

## АКТИВНАЯ БАЛАНСИРОВКА ТЯГОВЫХ СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ

В. В. Медведев<sup>1</sup>, В. И. Мищенко<sup>2</sup>, А. Э. Абдураимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

<sup>2</sup>Компания «Microwatt»

<sup>3</sup>Общество с ограниченной ответственностью «БИО Автомотив»

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы эксплуатации последовательно подключенных аккумуляторов в электромобилях. Приведены измерения потребляемых токов при различных стилях вождения. Обоснованы необходимые условия балансировки тяговых свинцовых аккумуляторов. Дана статистика остаточной ёмкости аккумуляторов после эксплуатации в электромобилях. Оценена эффективность активной балансировки по результатам экспериментов.

**Ключевые слова:** эксплуатация электромобиля, балансировка аккумуляторов, дисбаланс ёмкости, пробег электромобиля, вероятность остаточной ёмкости, количество циклов заряда-разряда.

### 1. Введение

Производство электромобилей – сейчас одна из бурно развивающихся отраслей. Продажи электромобилей в мире за 2015 год возросли в 1,5 раза, а в Украине показали рекордные 400%. Первый квартал 2016 года показал прирост продаж электромобилей в 19 раз по сравнению с аналогичным периодом прошлого года.

В стоимости электромобиля аккумуляторная батарея занимает наибольшую долю. Зачастую цена батарей превышает половину стоимости всех комплектующих и работ. В то же время отдельные аккумуляторы, представляющие собой химические источники тока, могут быть быстро повреждены неправильной эксплуатацией. Известно, что длительное превышение или понижение напряжения на клеммах аккумуляторов от их предельных значений приводит к преждевременному разрушению химической структуры [5]. В электромобилях используются цепочки последовательно включённых аккумуляторов. При установке аккумуляторов на основе свинца, система управления обычно ограничивается контролем напряжения всей батареи. По этому параметру производится отключение зарядного устройства при полном заряде батареи, и отключение контроллера двигателя при её полном разряде.

Контроль только общего напряжения батареи приводит к возникновению эффекта разрушения самого слабого аккумулятора. Это поясняется следующим образом. Практически всегда в батарее находится хотя бы один из аккумуля-

торов, который вследствие заводского дефекта, или износа, или установки в отличной от других температурной зоне имеет ёмкость меньшую, чем все остальные. Во время заряда ток в последовательной цепочке одинаковый. Когда аккумулятор с меньшей ёмкостью уже полностью заряженный, остальные аккумуляторы ещё способны запасать энергию. Напряжение на батарее не достигло максимума, зарядное устройство не отключается. Аккумуляторы продолжают заряжаться, а аккумулятор с меньшей ёмкостью больше к этому моменту уже не способен запасать энергию и начинает разрушаться. Во время цикла разряда аккумулятор с меньшей ёмкостью так же разрушается по причине слишком сильного снижения напряжения. Когда напряжение на остальных аккумуляторах близко к полному разряду, аккумулятор с меньшей ёмкостью уже полностью разряжен. При эксплуатации аккумуляторов на основе свинца процесс разрушения вначале почти незаметен, но потом развивается лавинообразно. В критический момент катастрофический износ с 10% до 30% потери ёмкости развивается не медленнее чем за 40–50 циклов заряда/разряда. То есть пробег электромобиля на одном заряде может заметно ухудшиться в течение буквально двух месяцев эксплуатации.

Для нивелирования этого эффекта применяется BMS (система управления батареями) с пассивной балансировкой. Устройства этого класса контролируют напряжение на каждом аккумуляторе и отключают зарядное устройство или контроллер электродвигателя по выходу напряжения хотя бы на одном из аккумуляторов за рекомендуемые параметры. Выравнивание заряда между аккумуляторами (балансировка) производится путём замыкания резистором аккумулятора с вы-

© Медведев В. В., Мищенко В. И.,  
Абдураимов А. Э., 2017

соким напругою по порівнянню з іншими. Така балансування обмежена можливостями по розсіюванню тепла, т. к. розсіювана потужність для електромобіля на 8 акумуляторах може перевищувати 300 Вт. А головне, BMS не має можливості підтримувати акумулятори со злишком низьким напругою відносно інших.

В відміння від пасивної балансування активна заряджає акумулятори, які відстають по напругою від середнього напруги інших акумуляторів [1–2]. КПД такої системи теоретично може становити 100% [3], так як вся отримувана від інших акумуляторів енергія тратиться на зарядку відстаючого. Реальний КПД електричної частини таких систем, по різних літературних джерелам, знаходиться в межах 80–93%.

## 2. Основна частина

Рівень необхідного струму балансування визначається двома факторами: переважними розрядними і зарядними струмами і дисбалансом ємкостей акумуляторів. Оцінимо ці показники.

Для досліджень був вибран електромобіль з 8 акумуляторами по 150 А·ч кожен з номінальним напругою по 12 В. Конструкція акумуляторів дозволяє заряджати їх до 14,5 В (з витримкою часу і відключенням від зарядного пристрою) і розряджати до рівня 10,5 В під навантаженням.

Зарядні струми вибираються виходячи з ¼-суточного часу зарядки. В вибраній системі струм заряду становить 24 А в початку і падає до 10–15 А на заключительному етапі режиму постійного напруги (CV). Во время рекуперації (динамічного гальмування) струм зарядки не перевищує 20 А і триває не більше 1–2 сек.

Відомо, що витрата палива (в числі і електричності в електромобілях) сильно залежить від стилю вождіння, швидкості руху і маси транспортного засобу. Для визначення діапазону розрядних струмів були зроблені записи струму батареї електромобіля при різних стилях вождіння. Фактична маса електромобіля становила 1150 кг. Результати вимірювань струму приведені на рис. 1.

З гістограм видно, що середній струм споживання електромобіля в різних режимах коливається в межах 75–100 А. Для розрахування струмів балансування важливі не так ці показники, як показання максимального переважаючого струму. Переважаюче значення знаходиться на правих схилах гістограм струмів. Для економного режиму максимальний переважаючий

струм становить 100–110 А, для руху по маршруті 105–120 А, а для режиму такси 200 А. Основуючись на середніх і переважаючих струмах, оцінюємо струм споживання електромобілем в 110 А.

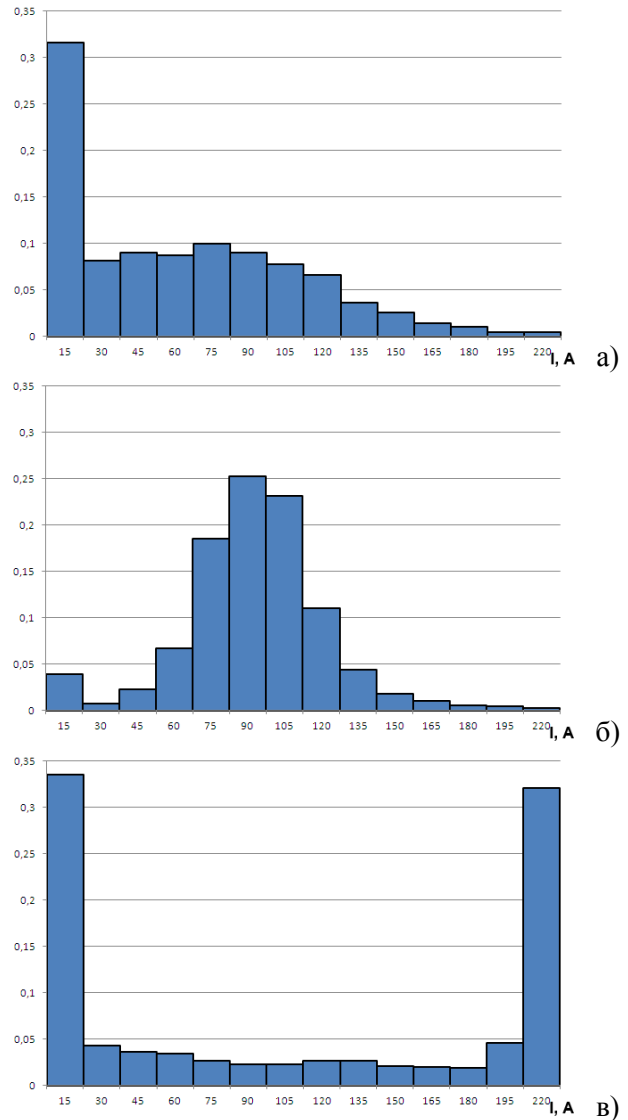


Рис. 1. Вероятности потребления токов при разных стилях вождения электромобіля.  $U_{\text{бат.ар.}}=90\text{--}110$  В. а) движение по населённомому пункту в экономном режиме; б) равномерное движение вне населённого пункта; в) движение по населённомому пункту в режиме «такси»

Для определения дисбаланса ёмкости были проведены измерения отработавших в электромобілях акумуляторів. Съём акумуляторів производился при уровне пробега на одном заряде 60% от пробега с новыми акумуляторами. Результаты измерений приведены на рис. 2.

Из рисунка 2 видно, что остаточные ёмкости распределяются в две группы со средними точками 55 и 140 А·ч. Очевидно, что ёмкость большинства акумуляторів лежит в пределах 120–150 А·ч. Априорно предполагаем, что система

активной балансировки не будет допускать эффекта катастрофического износа самого слабого аккумулятора. Исходя из этого аккумуляторы со значительно меньшей ёмкостью по сравнению с другими аккумуляторами батареи учитывать не будем.

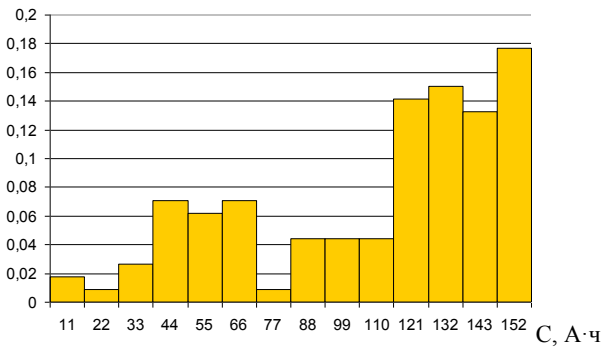


Рис. 2. Вероятности остаточной ёмкости аккумуляторов электромобиля.  $C_{\text{номинал}}=150 \text{ А}\cdot\text{ч}$

Указанную ёмкость в 120–150 А·ч электромобиль расходует примерно за 2 часа непрерывной поездки. В итоге система балансировки должна справляться с дисбалансом 30 А·ч за 2 часа при токах 110 А. Таким образом, для полной компенсации дисбаланса аккумуляторов требуемые токи балансировки должны быть до 15 А.

Обеспечить такие токи при разнице напряжений 0,1–0,2 В технически сложная задача. Проблема заключается в том, что количество балансиров должно быть  $n-1$ , где  $n$  – количество аккумуляторов. При таком количестве на конкурентную способность достаточно сильно влияет цена единичного балансиров. Основываясь на возможностях современной схемотехники полумостовых синхронных стабилизаторов эксперименты проводились на величинах токов до 8 А. Для обеспечения столь значительных токов балансировки были разработаны балансиров ER122 [4]. Балансир отводит ток от батареи с повышенным напряжением и отдает его батарее с пониженным напряжением. Постепенно заряд на обеих соседних батареях уравнивается.

Конструкция балансиров обеспечивает ток до 4 А. Для увеличения тока балансировки аккумуляторы были рассортированы по ёмкости таким образом, чтобы менее ёмкие аккумуляторы оказывались среди более ёмких и наоборот. Это позволяло смежным балансиром согласованно работать на зарядку или разрядку конкретного аккумулятора. Таким образом, токи балансировки удваивались и могли достигать 8 А. В эксперименте были взяты аккумуляторы из всего диапазона предполагаемых ёмкостей. Ёмкости аккумуляторов распределились в порядке 139, 132, 147, 110, 147, 132, 134 и 140 А·ч.

Во время экспериментов были выполнены тестовые заезды по одному и тому же маршруту протяжённостью 24 км каждый с зарядкой электромобиля после каждого заезда. В одной части заездов аккумуляторы работали в параллельной цепи без дополнительных элементов, в другой применялись активные балансиров. Для контроля напряжения аккумуляторов проводилась запись на 8-канальный логометр, показанный на рис. 3 внизу. Балансиров обеспечивали перетекание токов между соседними аккумуляторами при возникновении разности напряжений.

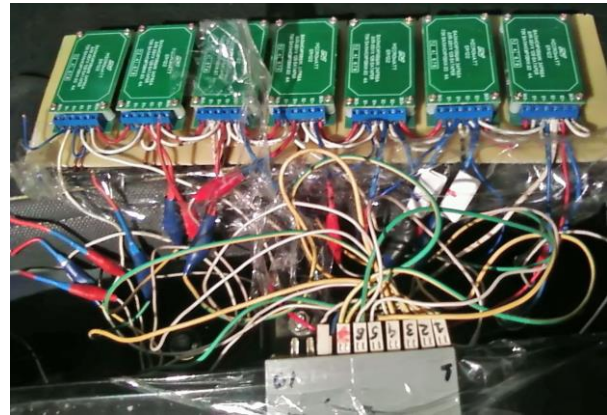


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Максимальное напряжение дисбаланса без балансировки составляло 2,65 В. При включении балансиров оно уменьшилось до 1,8 В. Повысилось минимальное напряжение при пиковых нагрузках. Итоговый пробег электромобиля при включении балансиров увеличился на 33%. На рис. 4 представлены графики дисбаланса напряжения аккумуляторов в пересчёте от среднего математического напряжения всей батареи. Если бы батарея было идеально сбалансирована, то все восемь линий графика слились бы в прямую по оси абсцисс. То есть напряжение на каждом аккумуляторе равнялось бы среднему напряжению по всей батарее.

Из графиков видно, что максимальный дисбаланс батареи появляется в конце зарядки при выходе на режим постоянного напряжения (CV). После автоматического выключения зарядного устройства напряжения тяговых свинцовых аккумуляторов в течение нескольких минут падает и выравнивается между собой, что видно по резкому уменьшению дисбаланса. Также из графика видно, что включение балансировки дало возможность электромобилю преодолеть дистанцию быстрее на 9% и большее время пути не давало выйти дисбалансу за пределы 0,3 В.

Для наглядной оценки изменения дисбаланса батареи в зависимости от напряжения на аккумуляторах рассмотрим график на рис. 5. В нём выделены цветом режимы разрядки и зарядки

електромобіля. Видно, що в межах напруги 12,1–14 В додаткова балансування тягових свинцевих акумуляторів не потребується.

Так же добре видно помилку роботи зарядного пристрою, допускаючого напругу на акумуляторах більше 15,4 В.

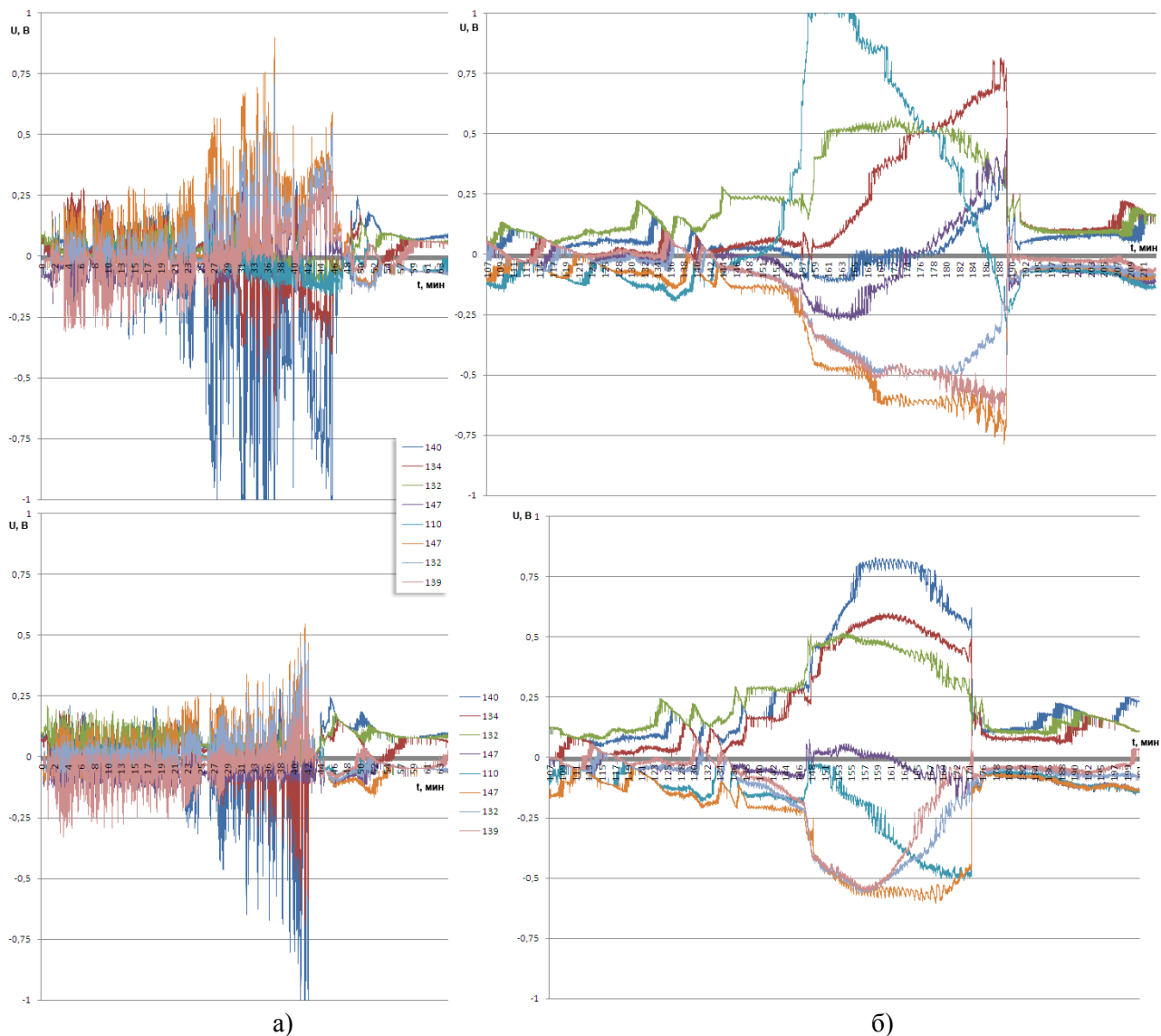


Рис. 4. Графики дисбаланса акумуляторів во время движения и зарядки. Числа в цветах линий графиков соответствуют ёмкости акумуляторів А·ч. Верхние графики без балансування, нижние – с балансуванням. а) движение электромобіля; б) окончание зарядки в режиме CV

Пиковий дисбаланс происходит во время разрядки акумуляторів, однако во время зарядки в режиме CV он более протяжённый во времени. Включение балансування токами до 8 А позволило снизить дисбаланс, значительно уменьшить время нахождения батареи в разбалансованном состоянии. Также минимальное кратковременное напряжение, возникающее на акумуляторах под нагрузкой, возросло с 9,6 В до 10,25 В что позволяет эксплуатировать их практически в соответствии с техническими требованиями на химические источники тока технологии AGM [5].

### 3. Выводы

Акумуляторы на основе свинца требуют дополнительных балансовочных устройств. Для условий эксперимента требуемые теоретические токи должны быть до 15 А. Эксперимент доказал, что балансовочные токи до 8 А недостаточны для полного устранения дисбаланса реальной батареи, но они позволяют значительно улучшить и характеристики электромобіля и условия эксплуатации акумуляторів.

Для увеличения эффективности балансовочных устройств на основе перекачивания энергии между соседними акумуляторами требуется сортировка акумуляторів по ёмкости и их установка в специальном порядке.

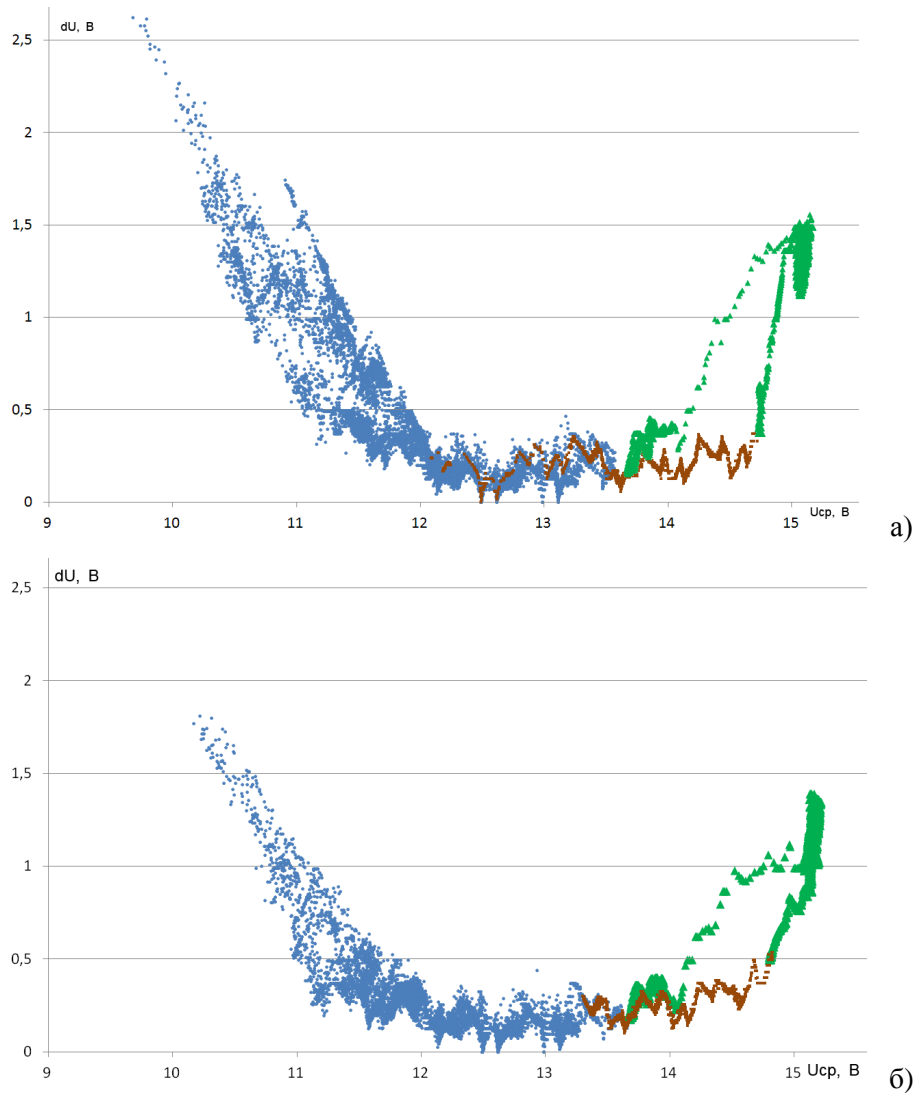


Рис. 5. Максимальное напряжение дисбаланса в зависимости от среднего напряжения аккумуляторов. а) без балансировки; б) с балансировкой. Круги – движение электромобиля; квадраты – зарядка в режиме СС; треугольники – зарядка в режиме CV и отключение зарядки

Эксперименты показали, что использование активных балансировочных устройств относительно небольшой мощности заметно улучшает тяговые характеристики автомобиля и смягчает режимы эксплуатации аккумуляторов. Дальнейшее улучшение может быть достигнуто после разработки более мощных балансировочных устройств с уравнивающими токами в 15–20А. Но для решения этой задачи необходимо находить компромисс между ценой и производительностью балансировки.

#### Список использованной литературы

1. Варламов, Д. О. Исследование устройств выравнивания напряжений для аккумуляторных батарей электромобилей нового поколения // Энергоэффективные технологии в транспортных системах будущего. Сборник тезисов и статей международной молодежной конференции МГТУ «МАМИ» [текст] – М.: МГТУ «МАМИ», 2011. – С. 48–52.
2. Носов, Н. Особенности зарядки последовательных аккумуляторов [Электронный ресурс] / Николай Носов // Мобиповер. – 2010. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=293>.
3. Смотров, Е. А. Системы балансировки аккумуляторных батарей [Электронный ресурс] / Е. А. Смотров, Д. И. Акшинцев, В. В. Субботин, А. Ю. Сусленко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – Вып. 11. – С. 38–48. – Режим доступа до ресурсу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2013\\_11\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2013_11_7).
4. Мищенко, В. И. Балансировщик заряда ER122 [Электронный ресурс] // MicroWatt. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://microwatt.com.ua/catalog/balancer/ER122>.
5. Варыпаев, Н. В. Химические источники тока [текст] / Н. В. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский. – М.: Высш. шк., 1990. – 240 с.

6. Mohamed, D. A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink [text] / D.Mohamed, O.Noshin, B.Peter, M.Joeri // International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.). – 2011. September, – pp.70–85.

7. Sihua, W. Cell balancing buys extra run time and battery life [text] / Sihua Wen // Power Management, Analog Applications Journal, Texas Instruments Incorporated. – 2009. Vol. 1Q – pp. 14–18.

8. Хрусталеv, Д. А. Аккумуляторы [текст] / Д. А. Хрусталеv. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.

9. Battery monitoring/management systems (BMS) [Електронний ресурс] // EV-propulsion. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ev-propulsion.com/bms.html>.

### References

1. Varlamov, D. O. (2011). The study stresses the alignment devices Batteries-cillator battery of a new generation of electric cars [Issledovanie ustroystv vyiravnivaniya napryazheniy dlya akkumulyatornyih batarey elektromobiley novogo pokoleniya], “Energy-efficient technologies in the transport system of the future” Abstracts and papers of the international youth conference MSTU “MAMI”, Moscow, MSTU “MAMI”, pp. 48 – 52. (in Russian).

2. Nosov, N. (2010). Features consecutive charging batteries [Osobennosti zaryadki posledovatelnyih akkumulyatorov], Mobipover, (in Russian) Available at: <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=293>.

3. Look, E. A., Akshintsev, D. I., Subbotin, V. V., Suslenko, A. Yu. (2013). The EA batteries balancing systems [Sistemyi balansirovki akkumulyatornyih batarey], “Electrotechnical and computer systems”, Vol. 11, pp. 38–48. (in Russian) Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2013\\_11\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2013_11_7).

4. Mishenko, V. I. (2015). Balancer charge ER122 [Balansirovshchik zaryada ER122], Microwatt, URL: <http://microwatt.com.ua/catalog/balancer/ER122>. (in Russian).

5. Varypaev, N. V., Dasoyan, M. A., Nikolsky, V. A. (1990). Chemical current sources [Himicheskie istochniki toka], Moskva, Higher. Wk, p. 240. (in Russian).

6. Mohamed Daowd, Noshin Omar, Peter Van Den Bossche, Joeri Van Mierlo (2011). A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink, “International Review of Electrical Engineering” (I.R.E.E.), September, pp.70–85.

7. Sihua, W. (2009). Cell balancing buys extra run time and battery life, “Power Management, Analog Applications Journal”, Texas Instruments Incorporated, Vol. 1Q pp.14 – 18.

8. Hrustalev, D. A. (2003). Batteries [Akkumulyatoryi], Moscow, Emerald, 224 p. (in Russian).

9. Battery monitoring/management systems (BMS), (2010). “EV-propulsion”, Available at: <http://www.ev-propulsion.com/bms.html>.

10. The Battery Industry in 2015, (2013). “Japan, Nikkei BP Clean Tech Institute”, 270 p.

## ACTIVE BALANCING OF VALVE-REGULATED LEAD-ACID BATTERIES IN ELECTRIC VEHICLES

V. V. Medvedev<sup>1</sup>, V. I. Mishchenko<sup>2</sup>, A. E. Abduraimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”

<sup>2</sup>Company “Microwatt”

<sup>3</sup>Limited liability company “BIO Automotive”

**Abstract.** The article deals with questions of operation connected in batteries in electric vehicles. Prolonged excess or under-voltage on the battery terminals to their limits leads to premature destruction of the chemical structure. Control only total battery voltage leads to destruction of the effect of a weak battery. When using batteries based on lead the process of destruction is almost imperceptible at first, but then develops an avalanche. The authors suggest the use of an active balancing battery. The level of the required balancing current is determined by two factors: advantageous discharge and recharge currents and capacitance unbalance batteries. To assess the necessary balancing currents at different driving styles were measured. Significant differences of currents consumption probabilities when traffic on the settlements in economy mode; at uniform movement out of the municipality; when driving on the settlements in the “taxi” mode. Dana stats residual capacity of the battery after use in electric vehicles. balancing scheme was proposed, in which the flow of power is only between adjacent batteries. A feature of the balancing system is that if a battery with a minimum and maximum capacitances are not adjacent to each other, the pumping energy accumulators produced by the chain between them. We investigated changes in battery voltage without balancing

and active balancing. Maximum battery imbalance appears at the end of charging when entering the constant voltage mode. It was revealed that the balancing of lead-acid batteries in electric car is only necessary in the ranges below and above 11,8V 14,5V. Maximum voltage unbalance with the active balancing is turned on decreases in 1,5 times. It raises the minimum voltage at peak loads. Total mileage electric car when the rocker has increased significantly.

**Key words:** batteries, electric vehicle, battery balancing, capacity imbalance, mileage of electric vehicle, likelihood of residual capacity.

## АКТИВНЕ БАЛАНСУВАННЯ ТЯГОВИХ СВИНЦЕВИХ АКУМУЛЯТОРІВ В ЕЛЕКТРОМОБІЛЯХ

**В. В. Медведєв<sup>1</sup>, В. І. Міщенко<sup>2</sup>, А. Е. Абдураїмов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup>Компанія «Microwatt»

<sup>3</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю «БІО Автомотив»

**Анотація.** У статті розглянуті питання експлуатації послідовно підключених акумуляторів в електромобілях. Наведено виміри споживаних струмів при різних стилях водіння. Обґрунтовано необхідні умови балансування тягових свинцевих акумуляторів. Дано статистику залишкової ємності акумуляторів після експлуатації в електромобілях. Оцінено ефективність активного балансування за результатами експериментів.

**Ключові слова:** акумулятори, електромобіль, балансування акумуляторів, дисбаланс ємності, пробіг електромобіля, імовірність залишкової ємності.

Получено 08.07.16



**Медведєв Вадим Вячеславович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Перемоги, 37, г. Киев, Украина, E-mail: vadim.medvedev@ua.fm, тел. +38-044-406-81-06

**Vadim Medvedev**, Ph. D., assistant professor of mechanical engineering, National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-0439-6909



**Мищенко Владимир Иванович**, инженер компании «Microwatt». Ул. Полякова, г. Запорожье, Украина, E-mail: microwatt.design@gmail.com, тел. +38-0612-68-71-47

**Vladimir Mishchenko**, engineer "Microwatt", Str. Polyakova, Zaporozhye, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-7303-1639



**Абдураїмов Арсеній Энверович**, директор общества с ограниченной ответственностью «БІО Автомотив». Пер. Яблочкова, 2, Киев, Украина, E-mail: info@bioauto.com.ua, тел. +38-044-463-95-46

**Arsenij Abduraimov**, director of the limited liability company "BIO Automotive", trans. Yablochkov, 2, Kiev, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-7933-1739