

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ ЕЕ ХРАНЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Н.П. Деменков¹

У Сяоган²

dnp@bmstu.ru

xgwu@hrbust.edu.cn

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Харбинский университет науки и технологий, Харбин, Китайская Народная Республика

Аннотация

Для электрического транспортного средства с полуактивной системой хранения энергии, рассмотренного в качестве объекта, при выборе стратегии управления предложено использовать метод выпуклой оптимизации, а в качестве целевой функции — минимальное потребление энергии и минимальный диапазон изменения мощности батареи. С учетом характеристик и дорожных условий эксплуатации городского электрического автобуса проведен сравнительный анализ энергоэффективности батареи и изменения ее мощности, полученных с помощью предлагаемого метода оптимизации и методом правил для распределения энергии. Результаты моделирования показали, что при использовании предложенного метода оптимизации энергетическая эффективность батареи составила 93,46 %, энергетическая эффективность конденсаторного накопителя — 98,81 %, мощность батареи — 14,56 кВт. Энергетическая эффективность батареи увеличилась на 0,74 %, энергетическая эффективность конденсаторного накопителя — на 0,26 %, а мощность батареи снизилась на 82,23 %

Ключевые слова

Сложная полуактивная система хранения энергии, распределение электроэнергии, выпуклая оптимизация, энергетическая эффективность, мощность батареи, конденсаторный накопитель

Поступила в редакцию 03.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. Экологические проблемы, ограниченность запасов традиционных топлив, а также ужесточение требований законодательства к сокращению выбросов вредных веществ с отработавшими газами вызывают повышенный интерес к альтернативным системам привода транспортных средств.

Автобусы как средство общественного транспорта могут значительно уменьшить проблемы, связанные с загрязнением воздуха в условиях больших городов, в частности, вследствие использования инновационных систем привода. Развитие систем привода транспортных средств все более ориентировано на электрификацию силовых установок, что позволяет снизить выбросы вредных веществ, повысить суммарную эффективность, уменьшить потребление топлива и уровень шума, а в перспективе и расходы на обслуживание транспортного средства.

В зависимости от используемой схемы гибридные транспортные средства (Hybrid Electric Vehicles, HEV) приводят в движение с помощью электрического двигателя и (или) двигателя внутреннего сгорания. Гибридные транспортные средства с подзарядкой накопителя электрической энергии (Plug-in Electric Vehicles, PHEV) ввиду наличия возможности зарядки накопителя электрической энергии от бытовой сети, либо на специализированной заправочной станции для небольших суточных пробегов могут исключить потребление традиционного топлива.

Электрические транспортные средства (Battery Electric Vehicles, BEV) приводят в движение с помощью одного или нескольких электрических двигателей, используя энергию накопителя, в качестве которого могут выступать как электрохимические элементы, так и конденсаторы.

Городской электрический автобус перемещается в условиях вождения с нередкими изменениями частоты, текущей скорости заряда и разряда аккумулятора. На выбор и жизненный цикл аккумулятора энергосистемы электрического транспортного средства влияет стратегия сохранения энергии [1, 2]. Для решения этой проблемы в работе [3] была предложена комбинированная система хранения энергии, которая оптимизировала конструктивно систему хранения энергии электрического транспортного средства. Высокую удельную мощность и энергетическую эффективность характеристик достигают за счет применения конденсаторного накопителя (суперконденсатора), который все чаще используют в системе хранения энергии электрических транспортных средств [4, 5].

Оптимизированная конструкция и оптимизация распределения энергии в системе хранения энергии для электрических транспортных средств приведены в работах [6, 7]. Для полуактивной комбинированной системы хранения энергии с различными структурами в работе [8] предложено использовать метод динамического программирования, чтобы оптимизировать выбор решения и характеристики системы хранения энергии. Модифицированная полуактивная комбинированная система хранения энергии, в которой также использован метод динамического программирования для оптимизации выбора решения и характеристик, представлена в работе [9]. Для выбора структуры электрических транспортных средств с полуактивной системой хранения энергии в работе [10] предложен метод выпуклой оптимизации. Если структура сложной системы хранения энергии определена, то можно оптимизировать распределение энергии между источниками энергии, что повысит ее энергетическую эффективность [11].

В целях улучшения распределения энергии в электрическом транспортном средстве для полуактивной системы хранения энергии предложены методы управления энергией на основе правил [12, 13], нечеткой стратегии [14], выпуклой оптимизации [15], динамического программирования и нечеткой логики [16]. Метод динамического программирования позволяет решать нелинейные и невыпуклые задачи, однако требует значительного увеличения числа переменных и

экспоненциального увеличения времени вычислений. Метод нечеткой логики предполагает наличие опытного эксперта. Использование метода выпуклой оптимизации позволяет избежать как недостатков метода динамического программирования, так и метода нечеткой логики [17, 18].

В настоящей статье рассмотрена полуактивная система хранения энергии с батареями и конденсаторными накопителями для электрического автобуса (объект). В качестве цели оптимизации предложен критерий минимальной потери энергии и диапазон изменения мощности батареи. Для распределения мощности в комбинированной системе хранения энергии использован метод выпуклой оптимизации. На основе этого предложен способ наращивания потенциала для повышения энергетической эффективности системы.

Анализ сложной системы хранения энергии для электрических транспортных средств. Существует три типа конфигураций комбинированной системы хранения энергии: 1) пассивные; 2) полностью активные; 3) полуактивные.

Пассивная конфигурация комбинированной системы хранения энергии представляет собой простейшую комбинацию батареи и конденсаторного накопителя (рис. 1, а), который, как правило, играет роль фильтра нижних частот. Когда изменение энергии происходит не особенно быстро, основным источником питания является батарея. Если изменение энергии более динамично, то основным источником питания становится конденсаторный накопитель. Такая конфигурация имеет высокую эффективность и низкую стоимость, однако использование конденсаторного накопителя ограничено, так как трудно контролировать процесс перераспределения энергии.

Активная конфигурация комбинированной системы хранения энергии показана на рис. 1, б. Управляя двумя импульсными регуляторами постоянного тока, можно достичь эффективного распределения энергии между конденсаторным накопителем и батареей. Однако алгоритм управления такой конфигурацией весьма сложен, что приводит к снижению эффективности системы и увеличивает затраты на нее.

Полуактивная конфигурация комбинированной системы хранения энергии приведена на рис. 1, в. Такая конфигурация весьма проста, но главная проблема ее использования заключается в том, что конденсаторный накопитель подключен непосредственно к нестабильному напряжению на прямоточной шине постоянного тока.

В настоящей работе объектом исследования является конфигурация, представленная на рис. 1, г. Предложенная конфигурация позволяет легко обеспечить стабильное напряжение прямоточной шины постоянного тока, а также сократить расходы на создание и эксплуатацию системы.

Моделирование комбинированной системы хранения энергии и формулирование проблемы. Перейдем к моделированию динамической системы, а также к моделированию батареи и конденсаторного накопителя.

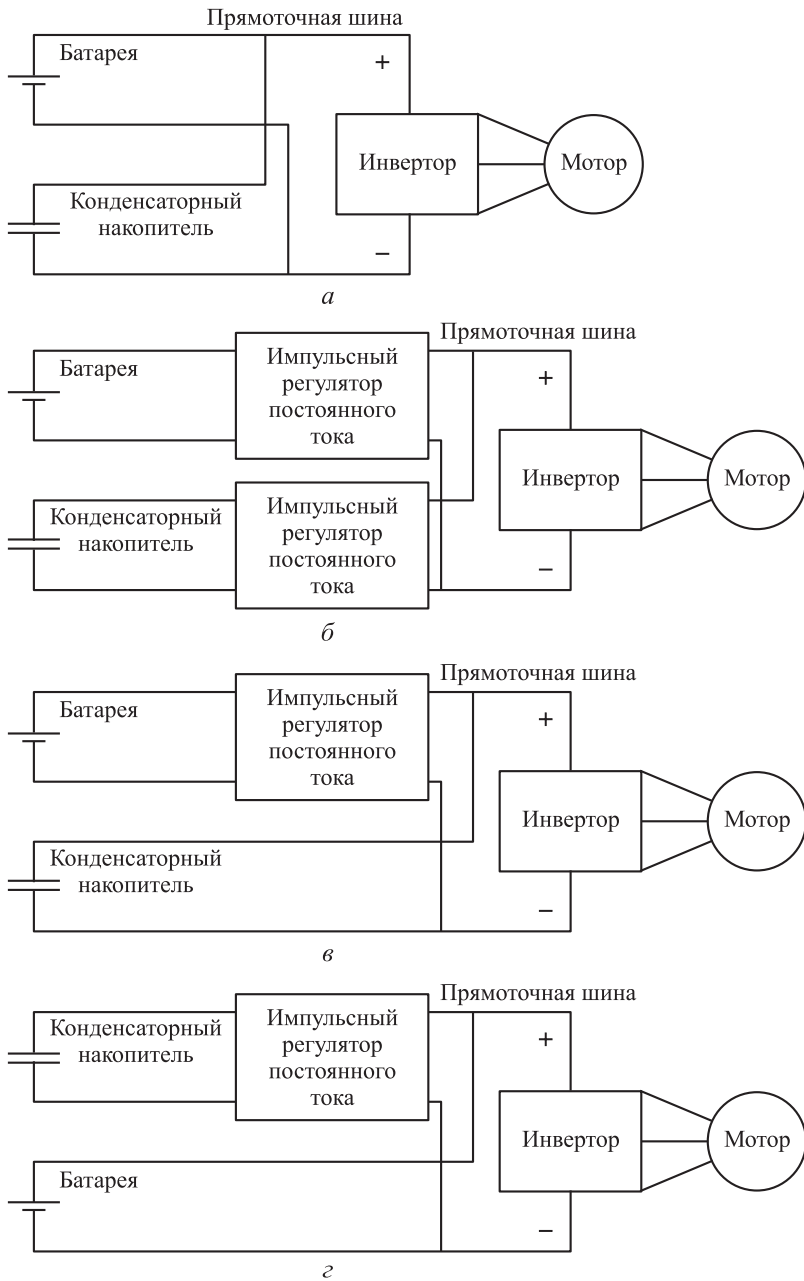


Рис. 1. Пассивная (а), активная (б) и полуактивные (в, г) конфигурации комбинированных систем хранения энергии

Моделирование динамической системы. При движении автобуса по дороге тяговые двигатели должны преодолеть силу сопротивления (F_t), включающую в себя сопротивление качению (F_f), сопротивление воздуха (F_w), сопротивление наклона (F_i), сопротивление ускорения (F_j):

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j; \quad F_f = fmg \cos \alpha; \quad F_i = mg \sin \alpha; \quad F_w = \frac{1}{2} C_d A \rho v_a^2; \quad F_j = ma,$$

где f — коэффициент сопротивления качению; m — масса автобуса; g — ускорение силы тяжести; α — угол наклона дороги; C_d — коэффициент сопротивления воздуха; A — наветренная площадь транспортного средства; ρ — плотность воздуха; u_a — скорость потока воздуха; a — ускорение.

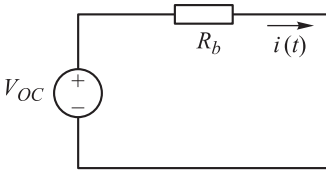


Рис. 2. Модель батареи

Моделирование батареи и конденсаторного накопителя. Модель батареи приведена на рис. 2 [19]. Зависимость напряжения разомкнутой цепи холостого хода железо-литиевой батареи (u_b) от состояния заряда батареи (SOC_b) показана на рис. 3. Цветом выделена наилучшая область работы батареи. Состояние заряда батареи SOC_b и напряжение холостого хода u_b приблизительно связаны линейным соотношением

$$u_b = \frac{du_b}{d(SOC_b)} SOC_b + u_{b0},$$

где u_b — напряжение холостого хода; u_{b0} — напряжение разомкнутой цепи при $SOC_b = 0$. Напряжение u_{b0} и производная $du_b/d(SOC_b)$ могут быть получены аппроксимацией данных.

Реальная выходная мощность батареи

$$P_{bt} = P_b - P_{bloss}, \quad (1)$$

где P_b — выходная мощность аккумуляторной батареи при идеальных условиях; P_{bloss} — потери мощности на внутреннем сопротивлении батареи.

Отношение мощности и полной энергии батареи имеет вид $E_b = -\int P_b dt$. Полную энергию аккумулятора также можно определить как

$$E_b = \frac{n_b C_b}{2} (u_b^2 - u_{b0}^2).$$

Здесь n_b — число батарей; C_b — емкость аккумулятора.

Потеря мощности на внутреннем сопротивлении аккумуляторной батареи составляет

$$P_{bloss} = n_b i_b^2 R_b = \frac{R_b C_b P_b^2}{2E_b + u_{b0}^2 C_b n_b},$$

где R_b — внутреннее сопротивление батареи; i_b — ток элемента батареи. Энергия E_b и мощность P_b связаны соотношением

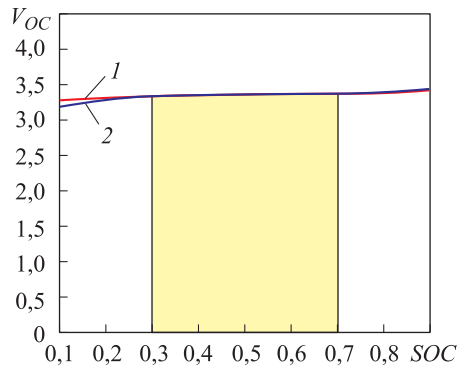


Рис. 3. Зависимость напряжения разомкнутой цепи от состояния заряда батареи:

1 — инструментальные данные; 2 — выравнивающая кривая

$$\frac{dE_b}{dt} = -P_b. \tag{2}$$

Для оптимизации распределения энергии требуется, чтобы уравнение с выпуклыми ограничениями было линейным и аффинным. Формула (2) является аффинной линейной зависимостью и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ограничениям при использовании выпуклой оптимизации.

Ограничение на ток элемента батареи следует из ограничения для заряда батареи

$$I_{b \min} \sqrt{n_b \left(\frac{2E_b}{C_b} + u_{b0}^2 n_b \right)} \leq P_b \leq I_{b \max} \sqrt{n_b \left(\frac{2E_b}{C_b} + u_{b0}^2 n_b \right)}, \tag{3}$$

где $I_{b \min}$, $I_{b \max}$ — минимальный и максимальный выходной ток элемента батареи.

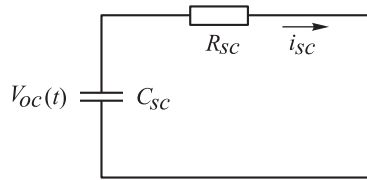
Состояние заряда батареи $SOC_b \in [SOC_{b \min}, SOC_{b \max}]$, поэтому имеется следующее ограничение для энергии батареи:

$$\frac{C_b n_b}{2} (u_b^2 (SOC_{b \min}) - u_{b0}^2) \leq E_b \leq \frac{C_b n_b}{2} (u_b^2 (SOC_{b \max}) - u_{b0}^2). \tag{4}$$

Здесь $SOC_{b \min}$, $SOC_{b \max}$ — установленные значения минимального и максимального заряда батареи. Неравенство (4) используют для выполнения требований выпуклой оптимизации.

Эквивалентная модель конденсаторного накопителя показана на рис. 4 [19].

Рис. 4. Эквивалентная модель конденсаторного накопителя (R_{sc} — эквивалентное последовательное сопротивление конденсаторного накопителя)



Запишем уравнение, определяющее связь состояния накопителя SOC_{sc} и напряжения холостого хода u_{sc} конденсаторного накопителя:

$$u_{sc} = \frac{du_{sc}}{d(SOC_{sc})} SOC_{sc} + u_{sc0},$$

где u_{sc0} — напряжение холостого хода конденсаторного накопителя при $SOC_{sc} = 0$. Напряжение u_{sc0} и производная $\frac{du_{sc}}{d(SOC_{sc})}$ могут быть получены аппроксимацией данных.

Реальную выходную мощность конденсаторного накопителя определяют по уравнению

$$P_{sct} = P_{sc} - P_{scloss}, \tag{5}$$

где P_{sc} — выходная мощность конденсаторного накопителя при идеальных условиях; P_{scloss} — потери мощности на эквивалентном сопротивлении конденсаторного накопителя.

Полную энергию конденсаторного накопителя находят по формуле $E_{sc} = -\int P_{sc} dt$, или по соотношению

$$E_{sc} = \frac{n_{sc} C_{sc}}{2} (u_{sc}^2 - u_{sc0}^2).$$

Здесь n_{sc} — число конденсаторных накопителей; C_{sc} — емкость конденсаторного накопителя.

Потеря мощности на эквивалентном сопротивлении конденсаторного накопителя составляет

$$P_{scloss} = \frac{R_{sc} C_{sc} P_{sc}^2}{2E_{sc} + u_{sc0}^2 C_{sc} n_{sc}}. \quad (6)$$

Уравнение, определяющее отношение энергии E_{sc} и мощности P_{sc} конденсаторного накопителя:

$$\frac{dE_{sc}}{dt} = -P_{sc}. \quad (7)$$

Уравнение (7) является аффинным, т. е. соответствует требованиям, предъявляемым к ограничениям для выпуклой оптимизации. Мощность P_{sc} ограничена

$$I_{sc \min} \sqrt{n_{sc} \left(\frac{2E_{sc}}{C_{sc}} + u_{sc0}^2 n_{sc} \right)} \leq P_{sc} \leq I_{sc \max} \sqrt{n_{sc} \left(\frac{2E_{sc}}{C_{sc}} + u_{sc0}^2 n_{sc} \right)}, \quad (8)$$

где $I_{sc \min}$, $I_{sc \max}$ — минимальный и максимальный выходной ток конденсаторного накопителя.

Для энергии конденсаторного накопителя также существуют следующие ограничения $SOC_{sc} \in [SOC_{sc \min}, SOC_{sc \max}]$:

$$\frac{C_{sc} n_{sc}}{2} (u_{sc}^2 (SOC_{sc \min}) - u_{sc0}^2) \leq E_{sc} \leq \frac{C_{sc} n_{sc}}{2} (u_{sc}^2 (SOC_{sc \max}) - u_{sc0}^2). \quad (9)$$

Здесь $SOC_{sc \min}$, $SOC_{sc \max}$ — установленные значения минимального и максимального заряда конденсаторного накопителя. Для емкости конденсаторного накопителя справедливы начальные условия в каждом состоянии

$$E_{sc}(t_0) = E_{sc}(t_f), \quad (10)$$

где t_0 — начальное время цикла; t_f — время завершения цикла.

Ограничения для конденсаторного накопителя в виде неравенств соответствуют требованиям, предъявляемым к неравенствам для выпуклой оптимизации.

Стратегия управления энергией на основе выпуклой оптимизации. Стандартная формулировка задачи выпуклой оптимизации: необходимо минимизировать функцию $f_0(x)$ при выполнении требований $f_i(x) \leq 0$, $i = 1, \dots, m$, $a_i^T x = b_i$, $i = 1, \dots, p$, где f_0, \dots, f_m — выпуклые функции. Функции ограничения в виде равенств должны быть аффинными.

В настоящей работе при оптимизации использованы переменные: выходная мощность батареи при идеальных условиях P_b ; реальная выходная мощность

батареи P_{b5} ; энергия батареи E_b ; выходная мощность конденсаторного накопителя при идеальных условиях P_{sc} ; реальная выходная мощность конденсаторного накопителя P_{sct} ; энергия конденсаторного накопителя E_{sc} . Применены ограничения (1), (2)–(4), (5), (6), (8)–(9), а также $P_T + P_{Tloss} + P_{aux} = P_{hess}$, P_T — выходная мощность тягового электродвигателя; P_{Tloss} — потери мощности тягового электродвигателя; P_{aux} — выходная мощность электрической вспомогательной системы; P_{hess} — выходная мощность комплексной системы хранения энергии.

Для того чтобы уменьшить изменение диапазона мощности батареи примем целевую функцию $\int_{t_0}^{t_f} |P_b - P_{thre}| dt$, где P_{thre} — средняя потребляемая мощность машины, с учетом проблемы потребления электрической энергии — целевую функцию $\int_{t_0}^{t_f} P_b dt$. Следовательно, в качестве целевой функции целесообразно выбрать функцию

$$f = \eta \int_{t_0}^{t_f} |P_b - P_{thre}| dt + (1 - \eta) \int_{t_0}^{t_f} P_b dt,$$

где η — коэффициент, который можно изменять в соответствии с потребностями практических задач.

Алгоритм распределения потребляемой мощности между двумя источниками энергии показан на рис. 5.

Результаты моделирования и анализа. Для проверки эффективности предложенного метода и сравнения алгоритмов оптимизации распределения энергии методом выпуклой оптимизации и методом правил были выбраны параметры системы хранения энергии городского электрического автобуса (рис. 6) и условия его движения [20].

Параметры системы хранения энергии электрического автобуса

Масса автобуса m , т	13
Наветренная площадь транспортного средства A , м ²	7,83
Коэффициент сопротивления:	
воздуха C_d	0,75
качению f	0,007
Плотность воздуха ρ , кг/м ³	1,225
Радиус колеса r , м	0,512
Выходная мощность электрической вспомогательной системы P_{aux} кВт	5,0
Передаточное отношение i_0	6,2
Емкость:	
аккумуляторной батареи C_b , А · ч	80
конденсаторного накопителя C_{sc} , Ф	2000
Напряжение холостого хода, В:	
батареи u_b	3,2
конденсаторного накопителя u_{sc}	2,7

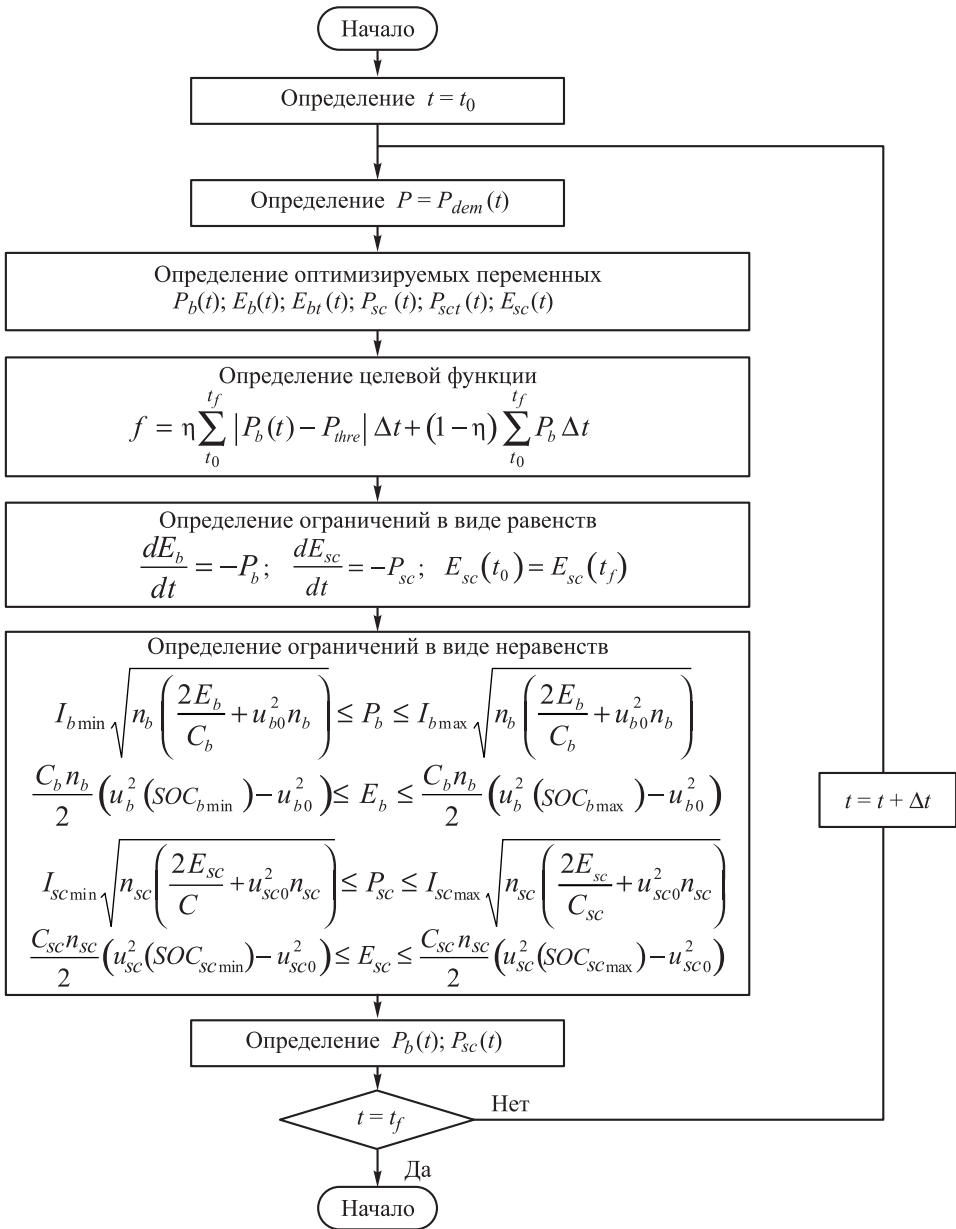


Рис. 5. Алгоритм оптимизации распределения мощности между источниками энергии (P, P_{dem} — определяемая и потребляемая мощность машины; t — текущее время; Δt — приращение времени)

Алгоритм оптимизации распределения мощности методом правил приведен на рис. 7. Текущее состояние распределения мощности между конденсаторным накопителем и батареей для двух алгоритмов распределения энергии показано на рис. 8. Диапазон изменения мощности батареи при методе выпуклой оптимизации составляет 14,56 кВт. По сравнению с оптимизацией распределения питания методом правил диапазон изменения мощности батареи снизился на 82,23 %.

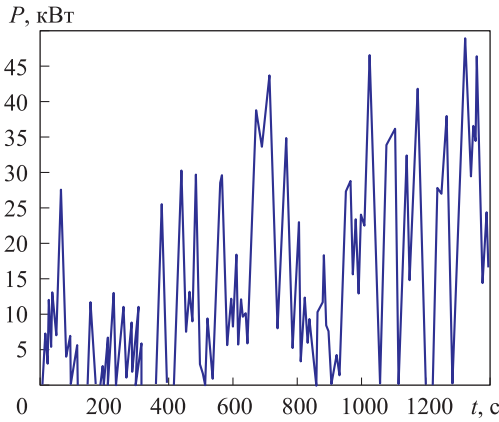


Рис. 6. Зависимость скорости движения автобуса от времени

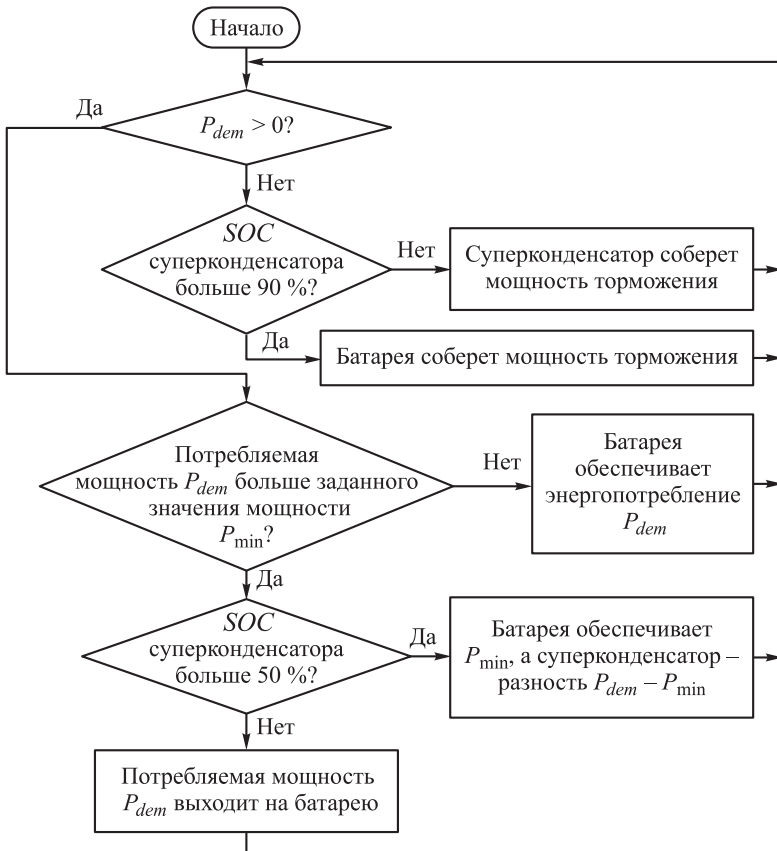


Рис. 7. Алгоритм распределения энергии методом правил

Энергетическая эффективность алгоритмов оптимизации распределения энергии для различных систем автобуса показана на рис. 9. При использовании метода выпуклой оптимизации энергетическая эффективность системы двигателя составила 84,8 % (увеличилась на 9,91 % по сравнению с оптимизацией

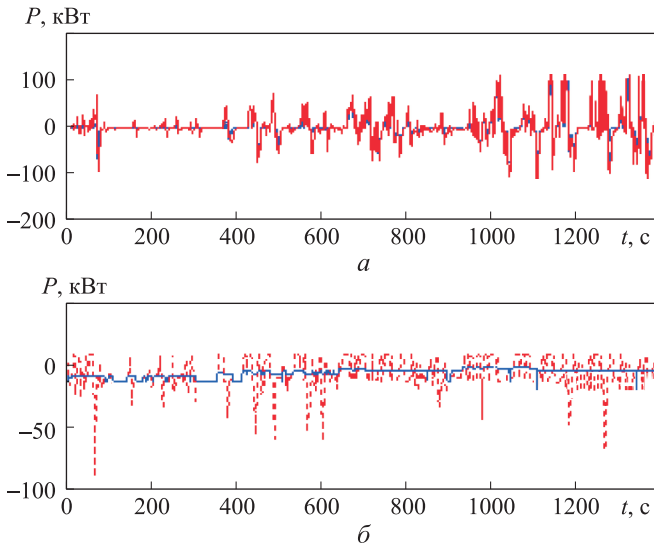


Рис. 8. Зависимость мощности от времени для конденсаторного накопителя (а) и батареи (б):

1 — метод выпуклой оптимизации; 2 — метод правил

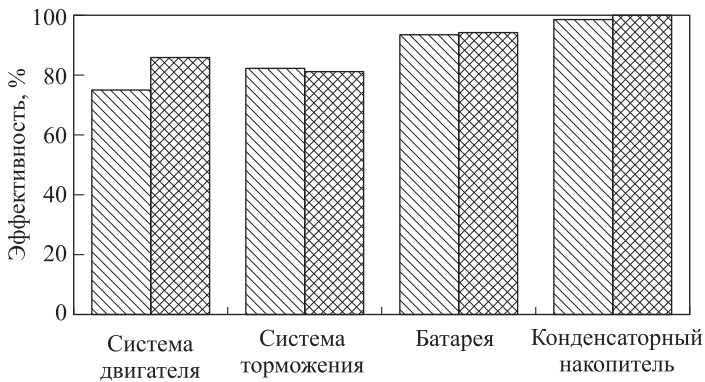


Рис. 9. Энергетическая эффективность различных алгоритмов оптимизации распределения энергии:

1 — метод выпуклой оптимизации; 2 — метод правил

распределения энергии методом правил). Энергетическая эффективность системы торможения — 80,99 % (уменьшилась на 0,97 % по сравнению с оптимизацией распределения энергии методом правил). Энергетическая эффективность батареи и конденсаторного накопителя составили 93,46 и 98,81 %. По сравнению с оптимизацией распределения энергии методом правил, энергетическая эффективность батареи и конденсаторного накопителя возросли на 0,74 и 0,26 %. Таким образом, использование метода выпуклой оптимизации для оптимизации распределения мощности позволяет оптимизировать как состояние батареи, так и ее энергетическую эффективность.

Заключение. Исследованы возможности применения метода выпуклой оптимизации для оптимизации распределения энергии в полуактивной комбинированной системе хранения энергии для электрических транспортных средств. Объект моделирования — характеристики городского электрического автобуса и условия его движения. В качестве целевой функции выбрана комплексная функция, обеспечивающая минимальное потребление энергии и минимальный диапазон изменения мощности электрической батареи.

Сравнение проведено с системой, в которой реализована оптимизация распределения энергии между батареей и конденсаторным накопителем методом правил. Установлено, что метод выпуклой оптимизации распределения мощности позволяет улучшить состояние батареи и повысить ее энергетическую эффективность

Дальнейшие исследования предполагают применение рассмотренного метода оптимизации для конструирования системы питания, а также улучшения режимов работы других электрических транспортных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костиков В.Г., Парфенов Е.М., Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование. М.: Горячая линия — Телеком, 2001. 344 с.
2. Вертохвостов А.П., Прокушев Ю.А., Спиридонов Е.А., Штанг А.А., Щуров Н.И. Определение параметров накопительного устройства для электротранспортного комплекса // Электричество. 2007. № 6. С. 53–56.
3. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system / Z. Song, H. Hofmann, J. Li, et al. // Applied Energy. 2014. Vol. 134. No. С. Р. 321–331.
4. Аносов В.Н., Кавешников В.М. Повышение эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 220 с.
5. Щуров Н.И., Штанг А.А., Спиридонов Е.А., Чумачев Д.В. Повышение эффективности использования накопителей энергии в электротранспортном комплексе // Электротехника. 2009. № 12. С. 23–27.
6. Choi M.E., Kim S.W., Seo S.W. Energy management optimization in a battery. Supercapacitor hybrid energy storage system // IEEE Transactions on Smart Grid. 2012. Vol. 3. P. 463–472.
7. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles / Z. Song, J. Li, X. Han, et al. // Applied Energy. 2014. Vol. 135. P. 212–224.
8. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles / Z. Song, H. Hofmann, J. Li, et al. // J. of Power Sources. 2015. Vol. 274. P. 400–411.
9. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach / Z. Song, H. Hofmann, J. Li, et al. // Applied Energy. 2015. Vol. 139. P. 151–162.

10. *Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus* / X. Hu, L. Johannesson, N. Murgovski, et al. // *Applied Energy*. 2015. Vol. 137. P. 913–924.
11. *Equivalent series resistance-based energy loss analysis of a battery semiactive hybrid energy storage system* / C. Zhao, H. Yin, Z. Yang, et al. // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015. Vol. 30. P. 1081–1091.
12. *A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles* / B. Wang, J. Xu, B. Cao, et al. // *J. of Power Sources*. 2015. Vol. 281. P. 432–443.
13. *Santucci A., Sornioti A., Lekakou C. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications* // *J. of Power Sources*. 2014. Vol. 258. No. 14. P. 395–407.
14. *Garcia F.S., Ferreira A.A., Pomilio J.A. Control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system*[C] // *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE. IEEE. P. 826–832.
15. *Choi M., Lee J., Seo S. Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles* // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2014. Vol. 63. No. 8. P. 3600–3611.
16. *Zhang P., Yan F., Du C. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometric* // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 48. P. 88–104.
17. *Component sizing of a plug-in hybrid electric powertrain via convex optimization* / N. Murgovski, L. Johannesson, J. Sjöberg, et al. // *Mechatronics*. 2012. Vol. 22. No. 1. P. 106–120.
18. *Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
19. *ГОСТ 2.728–74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы*. М.: Изд-во стандартов, 2002. 12 с.
20. *Xiaogang Wu, Chen Hu, Jiuyu Du. Development of a driving cycle for city bus in Harbin of China* // *International Journal of Electric and Hybrid Vehicle*. 2015. Vol. 7. No. 2. P. 104–119.

Деменков Николай Петрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Сяоган У — доктор философии, профессор, заведующий кафедрой по научной работе факультета электрической инженерии Харбинского университета науки и технологий (Харбин, Китайская Народная Республика).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Деменков Н.П., Сяоган У. Оптимизация распределения энергии в комплексной системе ее хранения для электрических транспортных средств // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2016. № 5. С. 36–50. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-36-50

OPTIMIZATION OF ENERGY ALLOCATION IN AN INTEGRATED ENERGY STORAGE SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLES

N.P. Demenkov¹

Wu Xiaogang²

dnp@bmstu.ru

xgwu@hrbust.edu.cn

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Harbin University of Science and Technology, Harbin, China

Abstract

Our work considers an electric bus with a semi-active compound storage system as the object. We propose convex optimization method in order to minimize energy consumption and power range of battery as a target function. Based on the traffic conditions of urban electric buses we conducted a comparative analysis of energy efficiency and power change of battery using proposed rule-based optimization method and power allocation method. Simulation results show that, in the city electric bus working conditions, under proposed convex optimization of power allocation method, battery and supercapacitor comprehensive energy efficiency were 93.46% and 98.81%, battery power range within 14.56 kW. With the rule-based power allocation method energy efficiency of battery increased by 0.74%, energy efficiency of supercapacitor increased by 0.26%, power range of battery decreased by 82.23%

Keywords

Semi-active composite energy storage system, power allocation, convex optimization, energy efficiency analysis, power battery, supercapacitor

REFERENCES

- [1] Kostikov V.G., Parfenov E.M., Shakhnov V.A. Istochniki elektropitaniya elektronnykh sredstv. Skhemitekhnika i konstruirovaniye [Power sources of electronic means. Circuitry and design]. Moscow, Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2001. 344 p.
- [2] Vertokhvostov A.P., Prokushev Yu.A., Spiridonov E.A., Shtang A.A., Shchurov N.I. Characterization of the storage device for electric transport complex. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 6, pp. 53–56 (in Russ.).
- [3] Song Z., Hofmann H., Li J., et al. Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system. *Applied Energy*, 2014, vol. 134, no. C, pp. 321–331.
- [4] Anosov V.N., Kaveshnikov V.M. Povysheniye effektivnosti sistem tyagovogo elektroprivoda avtonomnykh transportnykh sredstv [Improving the efficiency of the electric traction drive systems of autonomous vehicles]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2014. 220 p.
- [5] Shchurov N.I., Shtang A.A., Spiridonov E.A., Chumachev D.V. Improving the efficiency of using energy storage devices in electric transport systems. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2009, no. 12, pp. 23–27 (in Russ.).
- [6] Choi M.E., Kim S.W., Seo S.W. Energy management optimization in a battery. Supercapacitor hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, vol. 3, pp. 463–472.
- [7] Song Z., Li J., Han X., et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles. *Applied Energy*, 2014, vol. 135, pp. 212–224.

- [8] Song Z., Hofmann H., Li J., et al. A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles. *J. of Power Sources*, 2015, vol. 274, pp. 400–411.
- [9] Song Z., Hofmann H., Li J., et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach. *Applied Energy*, 2015, vol. 139, pp. 151–162.
- [10] Hu X., Johannesson L., Murgovski N., et al. Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus. *Applied Energy*, 2015, vol. 137, pp. 913–924.
- [11] Zhao C., Yin H., Yang Z., et al. Equivalent series resistance-based energy loss analysis of a battery semiactive hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, vol. 30, pp. 1081–1091.
- [12] Wang B., Xu J., Cao B., et al. A novel multimode hybrid energy storage system and its energy management strategy for electric vehicles. *J. of Power Sources*, 2015, vol. 281, pp. 432–443.
- [13] Santucci A., Sornioti A., Lekakou C. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications. *J. of Power Sources*, 2014, vol. 258, no. 14, pp. 395–407.
- [14] Garcia F.S., Ferreira A.A., Pomilio J.A. Control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[C]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009. APEC 2009. *Twenty-Fourth Annual IEEE. IEEE*, pp. 826–832.
- [15] Choi M., Lee J., Seo S. Real-time optimization for power management systems of a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611.
- [16] Zhang P., Yan F., Du C. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometric. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 48, pp. 88–104.
- [17] Murgovski N., Johannesson L., Sjöberg J., et al. Component sizing of a plug-in hybrid electric powertrain via convex optimization. *Mechatronics*, 2012, vol. 22, no. 1, pp. 106–120.
- [18] Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization. Cambridge, U.K., Cambridge Univ. Press, 2004.
- [19] Standard RF GOST 2.728–74 ESKD. Oboznacheniya uslovnnye graficheskie v skhemakh. Rezistory, kondensatory [State Standard 2.728–74 ESKD. Graphical symbols in diagrams. Resistors, capacitors]. Moscow, Izd. standartov Publ., 2002. 12 p.
- [20] Xiaogang Wu, Chen Hu, Jiuyu Du. Development of a driving cycle for city bus in Harbin of China. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicle*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 104–119.

Demenkov N.P. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Automatic Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Xiaogang Wu — Ph. D., Professor, Head of the Department for Research, Faculty of Electrical Engineering, Harbin University of Science and Technology (52 Xuefu Rd, Nangang, Harbin, Heilongjiang, 150080 China).

Please cite this article in English as:

Demenkov N.P., Xiaogang Wu. Optimization of Energy Allocation in an Integrated Energy Storage System for Electric Vehicles. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2016, no. 5, pp. 36–50.

DOI: 10.18698/0236-3933-2016-5-36-50