 10 (11). <https://doi.org/10.1177/1687814018809236>

8. Shin, J., Kim, H., Baek, S., Sunwoo, M., and Han, M. (2019) Rule-Based Alternator Control Using Predicted Velocity for Energy Management Strategy. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2019; 141(12): 121005. <https://doi.org/10.1115/1.4044616>

9. Zhong, Q. & Qin, H. & Xu, R. (2018) Study on the Start-Stop System Control Strategy under Different Driving Cycle, 2018 IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA). 2018: 223-228. DOI: 10.1109/ICCA.2018.8444176.

10. Kessels, J. T. B. A., Koot, M., de Jager, B., van den Bosch, P. P. J., Aneke, N. P. I. and Kok, D. B. (2007) Energy Management for the Electric Powertrain in Vehicles With a Conventional Drivetrain, in IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2007; vol. 15, no. 3: 494 – 505, doi: 10.1109/TCST.2007.894646.

11. Tan, Ö., Jerouschek, D., Kennel, R., Taskiran, A. (2022) Energy Management Strategy in 12-Volt Electrical System Based on Deep Reinforcement Learning. *Vehicles*. 2022; 4: 621 – 638. <https://doi.org/10.3390/vehicles4020036>

12. Lakshminarasimhan, V., & Athani, G. (2013). An Intelligent Alternator Control Mechanism for Energy Recuperation and Fuel Efficiency Improvement. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2013; 2: 217-225. 10.4271/2013-01-1750.

13. Sayahan, A. and Asaei, B. (2013). An intelligent alternator control approach for fuel consumption reduction. *13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2013: 296-300, <https://doi.org/10.1109/EEEIC-2.2013.6737925>.

14. Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemionek E. (2016) Energy balance in motor vehicles. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2016: 148. DOI: 012035. 10.1088/1757-899X/148/1/012035.

15. Lee, W. & Choi, D. & Sunwoo, M. (2002) Modelling and simulation of vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*. 2002; Vol. 109: 58 – 66. DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.

16. Debelov, V. & Dzhodzhuva, O. & Sednev, K. & Endachev, D. (2020) Charging balance management system modeling and implementation in intelligent vehicle with combined power system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 819. DOI: 012037. 10.1088/1757-899X/819/1/012037.

17. Capano, G. & Mozzone, M. & Kar, N.C. (2013) Study of the electric power balance in a vehicle for the choice of the battery, 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2013:1 – 6. DOI: 10.1109/ITEC.2013.6573476.

18. Colin W., Sabarish G., Lisa F., Marcello C. (2015) A model-based supervisory energy management strategy for a 12V vehicle electrical system, *Control Engineering Practice*. 2015; Vol. 44: 20 – 30, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.05.011>.

19. Puzakov A. Estimation of efficiency of electric power balance in automobiles. *Transport Problems*. 2021; 16. no. 2: 113 – 120.

20. Author. Ocenka effektivnosti raboti sistemi elektrosnabzheniya avtotransportnih sredstv [Estimation of the efficiency of the electric power supply system of motor vehicles]. *Transport of the Ural*s. 2022. no. 4 (75). pp. 62 – 67.

21. Kozlovskiy V.N., Brachunova U.V., Kritskiy A.V., Saxonov A. S. Matematicheskaya imitacionnaya model ocenki zaryadnogo balansa avtomobilya [Mathematical simulation model of the vehicle charge balance estimation] *Gruzovik*. 2021;7: 17 – 26. (In Russ.)

22. Druchin D. A., Bulatov S. V., Zagidullin R. R. Metodika korektirovki normativnoi periodichnosti tehnikeskogo obslujivaniya avtotransportnih sredstv na osnove dannih o fakticheskom rashode topliva [Methodology of correction of the normative periodicity of the motor vehicles maintenance on the basis of the data on the actual fuel consumption]. *Intellect. Innovations. Investments*. 2022; 1: 93 – 101. (In Russ.)

23. Tarasik V. P., Puzanova O. V. Vliyanie rejima dvizheniya avtomobilya na ego toplivnuyu ekonomichnost [Influence of the car driving mode on its fuel efficiency]. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2020; 1 (66): 76 – 85. https://doi.org/10.53078/20778481_2020_1_76. (In Russ.)

24. Terenchenko A. S., Anikeev S. A. Sovremenie mejdunarodnie trebovaniya po ogranicheniyu vibrosov dioksida ugleroda i rashoda topliva transportnimi sredstvami [Modern international requirements for limiting carbon dioxide emissions and fuel consumption by vehicles]. *Transportation on alternative fuel*. 2022; 1 (85): 60 – 65. (In Russ.)

25. Puzakov A. V. Ocenka vliyaniya avtomobilnogo generatora na rashod topliva avtomobilya [Estimation of the influence of the automobile generator on the car fuel consumption]. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023; 4: 83-93, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-83>. (In Russ.)

26. Vyshkov Y. D., Tomilin M. M. Primenenie superkondensatorov v bortovih elektrotehnicheskikh kompleksah [Application of supercapacitors in onboard electrical complexes] monograph. Moscow Aviation Institute (National Research University), 2020: 160. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пузаков Андрей Владимирович – доц. кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей. SPIN-код: 7860-0660.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andrei V. Puzakov – Associate Professor of the Technical Operation and Repair of Cars Department. SPIN-код: 7860-0660.