

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 62-713

EDN WWDWJU

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Д.О. Бутарович

ORCID: 0000-0003-4539-0463 e-mail: buta73@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Д.А. Бруй**

ORCID: 0009-0002-0814-2313 e-mail: bruy.d@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Р.И. Гараев**

ORCID: 0009-0003-3857-8131 e-mail: graagaraev@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Исследованы современные системы управления термостатированием литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи электромобиля. Рассмотрены двухпозиционное управление, ПИД-регулирование, модельно-предиктивное управление и интеллектуальное модельно-предиктивное управление с прогнозированием скорости движения и самоадаптивным выбором целевой температуры батареи. Метод исследования основан на сравнительном анализе опубликованных научных работ, посвященных алгоритмам управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей. Показано, что традиционные стратегии управления обладают ограниченными возможностями при работе в условиях переменной тепловой нагрузки, тогда как модельно-предиктивные и интеллектуальные стратегии позволяют учитывать будущие режимы движения, снижать энергопотребление исполнительных механизмов и обеспечивать более рациональный температурный режим батареи. Практическая значимость работы заключается в систематизации современных подходов к управлению системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи и определении наиболее перспективных стратегий с точки зрения энергоэффективности.

Ключевые слова: система управления; тяговая аккумуляторная батарея; система термостатирования; электромобиль; контроллер; энергоэффективность; модельно-предиктивное управление; нейронная сеть.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бутарович, Д.О. Современные энергоэффективные системы управления термостатированием тяговой аккумуляторной батареи электромобиля / Д.О. Бутарович, Д.А. Бруй, Р.И. Гараев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 70-83. EDN WWDWJU

MODERN ENERGY-EFFICIENT THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLE TRACTION BATTERY

D.O. Butarovich

ORCID: 0000-0003-4539-0463 e-mail: buta73@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

D.A. Bruy

ORCID: 0009-0002-0814-2313 e-mail: bruy.d@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

R.I. Garaev

ORCID: 0009-0003-3857-8131 e-mail: graagaraev@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The paper considers modern thermal management system for lithium-ion traction battery of an electric vehicle. On/off control, PID control, model predictive control, and intelligent model predictive control with speed prediction and self-adaptive selection of the battery target temperature are considered. The research method is based on a comparative analysis of scientific papers devoted to control algorithms for electric vehicle traction battery thermal management systems. It is shown that conventional control strategies have limited capabilities under variable thermal load conditions, whereas model predictive and intelligent control strategies make it possible to take into account future driving conditions, reduce the energy consumption of actuators, and provide a more rational battery temperature regime. The practical significance lies in the systematization of modern approaches to the control of traction battery thermal management systems and in identifying the most promising strategies in terms of energy efficiency.

Key words: control system; traction battery; thermal management system; electric vehicle; controller; energy efficiency; model predictive control; neural network.

FOR CITATION: D.O. Butarovich, D.A. Bruy, R.I. Garaev. Modern energy-efficient thermal management systems for electric vehicle traction battery. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 70-83. EDN WWDWJU

Введение

Развитие электромобилей и гибридных транспортных средств сопровождается повышением требований к энергоэффективности, безопасности и долговечности тяговых аккумуляторных батарей. В настоящее время наиболее распространенным источником питания для электромобилей являются литий-ионные тяговые аккумуляторные батареи, эксплуатационные характеристики которых существенно зависят от температурного режима [1, 2]. Отклонение температуры аккумуляторной батареи от допустимого или оптимального диапазона может приводить к снижению доступной мощности, ускорению деградиционных процессов, увеличению температурной неравномерности между ячейками и модулями, а также к ухудшению работоспособности транспортного средства в целом. Для обеспечения требуемого температурного режима применяется система термостатирования тяговой аккумуляторной батареи, включающая исполнительные элементы нагрева и охлаждения, насосное оборудование, датчики температуры и электронную систему управления [3, 4]. При этом система управления должна не только поддерживать температуру батареи в заданном диапазоне, но и обеспечивать минимально возможное энергопотребление исполнительных механизмов. Данное требование особенно важно для электромобилей, поскольку энергия, расходуемая системой термостатирования, непосредственно влияет на запас хода и общую энергетическую эффективность транспортного средства.

Актуальность работы обусловлена тем, что традиционные стратегии управления системами термостатирования, включая двухпозиционное управление и ПИД-регулирование, не всегда позволяют обеспечить рациональный баланс между точностью поддержания температуры, равномерностью температурного поля, энергопотреблением и сохранением ресурса тяговой аккумуляторной батареи [5]. В современных исследованиях все большее внимание уделяется модельно-предиктивному управлению, а также интеллектуальным стратегиям, использующим прогнозирование скорости движения, адаптацию целевой температуры и учитывающим будущую тепловую нагрузку [6-9]. Несмотря на большое число работ, посвященных отдельным алгоритмам управления системами термостатирования, отсутствует их со-

поставление с точки зрения энергоэффективности и обеспечения работоспособности тяговой аккумуляторной батареи.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ современных стратегий управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей. Для достижения данной цели в работе решаются следующие задачи: рассматриваются основные типы систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей; анализируются особенности двухпозиционного управления, ПИД-регулирования, модельно-предиктивного управления и интеллектуального модельно-предиктивного управления; сопоставляются их преимущества и ограничения; оценивается влияние рассматриваемых стратегий на энергопотребление системы термостатирования, температурный режим и работоспособность аккумуляторной батареи.

В основе исследования – сравнительный анализ работ, посвященных системам управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей электромобилей, в результате которого систематизированы преимущества, ограничения и энергетические показатели рассматриваемых стратегий.

Классификация применяемых систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей в электромобилях включает: 1) ПИД-регулятор; 2) двухпозиционное управление; 3) управление на основе правил; 4) модельно-предиктивное управление; 5) интеллектуальное модельно-предиктивное управление [1]. Двухпозиционное управление, ПИД-регулирование и модельно-предиктивное управление относятся к основным стратегиям управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей. Развитие нейросетевых методов и интеллектуальных систем управления привело к повышению интереса к интеллектуальному модельно-предиктивному управлению, позволяющему учитывать прогнозируемые режимы движения и адаптировать целевые параметры системы термостатирования.

Стратегии управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей

Для эффективной эксплуатации ячеек тяговой аккумуляторной батареи применяются системы контроля заряда, датчики температуры и состояния батареи, а также алгоритмы управления системой термостатирования [2, 3]. Это связано с тем, что работоспособность, долговечность и энергетическая эффективность аккумуляторной батареи существенно зависят от ее температурного состояния.

Двухпозиционное управление

Система двухпозиционного управления термостатированием тяговой аккумуляторной батареи электромобиля имеет два основных состояния, при которых исполнительный механизм получает команды включения или выключения [3]. В простейшем случае такая система может включать нагреватель, привод, термостат и элементы коммутации. Термостат измеряет температуру рабочей среды или аккумуляторной батареи и активирует исполнительный механизм при необходимости нагрева или охлаждения. Преимуществом является простота реализации и низкая требовательность к вычислительным ресурсам. Вместе с тем, данный подход не позволяет заранее учитывать изменение тепловой нагрузки и может приводить к колебаниям температуры около заданных порогов. В системах термостатирования тяговых аккумуляторных батарей также может применяться переключение электромагнитных клапанов, обеспечивающее циркуляцию жидкости в контуре без работы нагревателя или охладителя для более равномерного распределения температуры между батарейными модулями и ячейками [4].

ПИД-регулирование

ПИД-регулятор является одним из наиболее распространенных механизмов управления техническими системами [5]. В системе термостатирования батареи электромобиля он формирует управляющее воздействие по отклонению текущей температуры от заданного значения с учетом пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

ПИД-регулирование позволяет реализовать непрерывное управление и стабилизировать температуру батареи в заданном диапазоне. Однако его эффективность ограничена при изменяющихся режимах движения электромобиля и переменной тепловой нагрузке. Данный подход не учитывает будущие условия эксплуатации, не прогнозирует изменение тепловыделения батареи и требует корректной настройки коэффициентов регулятора для различных режимов работы.

Модельно-предиктивное управление

Модельно-предиктивное управление (МПК) представляет собой стратегию, основанную на использовании математической модели объекта и оптимизации управляющих воздействий на заданном горизонте прогнозирования [6, 7]. В отличие от двухпозиционного управления и ПИД-регулирования, МПК позволяет учитывать ограничения по температуре, управляющему воздействию, массовому расходу охлаждающей жидкости и скорости изменения управляющего сигнала [6-8]. Стратегия управления МПК-контроллера системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электромобиля включает две основные части: наблюдатель и оптимизатор [6, 8]. На временном шаге k наблюдатель в горизонте прогнозирования p может быть представлен следующими выражениями:

$$x(k+i|k) = Ax(k+i-1|k) + B_u u(k+i-1|k) + B_v v(k+i-1|k); \quad (1)$$

$$y(k+i|k) = Cx(k+i-1|k), \quad (2)$$

где i – последовательный временной шаг, изменяющийся от 1 до p ; x – вектор переменных состояния тепловой системы батареи; u – вектор управляющих переменных; v – вектор входных возмущений; A , B_u и B_v – матрицы, определяемые на основе текущего состояния, управляющих переменных и возмущений; y – вектор прогнозируемых выходных параметров; C – матрица связи между состоянием системы и выходными параметрами.

Вектор состояния может быть представлен в виде формулы:

$$x = [T, SOC, SOH, P_{pump}, T_{cool}]. \quad (3)$$

где T – температура батареи; SOC – степень заряда батареи; SOH – показатель состояния работоспособности батареи; P_{pump} – мощность насоса; T_{cool} – температура охлаждающей жидкости.

Управляющая переменная может быть задана как массовый расход охлаждающей жидкости:

$$u = \dot{m}_{cool}, \quad (4)$$

где \dot{m}_{cool} – массовый расход охлаждающей жидкости.

Вектор возмущений может быть представлен в виде формулы:

$$v = [v_{car}, T_{air}]^T. \quad (5)$$

где v_{car} – скорость транспортного средства; T_{air} – температура окружающей среды.

Выходная переменная оценщика определяется по формуле:

$$y = T. \quad (6)$$

Температура батареи T соответствует контролируемой температуре батарейного модуля в стратегии управления. Согласно формуле (6), выходная переменная оценки состояния используется для управления температурой батареи и снижения энергопотребления системы термостатирования. Оптимизатор в МПК определяет управляющее воздействие путем минимизации функции затрат. Целевая функция может включать три составляющие:

$$J(Z_k) = J_y(Z_k) + J_u(Z_k) + J_{\Delta u}(Z_k), \quad (7)$$

где $J_y(Z_k)$ – составляющая, характеризующая отклонение температуры батареи от заданного значения; $J_u(Z_k)$ – составляющая, связанная с энергопотреблением исполнительных механизмов; $J_{\Delta u}(Z_k)$ – составляющая, ограничивающая скорость изменения управляющего воздействия.

Составляющая $J_y(Z_k)$ в контрольном горизонте с определяется формулой:

$$J_y(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^y [r_j(k+i|k) - y_j(k+i|k)]\}^2, \quad (8)$$

где $r_j(k+i|k)$ – заданное значение i -го выходного параметра на i -м шаге горизонта прогнозирования; $y_j(k+i|k)$ – прогнозируемое значение j -го выходного параметра; $\omega_{i,j}^y$ – весовой коэффициент.

Составляющая $J_u(Z_k)$ определяется формулой:

$$J_u(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^u [u_j(k+1|k)]\}^2, \quad (9)$$

где $u_j(k+1|k)$ – значение i -го управляющего воздействия; $\omega_{i,j}^u$ – весовой коэффициент, характеризующий значимость ограничения управляющего воздействия.

Составляющая $J_{\Delta u}(Z_k)$ определяется формулой:

$$J_{\Delta u}(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^{\Delta u} [u_j(k+i|k) - u_j(k+i-1|k)]\}^2, \quad (10)$$

где $\omega_{i,j}^{\Delta u}$ – весовой коэффициент, характеризующий ограничение скорости изменения управляющего воздействия.

Ограничения для системы управления могут быть заданы в виде формулы:

$$\frac{0L}{\min} \leq m_{cool} \leq \frac{42L}{\min}, \quad 15 \leq T \leq 35^\circ\text{C}, \quad (11)$$

$$\Delta T_{diff_{max}} < 5^\circ\text{C}.$$

В неравенствах (11) $\Delta T_{diff_{max}}$ соответствует максимальной разнице температур между аккумуляторными модулями в батарее. Решение задачи оптимизации методом квадратичного программирования формирует последовательность управляющих воздействий на горизонте управления:

$$Z_k^T = [u(k|k)^T, u(k+1|k)^T, \dots, u(k+c|k)^T]. \quad (12)$$

В формуле (12) только первый элемент последовательности, т.е. $u(k|k)$, используется в качестве фактического управляющего воздействия МПК на текущем шаге. На следующем шаге расчет повторяется, что обеспечивает динамическую коррекцию управления в режиме реального времени [6, 8].

Интеллектуальное модельно-предиктивное управление

Интеллектуальное модельно-предиктивное управление является развитием традиционного МПК и дополняет его средствами прогнозирования режимов движения и адаптации целевой температуры батареи [8, 9]. На рис. 1 представлена принципиальная схема стратегии интеллектуального управления для системы термостатирования батареи [8]. Она включает контроллер МПК, систему прогнозирования скорости автомобиля, самоадаптер определения заданной температуры аккумулятора и модель производительности системы термостатирования.

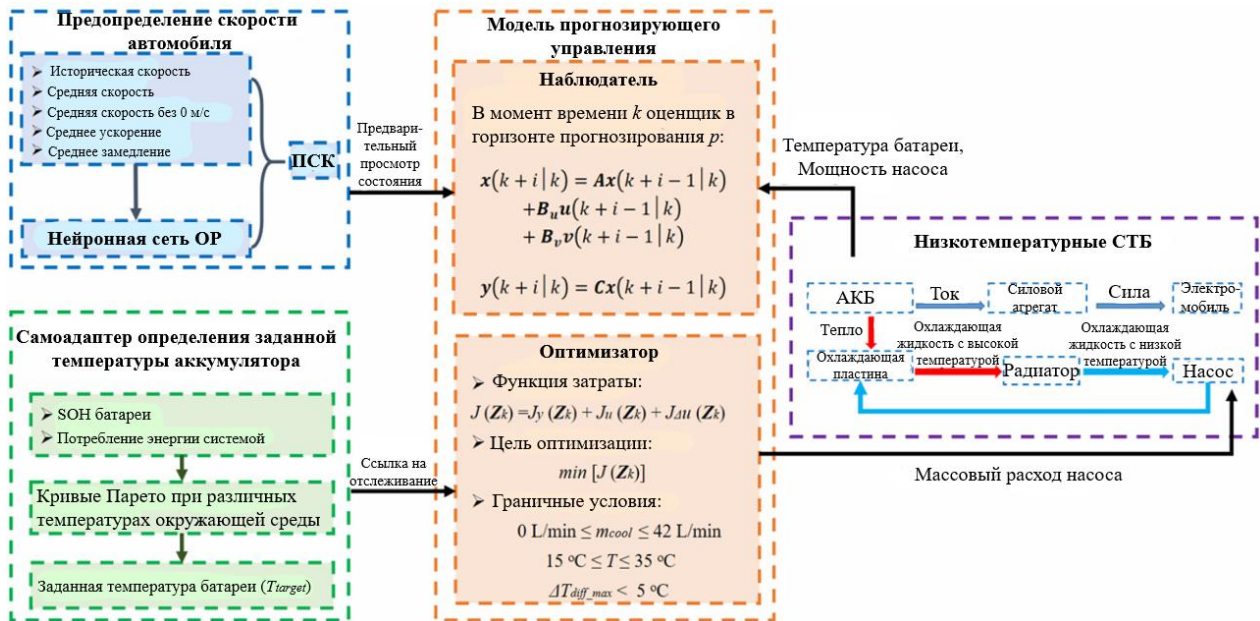


Рис. 1. Стратегия интеллектуального управления для системы термостатирования батарей

Fig. 1. Intelligent control strategy for the battery thermal management system

Нейронная сеть обратного распространения ошибки используется для формирования системы предварительного просмотра скорости электромобиля, которая помогает насосу регулировать массовый расход охлаждающей жидкости с учетом будущей тепловой нагрузки [8]. Входные данные нейронной сети включают параметры, характеризующие историческую скорость движения, среднюю скорость, среднюю скорость без учета холостого хода, среднее ускорение и замедление за последние 60 сек. На выходе нейронная сеть прогнозирует скорость движения на ближайший временной интервал. Нейронная сеть обратного распространения для системы прогнозирования скорости показана на рис. 2.

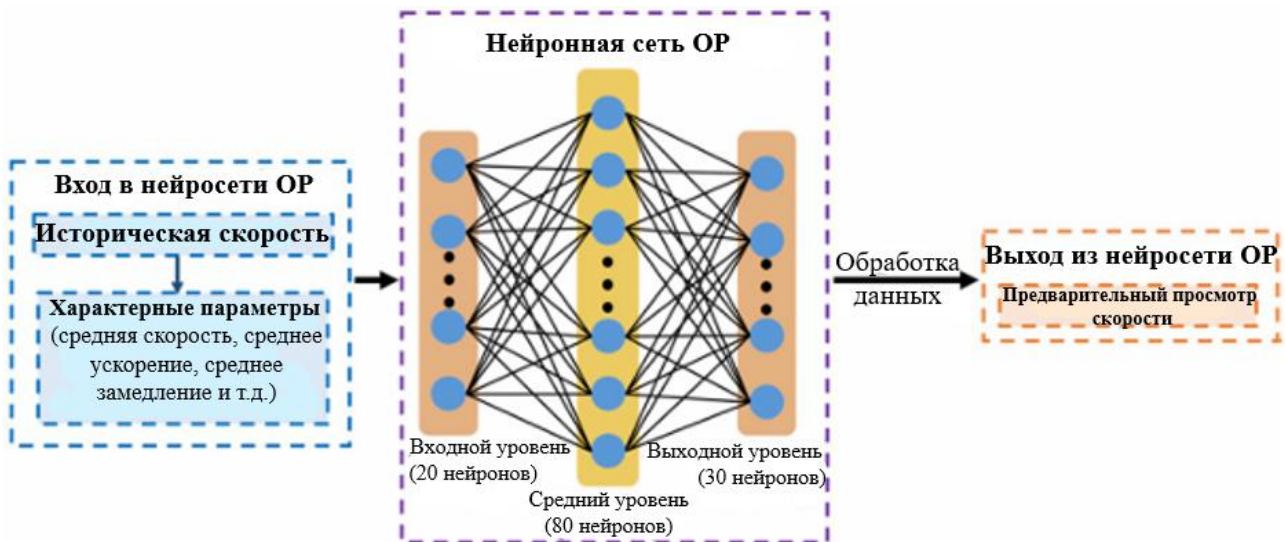


Рис. 2. Нейронная сеть обратного распространения для прогнозирования скорости движения

Fig. 2. Backpropagation neural network for vehicle speed prediction

Прогнозируемая скорость электромобиля близка к фактической. Для ездовых циклов NEDC и WLTC коэффициенты регрессии составляют соответственно 0,889 и 0,884 [8], что подтверждает возможность использования нейросетевого прогнозирования скорости для управления системой термостатирования.

Срок службы батареи и энергопотребление системы термостатирования зависят от целевой температуры батареи и температуры окружающей среды. Более низкая целевая температура может способствовать увеличению срока службы батареи, но одновременно повышает энергопотребление системы термостатирования. Поэтому для интеллектуального управления необходимо определять сбалансированную целевую температуру, обеспечивающую компромисс между энергопотреблением и ресурсом батареи. Для анализа такого компромисса могут использоваться границы Парето [10]. Закон Парето формулируется как принцип, согласно которому ограниченная часть факторов может обеспечивать значительную долю результата. В задачах оптимизации данный подход позволяет выделять рациональные решения, при которых дальнейшее улучшение одного критерия приводит к существенному ухудшению другого.

По результатам анализа данных для различных ездовых циклов установлено, что сбалансированная целевая температура составляет 22 °С. При сравнении с температурой, ориентированной на энергосбережение и равной 27 °С, снижение SOH для сбалансированной температуры составляет 10,8, 12,2, 12,7 и 12,2 % для циклов WLTC, NEDC, HWFET и MVEGA соответственно, тогда как средняя мощность увеличивается на 17,3, 17,5, 21 и 18 Вт. При сравнении с целевой, ориентированной на длительный срок службы и равной 20 °С, сбалансированная температура снижает потребление энергии на 45,1, 56,7, 43,2 и 56,2 % для тех же циклов, а значение SOH увеличивается на 1,3, 2,6, 1,7 и 2,6 %. Результаты представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1.

Влияние выбора целевой температуры на SOH и энергопотребление при различных ездовых циклах

Table 1.

Effect of target temperature selection on SOH and energy consumption under different driving cycles

Показатель	WLTC	NEDC	HWFET	MVEGA
При сравнении с $T_r = 27$ °С: ΔSOH , %	-10,8	-12,2	-12,7	-12,2
При сравнении с $T_r = 27$ °С: ΔN_{cp} , Вт	+17,3	+17,5	+21,0	+18,0
При сравнении с $T_r = 20$ °С: ΔSOH , %	+1,3	+2,6	+1,7	+2,6
При сравнении с $T_r = 20$ °С: $\Delta E_{потр}$, %	-45,1	-56,7	-43,2	-56,2

Из данных табл. 1 следует, что тип ездового цикла оказывает ограниченное влияние на значение сбалансированной целевой температуры батареи. При этом температура окружающей среды оказывает более существенное влияние, так как она определяет условия теплообмена и охлаждающую способность системы термостатирования.

При температуре окружающей среды 25 °С и сбалансированной целевой температуре 27 °С снижение SOH по сравнению с температурой, основанной на энергосбережении и равной 32 °С, составляет 12,6 %, а средняя мощность увеличивается на 20 Вт [8]. При сравнении с целевой температурой, ориентированной на длительный срок службы и равной 25 °С, температура 27 °С снижает потребление энергии на 62,5 %, при этом снижение SOH составляет 2,2 %. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Влияние целевой температуры на SOH и энергопотребление при температуре окружающей среды 25 °С

Table 2.

Effect of target temperature on SOH and energy consumption at 25 °С ambient temperature

Показатель	$T_r = 32$ °С	$T_r = 25$ °С
ΔSOH , %	-12,6	-2,2
ΔN_{cp} , Вт	+20	-
$\Delta E_{потр}$, %	-	-62,5

Таким образом, значение температуры окружающей среды, увеличенное на 2 °С, может использоваться как самоадаптируемая целевая температура для системы термостатирования батареи [8].

Сравнительный анализ интеллектуальных стратегий управления системой термостатирования

На основании рассмотренных данных можно сделать вывод, что двухпозиционное управление и ПИД-регулирование обладают ограниченной эффективностью при работе в условиях переменной тепловой нагрузки. Более высокие возможности имеют традиционное МПК, МПК с прогнозированием скорости и интеллектуальное МПК с самоадаптивной целевой температурой. В рассматриваемых исследованиях сравнивается стратегия интеллектуального МПК с контроллером двухпозиционного управления, традиционным МПК и МПК с прогнозированием скорости [8]. Поскольку самоадаптер определения заданной температуры аккумулятора может автоматически определять целевую температуру батареи, в расчетах учитывается изменение температуры окружающей среды (рис. 3).

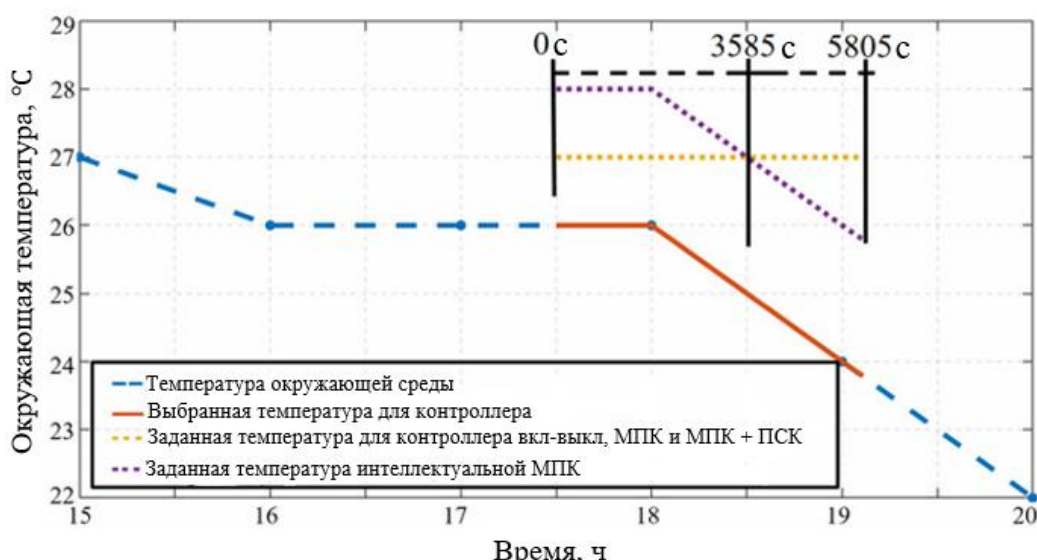


Рис. 3. Температура окружающей среды и целевая температура батареи

Fig. 3. Ambient temperature and battery target temperature

Средняя температура окружающей среды в рассматриваемый период составляет приблизительно 25 °С. На основании метода определения сбалансированной целевой температуры для двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости выбирается целевая температура 27 °С. Для интеллектуального МПК используется изменяющаяся заданная температура. Граничные условия приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Граничные условия для сравнения стратегий управления системой термостатирования

Table 3.

Boundary conditions for comparison of thermal management control strategies

Ездовой цикл	Температура окружающей среды	Начальная температура батареи	Начальная температура охлаждающей жидкости	Начальный SOC	Начальный SOH
NEDC	По рис. 3	26 °C	26 °C	100 %	100 %

Для контроллера двухпозиционного управления верхний и нижний температурные пороги устанавливаются равными 27,5 и 26,5 °С соответственно. На рис. 4 показан массовый расход насоса при различных стратегиях управления.

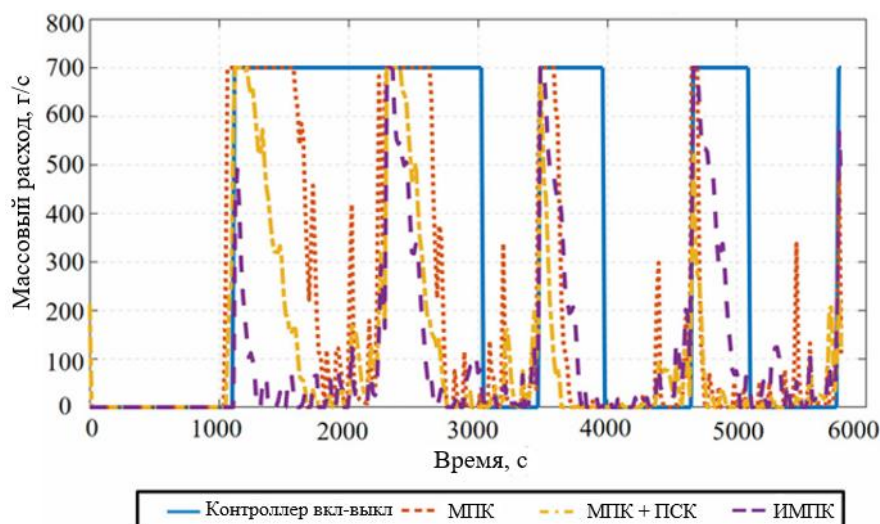


Рис. 4. Массовый расход насоса при различных стратегиях управления

Fig. 4. Pump mass flow rate under different control strategies

Согласно результатам моделирования, насос, управляемый по принципу включения и выключения, работает при массовом расходе 700 г/с, что приводит к значительному потреблению энергии. МПК с прогнозированием скорости характеризуется меньшим временем работы при высоком расходе и меньшими колебаниями, что указывает на снижение энергопотребления. Интеллектуальное МПК, имея целевую температуру выше 27 °С до момента времени 3585 с, также позволяет экономить энергию по сравнению с другими стратегиями. После достижения целевой температуры интеллектуальное МПК увеличивает расход охлаждающей жидкости, что может приводить к дополнительному энергопотреблению. В период высокой теплоотдачи, соответствующий интервалу 4515-4680 с, интеллектуальное МПК запускает насос на высокой скорости со средним расходом 334 г/с. При этом традиционное МПК и МПК с прогнозированием скорости имеют более низкие средние расходы, составляющие 260,8 г/с и 155,6 г/с соответственно [8]. На рис. 5 показана динамика температуры батареи при различных стратегиях управления.

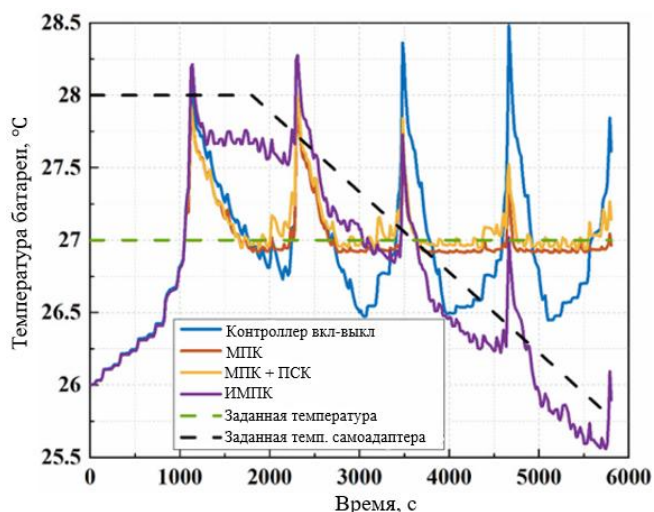


Рис. 5. Температура батареи при различных стратегиях управления

Fig. 5. Battery temperature under different control strategies

Среди рассмотренных контроллеров наибольшие колебания температуры батареи наблюдаются при двухпозиционном управлении: температура изменяется в диапазоне от 26,47 до 28,49 °С. МПК с прогнозированием скорости имеет более высокие колебания температуры батареи, чем традиционное МПК, однако различие между ними является незначитель-

ным. До момента времени 3585 с, поскольку заданная температура интеллектуального МПК превышает 27 °С, температура батареи обычно выше, чем при использовании других стратегий. После момента 3585 с температура батареи снижается вследствие уменьшения целевой температуры. Самоадаптивная настройка заданной температуры помогает интеллектуальному МПК продлить срок службы батареи по сравнению с другими стратегиями управления. Согласно рис. 6, SOH при интеллектуальном МПК в конце цикла движения составляет 98,814 %, что на 0,016, 0,012 и 0,008 % выше, чем у контроллера двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно [8].

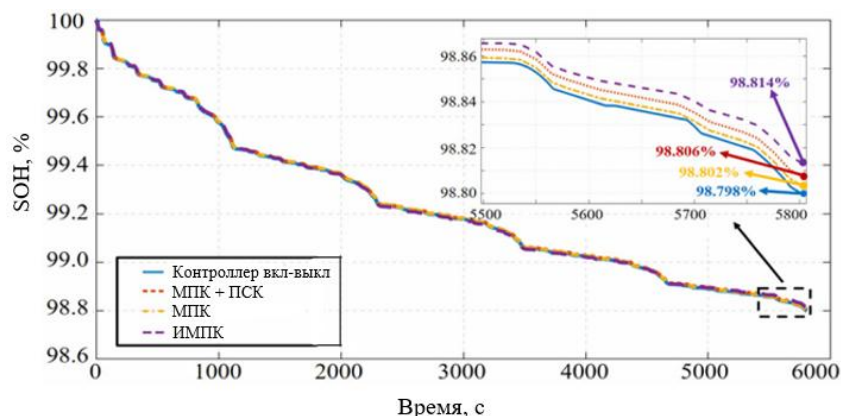


Рис. 6. SOH аккумуляторной ячейки при различных стратегиях управления

Fig. 6. Battery cell SOH under different control strategies

Максимальная и средняя разница между температурой батареи при интеллектуальном МПК и заданной температурой составляют 0,66 и 0,26 °С соответственно [8]. Это свидетельствует о высокой точности контроля температуры батареи интеллектуальным МПК. Следовательно, интеллектуальное МПК с самоадаптивной целевой температурой может обеспечивать более длительный срок службы батареи по сравнению с другими стратегиями управления. На рис. 7 показано энергопотребление системы термостатирования электромобиля при работе с различными стратегиями управления.

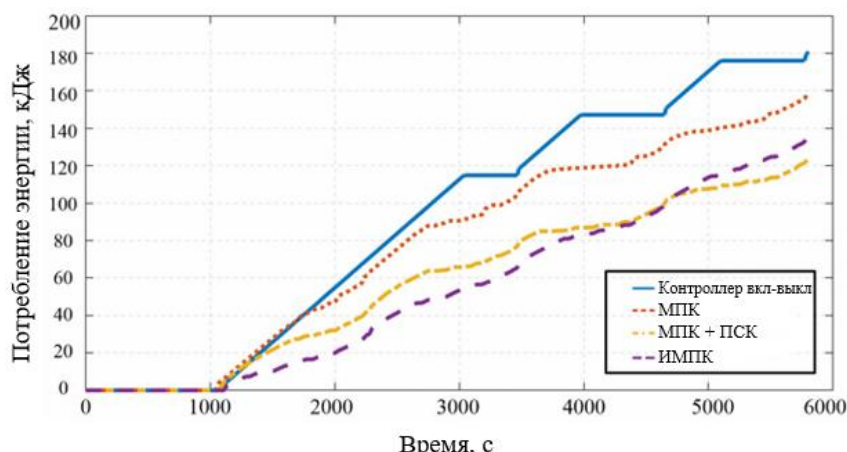


Рис. 7. Энергопотребление системы термостатирования при различных стратегиях управления

Fig. 7. Energy consumption of the thermal management system under different control strategies

Контроллер двухпозиционного управления потребляет больше энергии из-за длительной работы насоса при высоком массовом расходе. Интеллектуальное МПК, имея более высокую целевую температуру до 3585 с, демонстрирует наименьшее энергопотребление на начальном участке: 53,4 кДж за 3000 с, что на 52,6, 41,0 и 18,8 % ниже, чем у контроллера двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно [8].

После 3585 с целевая температура интеллектуального МПК становится ниже 27 °С, что приводит к увеличению расхода насоса и, соответственно, к росту энергопотребления. При 4730 с энергопотребление интеллектуального МПК становится сопоставимым с МПК с прогнозированием скорости, но затем интеллектуальное МПК начинает потреблять больше энергии для поддержания заданной температуры. В конце цикла движения энергопотребление интеллектуального МПК составляет 136,4 кДж, что на 9,7 % выше, чем у МПК с прогнозированием скорости, но на 24,5 и 14,1 % ниже, чем у двухпозиционного управления и традиционного МПК соответственно [8]. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Сравнение энергопотребления интеллектуального МПК с другими стратегиями управления

Table 4.

Comparison of energy consumption of intelligent MPC with other control strategies

Этап цикла	Двухпозиционное управление	Традиционное МПК	МПК с прогнозированием скорости
Начало цикла, снижение энергопотребления ИМПК, %	52,6	41,0	18,8
Конец цикла, снижение энергопотребления ИМПК, %	24,5	14,1	-9,7

Отрицательное значение в табл. 4 означает, что в конце цикла интеллектуальное МПК потребляет больше энергии, чем МПК с прогнозированием скорости. Это связано с изменением целевой температуры и необходимостью более интенсивной работы насоса для поддержания требуемого температурного режима батареи. Несмотря на это, интеллектуальное МПК обеспечивает лучший баланс между энергопотреблением системы термостатирования и сохранением ресурса аккумуляторной батареи.

Обобщенное сравнение стратегий управления

На основании рассмотренных данных работ [3, 5-9] можно выполнить обобщенное сопоставление стратегий управления системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи. Сравнение целесообразно проводить по нескольким критериям: сложности реализации, способности учитывать будущую тепловую нагрузку, влиянию на энергопотребление системы термостатирования, точности поддержания температуры и применимости для электромобилей с переменными режимами движения. Результаты сопоставления представлены в табл. 5.

Таблица 5.

Сравнение стратегий управления системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи

Table 5.

Comparison of control strategies for the traction battery thermal management system

Стратегия управления	Учет прогноза и адаптации	Энергетический эффект	Основное ограничение
1	2	3	4
Двухпозиционное управление	Не учитывает прогноз тепловой нагрузки; управление выполняется по температурным порогам	Наименее энергоэффективный вариант среди рассмотренных стратегий; характеризуется длительной работой насоса при высоком расходе	Повышенные колебания температуры и нерациональные режимы работы исполнительных механизмов
ПИД-регулирование	Не учитывает будущую тепловую нагрузку; управление основано на текущем отклонении температуры	Потенциально эффективнее двухпозиционного управления, но уступает МПК-стратегиям при переменных режимах движения	Необходимость настройки коэффициентов и ограниченная адаптация к изменяющимся условиям

Окончание табл. 5.
Сравнение стратегий управления системой термостатирования
тяговой аккумуляторной батареи

Table 5 termination.
Comparison of control strategies for the traction battery thermal management system

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Модельно-предиктивное управление	Учитывает модель объекта, ограничения и горизонт прогнозирования	Обеспечивает снижение энергопотребления по сравнению с простыми стратегиями управления; в конце цикла уступает ИМПК на 14,1 %	Требует математической модели объекта и повышенных вычислительных ресурсов
МПК с прогнозированием скорости	Учитывает прогнозируемую скорость движения и будущую тепловую нагрузку	По сравнению с традиционным МПК снижает энергопотребление на 2,5 %, 5,6 % и 6,0 % при времени работы 4000, 5000 и 5805 с соответственно	Эффективность зависит от точности прогноза скорости движения
Интеллектуальное МПК	Учитывает прогноз скорости и самоадаптивную целевую температуру батареи	На начальном участке снижает энергопотребление на 52,6 %, 41,0 % и 18,8 % по сравнению с двухпозиционным управлением, МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно; в конце цикла снижает энергопотребление на 24,5 % и 14,1 % по сравнению с двухпозиционным управлением и МПК	Может потреблять на 9,7 % больше энергии, чем МПК с прогнозированием скорости, если требуется более интенсивное поддержание целевой температуры

Из табл. 5 следует, что двухпозиционное управление и ПИД-регулирование целесообразны преимущественно для простых систем термостатирования, в которых отсутствуют высокие требования к прогнозированию тепловой нагрузки и оптимизации энергопотребления. Модельно-предиктивное управление является более эффективным подходом, позволяющим учитывать ограничения системы и прогнозируемое изменение ее состояния. Применение прогнозирования скорости движения дополнительно снижает энергопотребление за счет более рационального управления массовым расходом охлаждающей жидкости.

Наиболее универсальной стратегией является интеллектуальное модельно-предиктивное управление [8, 9], так как оно обеспечивает баланс между энергопотреблением системы термостатирования и сохранением ресурса тяговой аккумуляторной батареи. При этом минимальное энергопотребление в отдельных режимах может обеспечиваться МПК с прогнозированием скорости, что необходимо учитывать при выборе алгоритма управления.

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ современных стратегий управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей: двухпозиционного управления, ПИД-регулирования, модельно-предиктивного управления, модельно-предиктивного управления с прогнозированием скорости движения и интеллектуального модельно-предиктивного управления.

2. Установлено, что двухпозиционное управление удобно, однако наименее энергоэффективно за счет повышенных колебаний температуры и длительной работе исполнительных механизмов при высоких значениях массового расхода охлаждающей жидкости.

3. ПИД-регулирование позволяет реализовать непрерывное управление температурой батареи, однако его эффективность ограничена при переменных режимах движения электромобиля. Данный подход не учитывает будущую тепловую нагрузку и поэтому уступает модельно-предиктивным стратегиям по возможностям оптимизации энергопотребления.

4. Модельно-предиктивное управление является более эффективной стратегией для систем термостатирования тяговых аккумуляторных батарей, поскольку позволяет учиты-

вать ограничения по температуре, массовому расходу охлаждающей жидкости и скорости изменения управляющего воздействия. Применение прогнозирования скорости движения в составе МПК позволяет снизить энергопотребление по сравнению с традиционным МПК на 2,5, 5,6 и 6,0 % при времени работы 4000, 5000 и 5805 с соответственно.

5. Интеллектуальное модельно-предиктивное управление с самоадаптивной целевой температурой обеспечивает выраженный энергетический эффект на начальном участке цикла. При времени работы 3000 с энергопотребление ИМПК составляет 53,4 кДж, что на 52,6 % ниже, чем при двухпозиционном управлении, на 41,0 % ниже, чем при традиционном МПК, и на 18,8 % ниже, чем при МПК с прогнозированием скорости.

6. В конце цикла движения энергопотребление интеллектуального МПК составляет 136,4 кДж. Это на 24,5 % ниже, чем при двухпозиционном управлении, и на 14,1 % ниже, чем при традиционном МПК. При этом энергопотребление ИМПК на 9,7 % выше, чем при МПК с прогнозированием скорости, что связано с необходимостью более интенсивного поддержания заданного температурного режима батареи.

7. Показано, что выбор целевой температуры батареи существенно влияет на энергопотребление системы термостатирования. При использовании сбалансированной целевой температуры 22 °С снижение энергопотребления по сравнению с температурой, ориентированной на увеличение срока службы батареи, составляет 45,1, 56,7, 43,2 и 56,2 % для ездовых циклов WLTC, NEDC, HWFET и MVEGA соответственно. При температуре окружающей среды 25 °С выбор целевой температуры 27 °С позволяет снизить энергопотребление на 62,5 % по сравнению с целевой температурой 25 °С.

8. Наиболее перспективны для повышения энергоэффективности системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи модельно-предиктивные стратегии управления. Если приоритетом является минимизация энергопотребления в отдельных режимах, целесообразно применение МПК с прогнозированием скорости. Баланс между энергопотреблением, точностью поддержания температуры и сохранением ресурса батареи обеспечит интеллектуальное модельно-предиктивное управление с самоадаптивной целевой температурой.

9. Интеллектуальные стратегии управления зависят от точности прогнозных данных. Так, прогнозирование скорости движения транспортного средства может усложниться при наличии случайных дорожных факторов. Развитие коммуникационных технологий, включая V2V и V2I, может повысить точность прогноза режимов движения и эффективность интеллектуальных систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей [11].

Библиографический список

1. **Ylä-Himanka, L.** Electro-Thermal Modeling and Nonlinear Temperature Control of Lithium-Ion Batteries : Master of Science Thesis. – Tampere: Tampere University, 2024. – 73 p.
2. **Omariba, Z.** Parameter Identification and State Estimation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles with Vibration and Temperature Dynamics / Z. Omariba, L. Zhang, H. Kang [et al]. // World Electric Vehicle Journal. – 2020. – Vol. 11, № 3. – P. 50. – DOI: 10.3390/wevj11030050.
3. **Li, J.** Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles: Master's Thesis / J. Li, Z. Zhu. – Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014. – 79 p.
4. **Стручков В.С.** Разработка перспективной системы термостатирования для электромобильного транспорта / В.С. Стручков, Р.Х. Курмаев // Труды НАМИ. – 2019. – № 1. – С. 29-35.
5. **Ang, К.Н.** PID control system analysis, design, and technology / К.Н. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13, № 4. P. 559-576.
6. **Xie, Y.** An improved intelligent model predictive controller for cooling system of electric vehicle / Y. Xie, Z. Liu, P. Wang [et al]. // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 182. – P. 116084. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116084.
7. **Деменков, Н.П.** Управление с прогнозированием : учебное пособие / Н.П. Деменков.– Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 65 с.
8. **Lu, P.** Numerical Calculation Method of Model Predictive Control for Integrated Vehicle Thermal Management Based on Underhood Coupling Thermal Transmission / P. Lu, Q. Gao, L. Lv [et al]. // Energies. – 2019. – Vol. 12, № 2. – P. 259. – DOI: 10.3390/en12020259.

9. **Wan Ramli, W.R.** Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery for Passenger Hybrid Electrical Vehicles / W.R. Wan Ramli, A. Pesyridis, D. Gohil [et al]. // *Energies*. 2020. – Vol. 13, № 17. – P. 4532. – DOI: 10.3390/en13174532.
10. **Barlow, T.J.** A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions / T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae [et al].– Berkshire: TRL Limited, 2009. – 212 p.
11. **Hardy, M.** Pareto's Law / M. Hardy // *The Mathematical Intelligencer*. – 2010. – Vol. 32, № 3. – P. 38-43. – DOI: 10.1007/s00283-010-9159-2.
12. **Ma, Y.** Two-level optimization strategy for vehicle speed and battery thermal management in connected and automated EVs / Y. Ma, Q. Ma, Y. Liu [et al]. // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 361. – P. 122928. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122928.
13. **Yuan, X.H.** MPC-based thermal management for water-cooled proton exchange membrane fuel cells / X.H. Yuan, G. Wu, J.G. Zhou [et al]. // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 338-348.
14. **Sanguesa, J.A.** Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications / J.A. Sanguesa, J. Barrachina, M. Fogue [et al]. // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, № 12. – P. 31794-31810. – DOI: 10.3390/s151229889.

References

1. Ylä-Himanka L. Electro-Thermal Modeling and Nonlinear Temperature Control of Lithium-Ion Batteries [master's thesis]. Tampere: Tampere University; 2024. 73 p.
2. Omariba Z., Zhang L., Kang H., Sun D. Parameter Identification and State Estimation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles with Vibration and Temperature Dynamics. *World Electric Vehicle Journal*. 2020;11(3):50. doi: 10.3390/wevj11030050.
3. Li J, Zhu Z. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles [master's thesis]. Göteborg: Chalmers University of Technology; 2014. 79 p.
4. Struchkov V.S., Kurmaev R.H. Razrabotka perspektivnoy sistemy termostatirovaniya dlya elektromobil'nogo transporta [Development of a Promising Thermal Management System for Electric Vehicles]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI]. 2019;(1):29-35. (in Russian).
5. Ang KH, Chong G, Li Y. PID Control System Analysis, Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(4):559-576.
6. Xie Y., Liu Z., Wang P., Li K., Wang X., Wu C., et al. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;182:116084. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116084.
7. Demenkov N.P. Upravlenie s prognozirovanie: uchebnoe posobie [Predictive Control: A Textbook]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman; 2020. 65 p. (in Russian).
8. Lu P, Gao Q, Lv L, Xue X, Wang Y. Numerical Calculation Method of Model Predictive Control for Integrated Vehicle Thermal Management Based on Underhood Coupling Thermal Transmission. *Energies*. 2019;12(2):259. doi: 10.3390/en12020259.
9. Wan Ramli WR, Pesyridis A, Gohil D, Alshammari F. Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery for Passenger Hybrid Electrical Vehicles. *Energies*. 2020;13(17):4532. doi: 10.3390/en13174532.
10. Barlow T.J., Latham S., McCrae I.S., Boulter P.G. A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions. Berkshire: TRL Limited; 2009.
11. Hardy M. Pareto's Law. *The Mathematical Intelligencer*. 2010;32(3):38-43. doi: 10.1007/s00283-010-9159-2.
12. Ma Y., Ma Q., Liu Y., Gao J., Chen H. Two-Level Optimization Strategy for Vehicle Speed and Battery Thermal Management in Connected and Automated EVs. *Applied Energy*. 2024;361:122928. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122928.
13. Yuan X.H., Wu G., Zhou J.G., Xiong X, Wang YP. MPC-Based Thermal Management for Water-Cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Energy Reports*. 2022;8:338-348.
14. Sanguesa J.A., Barrachina J., Fogue M., Garrido P., Martinez F.J., Cano J.C., et al. Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications. *Sensors*. 2015;15(12):31794-31810. doi: 10.3390/s151229889.

**Дата поступления
в редакцию: 17.11.2025**

**Дата принятия
к публикации: 18.04.2026**