

В роботі розглянуті питання, пов'язані із розробкою математичної моделі електромобіля (ЕМ) з комбінованими режимами енергоживлення. Запропоновано математичну модель, в основі якої лежить розроблений авторами алгоритм розділення потужності між тяговою акумуляторною батареєю та блоком суперконденсаторів в системі енергоживлення ЕМ. Результати можуть бути використані для проведення інженерних розрахунків та вдосконалення систем енергоживлення електромобілів

Ключові слова: математична модель, обчислювальний експеримент, електромобіль з комбінованими режимами енергоживлення, суперконденсатор

*В работе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой математической модели электромо-
биля (ЭМ) с комбинированными режимами энер-
гопитания. Предложена математическая модель,
основой которой является разработанный авто-
рами алгоритм разделения мощности между тяго-
вой аккумуляторной батареей и блоком супер-
конденсаторов в системе энергопитания ЭМ.
Результаты могут быть применены для проведе-
ния инженерных расчетов и усовершенствования
систем энергопитания электромобилей*

*Ключевые слова: математическая модель,
вычислительный эксперимент, электромобиль
с комбинированными режимами энергопитания,
суперконденсатор*

УДК 519.673

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50612

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С КОМБИНИРОВАННЫМИ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОПИТАНИЯ

С. В. Попов

Доктор технических наук,
главный научный сотрудникПроблемная научно-исследовательская лаборатория
"Автоматизированные системы управления"*

E-mail: Serge.Popov@gmx.net

М. Ю. Гуртовой

Младший научный сотрудник
Кафедра микроэлектроники,

электронных приборов и устройств*

E-mail: misha.gurtovoy@ukr.net

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Одним из приоритетных направлений развития экологически чистого транспорта являются гибридные автомобили и электромобили. Это объясняется тем, что по своим экологическим характеристикам электрический транспорт значительно превосходит различные виды транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания.

Исследование характеристик аккумуляторных батарей (АКБ), как базового элемента тяговой системы электромобилей (ЭМ), показало, что АКБ характеризуются большой энергоемкостью, которую можно дискретно наращивать, и ограничением по максимальному пиковому току. Это очень важно на этапе пуска, ускорения, а также в стандартном цикле вождения.

В настоящее время во многих работах отмечаются положительные качества суперконденсаторов (СК), которые могут эффективно применяться для сглаживания пиковых токов, возникающих в системах энергопитания. Существенное внимание уделяется применению СК в системах с электрохимическими источниками питания (в частности с АКБ), используемыми в качестве основных в автономных транспортных средствах [1, 2].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Анализ литературных данных показывает, что вопрос стратегии для управления накопителями энергии остается актуальным. Фильтр высоких частот, рассмотренный в работе [3], вероятно не лучший подход для разделения мощности во многих автомобильных приложениях за исключением некоторых специфических случаев. Данные о достигаемой дальности пробега ЭМ авторы не приводят.

Применение алгоритма для регуляции напряжения на зажимах СК в работе [4] имеет явное преимущество перед работой [3], которое сводится к невозможности выхода напряжения за пределы, независимо от величины токового сигнала. Приведены результаты моделирования для повышенной температуры блока СК, но сведения о дальности пробега ЭМ и сроке службы АКБ отсутствуют. Энергетические потери при моделировании системы АКБ-СК детально рассмотрены в работе [5]. В работах [6, 7] ток АКБ был сокращен на 70 % и 50 % соответственно, что сэкономило срок службы АКБ, но точное вычисление числа оставшихся циклов было вне области исследований этой и предыдущих работ.

Авторы работы [8] включили методы машинного обучения в стратегию управления для сокращения

разрядного тока АКБ. Недостатком эксперимента является сравнительно небольшая дистанция для тестирования, в рамках которой пробег был увеличен на 28 %. Анализ переходных процессов, приведенный в работе [9], показывает, что происходит значительное сглаживание тока АКБ и в результате время пробега возрастает более чем на 37 %. С другой стороны, нерешенным остается вопрос о сроке службы АКБ.

3. Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка математической модели ЭМ с комбинированными режимами энергопитания для стандартных циклов вождения.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- исследование зависимости дальности пробега ЭМ с комбинированными режимами энергопитания от глубины разряда АКБ;
- исследование изменения срока службы АКБ.

4. Формализация задачи разработки модели электромобиля с комбинированными режимами энергопитания

4.1. Моделирование суперконденсатора

Модель предназначена для имитации ЭМ в стандартном цикле движения. Модель основана на скорости, крутящем моменте, потребляемой двигателем электрической мощности, выдаваемой двигателем механической мощности, глубины разряда АКБ и степени заряженности СК с учетом его динамических состояний.

Учитывая тот факт, что в расчетных режимах городских электромобилей имеет место изменение уровней мощности в режиме пуска ЭМ и при его движении с установившейся скоростью, при моделировании было принято, что комбинированная энергоустановка работает следующим образом:

1) при равномерном движении электромобиля единственным источником энергии являются аккумуляторные батареи;

2) при разгоне электромобиля мощность к колесам подводится только от суперконденсатора; для внутригородского ЭМ в случае повторного ускорения после набора постоянной скорости источником энергии являются аккумуляторные батареи, т. к. это связано с определенным ограничением, накладываемым на отношение массы гибридной энергоустановки к массе самого ЭМ, как указано в работе [10]; в случае реализации комбинированной энергоустановки для электробуса и грузового ЭМ при повторном ускорении после набора постоянной скорости единственным источником энергии является блок СК;

3) при торможении электромобиля кинетическая энергия движения рекуперируется в СК, аккумулятор не участвует в процессе рекуперации;

4) при снижении запаса энергии СК до критического уровня происходит его полная зарядка постоянной мощностью от АКБ.

Чтобы определить достаточные энергетические ресурсы суперконденсатора, следует промоделировать пиковую мощность. Подход состоит в том, что СК должен обеспечить всю энергию во время ситуаций, когда происходят самые высокие расходы энергии в системе энергопитания.

Максимальная энергия $E_{СК,пик,макс}$ СК для пиковой мощности может быть найдена из уравнения (1)

$$E_{СК,пик,макс} = (1 - SoC_{СК,мин}) \cdot E_{СК,макс}, \quad (1)$$

где SoC – степень заряженности СК [11], определяется из уравнения (2)

$$SoC = \frac{V_{xx}}{V_{СКmax}}, \quad (2)$$

где V_{xx} – напряжение холостого хода СК.

На практике, чтобы получить требуемую величину энергии, следует увеличить запасаемую энергию СК из-за потерь при передаче мощности на ведущие колеса. Также потери будут в самом СК, DC-DC-преобразователе, инверторе и электродвигателе.

Ток СК в режиме заряд-разряд следует определить из выражения (3)

$$i_{СК} = \frac{P_{мот}}{\beta \cdot V_{СК}}, \quad (3)$$

где $P_{мот}$ – мощность ЭД. Коэффициент β может быть найден исходя из следующих соотношений:

$$\begin{cases} \beta = \eta_p, \\ \beta = \frac{1}{\eta_s}, \end{cases} \quad (4)$$

где η_p и η_s – эффективность разряда и заряда соответственно.

Ток СК в динамике может быть получен из уравнения (5) согласно работе [12]

$$i_{СК} = \frac{SoC \cdot V_{СКmax} - \sqrt{(SoC \cdot V_{СКmax})^2 - \frac{4 \cdot R_{СК} \cdot P_{мот}}{\beta}}}{2 \cdot R_{СК}}. \quad (5)$$

Во время зарядки система должна ограничить значение напряжения до $V_{СКmax}$. Таким образом, гибридная система должна обеспечить ограничение напряжения на зажимах блока суперконденсаторов, ограничивая их ток, как показано на рис. 1.

СК подзаряжается от АКБ через ключ импульсами ШИМ. На практике эта функция реализована в виде зарядного устройства на основе понижающего DC-DC преобразователя. Модель преобразователя DC-DC в той или иной мере разработана в работе [13], и поэтому детально не рассматривается.

На рис. 2 приведена структурная схема стенда, с помощью которого экспериментально было определено, что коэффициент заполнения D следует выбирать не более чем равным 20 % с целью предотвращения чрезмерного разряда АКБ и минимизации времени заряда СК. СК дозаряжается в этом случае в интервале от 35 с до 1,5 мин.

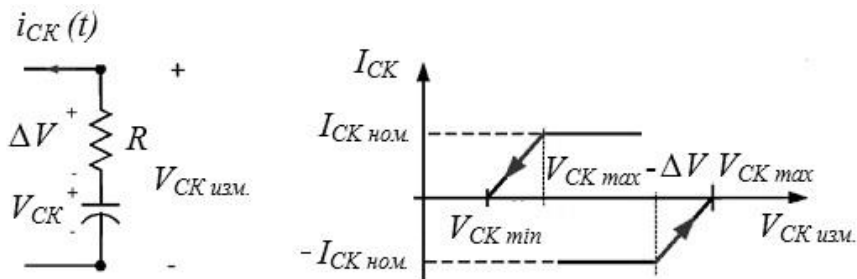


Рис. 1. Эквивалентная схема суперконденсатора и зависимость тока СК $I_{СК}$ от напряжения $V_{СК\ max}$

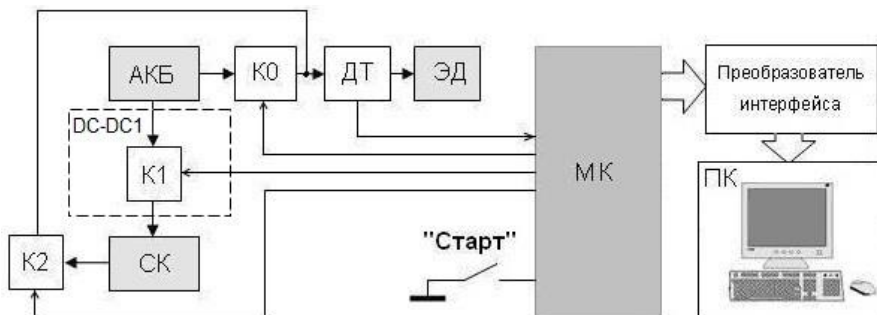


Рис. 2. Структурная схема стенда: МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер; СК – суперконденсатор; АКБ – аккумуляторная батарея; K0, K1, K2 – электронные ключи; ДТ – датчик тока; ЭД – электродвигатель

4. 2. Предлагаемый алгоритм разделения мощности

Одной из основных проблем, которые появляются в управлении, является наличие режима разгона или торможения с вытекающей отсюда сложностью при попытке избежать нестабильности при работе на границе двух различных режимов. Предлагаемая стратегия разделения мощности основана на таком важном параметре управления, как потребляемая и выдаваемая мощность ЭД P_{mot} . При разработке нового метода принимаем во внимание, что мощность суперконденсаторов должна быть достаточна для ускорения, а при полной остановке суперконденсаторы должны быть полностью заряжены для предстоящего ускорения.

На первом этапе вычисляется ускорение и тяговое усилие, а затем выдаваемая или потребляемая мощность ЭД P_{mot} . Далее следует определение возрастания мощности. При определении возрастания мощности (мощность считается пиковой) происходит подключение СК в цепь электропитания ЭД. Эта функция выполняется при условии заряда СК до требуемой величины напряжения $V_{СК\ норм}$. По окончании возрастания мощности происходит отключение СК и ЭД запитан от АКБ (мощность разряда АКБ считается стационарной).

При отрицательной мощности ЭД P_{mot} СК заряжается. Программным путем реализовано ограничение напряжения заряда СК при рекуперации энергии торможения. В свою очередь АКБ не заряжается при рекуперации энергии торможения. В экстренных случаях (например, до начала движения после длительного простоя) СК подзаряжается от АКБ импульсами

ШИМ. На практике эта функция реализована в виде зарядного устройства на основе понижающего DC-DC преобразователя, как указано в работе [14].

Предложено разделять мощность P_{mot} между АКБ и СК с помощью проверки условий на пиковую и стационарную мощность. Т. е. на каждом временном шаге поездки определяется возрастание или спад потребляемой мощности. Как видно из рис. 3, разделение мощности проводится по пропорциональному признаку, что и отличает данную стратегию от вышеуказанных. Этот метод прошел экспериментальное тестирование и настройку на демонстрационном испытательном стенде, описанном в работе [14].

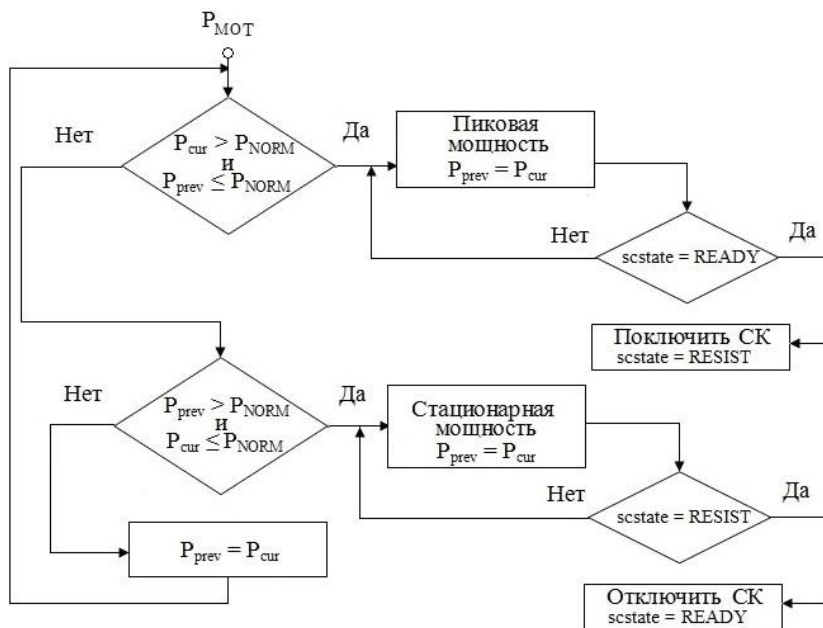


Рис. 3. Алгоритм разделения мощности

4. 3. Исследование зависимости дальности пробега ЭМ с комбинированными режимами энергоспитания от глубины разряда АКБ и изменения срока службы АКБ.

Применяя разработанный алгоритм, стало возможным получить повышение срока службы АКБ. Исходя из того, что ЭМ проезжает стандартный цикл SFUDS за один день (АКБ полностью разряжена), вначале были получены такие параметры, как число оставшихся циклов заряд-разряда АКБ N_{ctf} , а затем вычислен срок службы $CC_{АКБ}$ АКБ для каждой модели ЭМ согласно формул (6)–(9).

Для прогнозирования срока службы АКБ подсчитывают отработанные циклы разряда. В основном, производители приводят данные о количестве циклов, которое может выдержать АКБ при разряде до определенной глубины разряда DoD.

Среди методов подсчета срока службы АКБ самыми известными считаются метод полных эквивалентных циклов [15], метод “rainflow” [15] и метод Шиффера [15]. Выберем метод “rainflow” как один из самых точных.

Метод подсчета циклов, известный как “rainflow”, основан на алгоритме Даунинга [16]. В этом методе подсчитываются циклы заряд-разряд Z_i , соответствующие каждому диапазону значений DOD (разбитого на m интервалов) в течение года. Для каждого интервала существует число оставшихся циклов OC_i , полученных из рис. 4. Тогда срок службы батареи $CC_{АКБ}$ может быть вычислен следующим образом:

$$CC_{АКБ} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{Z_i}{OC_i}} \tag{6}$$

Далее применяя метод подсчета, представленный в работе [15], можно определить число циклов N_{cyc} для каждого уровня разряда. Тогда сокращение срока службы LoL находят из уравнения (7), как указано в работах [15, 16]

$$LoL = \sum_{DOD=0,01}^{DOD=0,9} \frac{N_{cyc}(DOD)}{N_{ctf}(DOD)} \tag{7}$$

где N_{ctf} – число оставшихся циклов, определяется из выражения (8). При LoL=0 АКБ еще не использовалась, а при LoL=1 АКБ выработала срок службы.

Хорошим приближением для числа оставшихся циклов является уравнение (8), полученное из рис. 4:

$$N_{ctf} = -42418 \cdot DoD^4 - 119140 \cdot DoD^3 + 122320 \cdot DoD^2 - 55583 \cdot DoD + 10^3 \tag{8}$$

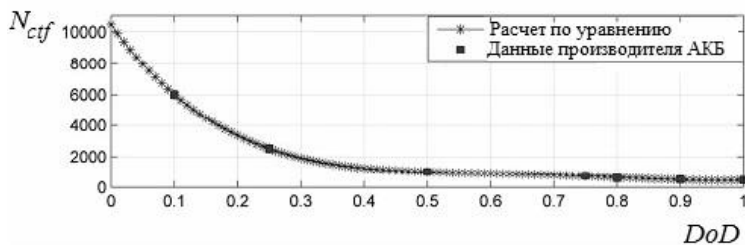


Рис. 4. Зависимость количества оставшихся циклов N_{ctf} от глубины разряда DoD [17]

Следовательно, соотношение для ожидаемого количества дней работы батареи, прежде чем будет достигнуто окончание срока службы, имеет вид

$$N_{d,coef} = \frac{N_d}{LoL} \tag{9}$$

Глубина разряда АКБ DoD определяется, как указано в работе [18]. В табл. 1 сведены параметры моделируемого ЭМ. Далее применяя данные табл. 1, был проведен вычислительный эксперимент, основой которого является алгоритм моделирования дальности пробега, представленный в исходном виде в работе [18] и доработанный авторами с учетом вышеуказанного алгоритма разделения мощности.

Результаты для исходной и разработанной моделей ЭМ сведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что возможно снизить массо-габаритные характеристики АКБ и при этом увеличить дальность пробега ЭМ до очередной зарядки на 8%. В свою очередь, это достигается за счет уменьшения энергоемкости АКБ и применения разработанного алгоритма разделения мощности. Срок службы АКБ в данном случае возрастает почти на 1 год.

Таблица 1

Параметры модели		
№	Параметр	Значение
1	Снаряженная масса (+ полезный груз весом 0,14 т), т	1,48
2	Лобовая площадь, м ²	1,8
3	Коэффициент трения/аэродинамического сопротивления	0,19/0,31
4	КПД передачи η_g	0,95
5	Емкость АКБ, А·ч	55
6	Емкость СК, Ф	6,14
7	Энергия, кВт·ч	17,16
8	Объем СК, м ³	0,025
9	Вес СК, кг	34,8

Таблица 2

Результаты моделирования в цикле SFUDS					
№	Модель ЭМ	Масса АКБ, кг	CC _{АКБ} , лет	Объем АКБ, м ³	Дальность пробега, км
1	Исходная модель [18] (без СК)	594 (C=60 А·ч)	1,6	0,19	180
2	Предложенная модель	504 (C=55 А·ч)	2,5	0,16	194

5. Результаты моделирования электромобиля с комбинированными режимами энергоспитания

Как следует из табл. 2, дальность пробега в разработанной модели возрастает в цикле вождения SFUDS, что связано с ограничением максимального тока разряда АКБ и его сглаживанием. Это достигается, в свою очередь, за счет предложенного алгоритма управления. В то же время в зависимости от ряда условий тщательно разработанный частотный фильтр в некоторых

случаях может работать лучше, чем разделение нагрузки на основе разработанного пропорционального алгоритма.

С ростом возможных комбинаций накопителей энергии будет достигнуто улучшение производительности и в большем числе приложений будет возможно извлечь выгоду из гибридизации. В целом цены на СК падают быстрее, чем цены на АКБ. Несмотря на эти расходы, гибридизация выгодна из-за увеличения дальности пробега и срока службы, а также сохранения всех параметров энергоустановки ЭМ на протяжении всего времени эксплуатации.

6. Выводы

1. Предложено изменить подход к управлению разделением мощности в системе энергоснабжения ЭМ.

Предложено разделять мощность P_{mot} с помощью проверки условий на пиковую и стационарную мощность. Это позволило обеспечить повышение дальности пробега в стандартном цикле вождения на 8%. Малое количество условий, выполнение которых необходимо для генерации сигналов, означает высокую предсказательную ценность разработанного алгоритма разделения мощности. Кроме того, предложенный алгоритм не требует громоздких вычислений.

2. Разработана математическая модель ЭМ с комбинированными режимами энергоснабжения для стандартных циклов вождения, которая позволяет исследовать изменение срока службы АКБ, зависимость дальности пробега ЭМ от глубины разряда АКБ и проводить вычислительные эксперименты с режимами энергоснабжения ЭМ.

Литература

1. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе автомобиля с ионисторами [Электронный ресурс]. – Кременчужский национальный университет им. М. Остроградского. – Режим доступа <http://www.uk.xlibx.com/4mehnika/23929-48-kremenchuckiy-nacionalniy-universitet-imeni-mihayla-ostrogradskogo-mizhnarodna-naukovo-tehnichna-konferenciya-mo.php> – 11.09.2015. – Загл. с экрана.
2. К разработке электропривода автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etks_2011_3_41.pdf – 24.08.2015. – Загл. с экрана.
3. Control of Ultracapacitor-Battery Hybrid Power Source for Vehicular Applications [Electronic resource]. – Available at: <https://thayer.dartmouth.edu/inductor/papers/gsei2008a.pdf> – 24.08.2015. – Title from the screen.
4. Thounthong, P. Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle [Text] / P. Thounthong, S. Rael, B. Davat // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 158, Issue 1. – P. 806–814. doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.09.014
5. Gao, L. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid [Text] / L. Gao, R.A. Dougal, S. Liu // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20, Issue 1. – P. 236–243. doi: 10.1109/tpel.2004.839784
6. Payman, A. Energy management in a fuel cell/supercapacitor multisource/multiload electrical hybrid system [Text] / A. Payman, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, Issue 12. – P. 2681–2690. doi: 10.1109/tpel.2009.2028426
7. Xiong, R. Study on ultracapacitor-battery hybrid power system for PHEV applications [Text] / R. Xiong, H. He, Y. Wang, X. Zhang // High Technology Lett. – 2010. – Vol. 16. – P. 23–28.
8. Ortuzar, M. Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation [Text] / M. Ortuzar, J. Moreno, J. Dixon // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2007. – Vol. 54, Issue 4. – P. 2147–2156. doi: 10.1109/tie.2007.894713
9. Аносов, В. Н. Использование силовых фильтров для увеличения времени межзарядного пробега автономных транспортных средств [Текст] / В. Н. Аносов // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 2–7.
10. Бусыгин, Б. П. Автомобили (Методы расчета) [Текст] / Б. П. Бусыгин. – М.: МАДИ, 1979. – 71 с.
11. Design and Analysis of Fuel-Cell Hybrid Systems Oriented to Automotive Applications [Electronic resource]. – Available at: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7505/design_analysis.pdf – 24.08.2015. – Title from the screen.
12. Ultracapacitor Assisted Powertrains: Modeling, Control, Sizing, and The Impact on Fuel Economy [Electronic resource]. – Available at: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc08/data/papers/0916.pdf> – 24.08.2015. – Title from the screen.
13. Samosir, A. S. Development of a current control ultracapacitor charger based on digital signal processing [Text] / A. S. Samosir // Telkomnika. – 2009. – Vol. 7, Issue 3. – P. 145–150. doi: 10.12928/telkomnika.v7i3.587
14. Слипченко, Н. И. Разработка стенда для исследования тяговой системы автомобиля с суперконденсаторами [Текст] / Н. И. Слипченко, М. Ю. Гуртовой // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 1, № 8 (67). – С. 36–40. doi: 10.15587/1729-4061.2014.19898
15. Sauer, D. U. Comparison of different approaches for lifetime prediction of electrochemical using lead acid batteries as example [Text] / D. U. Sauer, H. Wenz // Journal of Power Sources. – 2008. – Vol. 176, Issue 2. – P. 534–546. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.08.057
16. Downing, S. D. Simple rainflow counting algorithms [Text] / S. D. Downing, D. F. Socie // International Journal of Fatigue. – 1982. – Vol. 4, Issue 1. – P. 31–40. doi: 10.1016/0142-1123(82)90018-4
17. Trojan Battery Company [Electronic resource]. – Available at: http://www.trojanbattery.com/pdf/GEL_SS_web.pdf – 25.08.2015. – Title from the screen.
18. Larminie, J. Electric vehicle technology explained [Text] / J. Larminie, J. Lowry. – John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2003. – 296 p.