

УДК 62-83

Е. А. Смотров, канд. техн. наук,

Д. В. Вершинин, А. Ю. Сусленко, В.В.Субботин

### ФОРМИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ БОРТОВОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

*Предпринята попытка определить оптимальный режим работы аккумуляторной батареи с точки зрения жизненного цикла, обозначить ограничения, накладываемые на аккумуляторную батарею при заряде/разряде. Приведены также экспериментальные данные работы динамического источника тока, который обеспечивает требуемый режим работы батареи, чем увеличивает её жизненный цикл.*

**Ключевые слова:** электротранспорт, электропривод, рекуператор, суперконденсатор, аккумуляторная батарея

E. A. Smotrov, PhD.,

D. V. Vershinin, A. Y. Suslenko, V. V. Subbotin

### FORMATION OF AN OPERATING MODE OF THE ONBOARD POWER SUPPLY OF ELECTRIC VEHICLE

*In this article an attempt to define the optimum operating mode of the accumulator battery, which provides the longest life cycle has made, the limitation which occurs during the charge/discharge modes are shown. The experimental data of dynamic current source that provides demanded conditions for the battery, and in this way increases its life cycle are showed.*

**Keywords:** electric vehicle, electric drive, recuperator, ultracapacitor, battery

Є. А. Смотров, канд. техн. наук,

Д. В. Вершинін, А. Ю. Сусленко, В. В. Суботін

### ФОРМУВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БОРТОВОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

*Прийнято спробу визначити оптимальний режим роботи акумуляторної батареї з точки зору життєвого циклу, вказати на обмеження, що накладають на акумуляторні батареї режими заряду/розряду. Наведено також експериментальні дані роботи динамічного джерела струму, що забезпечує потрібний режим роботи акумуляторної батареї, чим збільшує її життєвий цикл.*

**Ключові слова:** електротранспорт, електропривод, рекуператор, суперконденсатор, акумуляторна батарея

#### Введение

Состояние и режим работы бортового источника питания (БИП) – аккумуляторной батареи (АБ) во многом определяют основные энергетические характеристики электротранспортного средства (ЭТС, ТС). В ТС применяются АБ различного вида и исполнения, в зависимости от предназначения. Свинцово-кислотные АБ, вследствие малой удельной энергоемкости, характеризуются большим объемом и массой при относительной дешевизне. По этой причине они широко используются в технологических ТС, в которых большая масса АБ используется в качестве балласта/противовеса (погрузчики, штабелеры и др.). В пассажирских ТС – электровелосипеды, электроскутеры, электромобили – чаще применяются АБ на базе литиевых элементов благодаря высокой удельной

энергоемкости и, соответственно, меньших объемах и массе при большей стоимости.

Несмотря на различную основу, упомянутые АБ имеют ряд общих свойств и общие закономерности изменения параметров АБ от внешних воздействий, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации ЭТС. Для анализа характеристик выберем свинцово-кислотные АБ, так как на сегодняшний день этот тип изучен лучше других и по этому типу АБ имеется большее количество статистических данных.

**Цель анализа** – определить режимы работы АБ, которые обеспечат максимальную длительность жизненного цикла и максимальную разрядную емкость.

**Материалы исследований.** Проанализируем величину отдаваемой емкости от величины разрядного тока на примере разрядных кривых аккумуляторов семейства «dryfit»A500. Семейство разрядных кривых

© Смотров Е.А., Вершинин Д.В.,

Сусленко А.Ю., Субботин В.В., 2013

для аккумулятора А512/6,5 представлено в справочных данных для данного типа АБ. Примерный вид разрядных кривых свинцовых АБ, характеризующий картину качественно, представлен на рис. 1.

Ограничим разрядное напряжение на уровне 10,5 В и определим величину разрядной емкости для каждой величины разрядного тока. Полученная зависимость представлена на рис.2.

Под разрядной емкостью  $C_p$  будем понимать величину емкости, отданной АБ в режиме разряда постоянным током в течение определенного времени.

Номинальной емкостью  $C_{20}$  называется емкость, полученная при 20-ти часовом разряде до минимального напряжения. Соответственно номинальным током  $I_{20}$  называется постоянный по величине ток, обеспечивающий полный разряд АБ за 20 ч.

В таблицу сведены разрядные токи АБ, соответствующие им длительности разряда, разрядные емкости. Токи пронормированы по отношению к значению номинальной емкости  $I / C_{20}$  и номинального тока  $I / I_{20}$ .

Важно обратить внимание на негативные свойства интенсивного разряда:

– при увеличении силы тока усиливается эффект пассивации электродной поверхности. В начале реакции разряда анод покрывается сульфатным слоем, обладающим большой пористостью. Пористость этого слоя при дальнейшем разряде падает, снижается максимально возможная плотность тока обмена равновесия на отрицательном электроде от  $0,8 \text{ A/cm}^2$  до  $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , что делает фактически невозможным дальнейшую ионизацию свинца, ограничивая разрядную емкость;

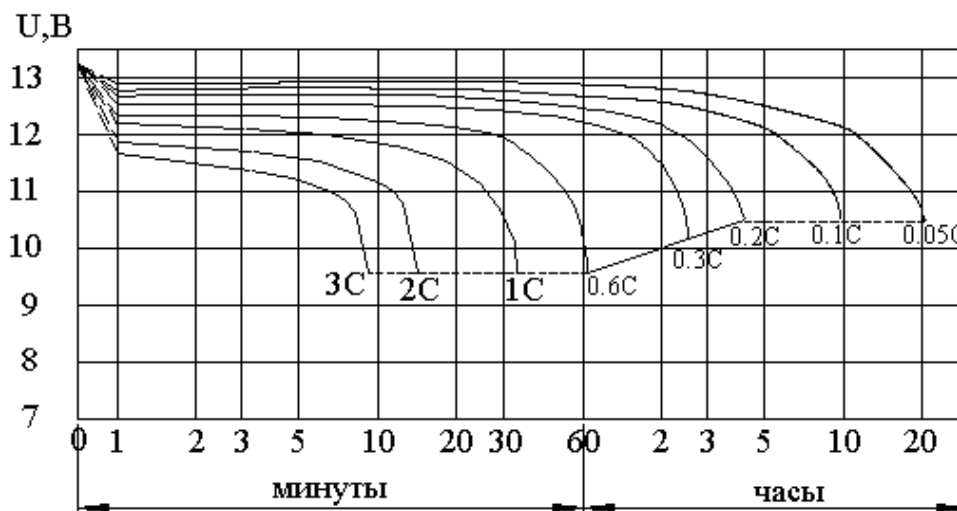


Рис. 1. Разрядные кривые свинцово-кислотных аккумуляторов

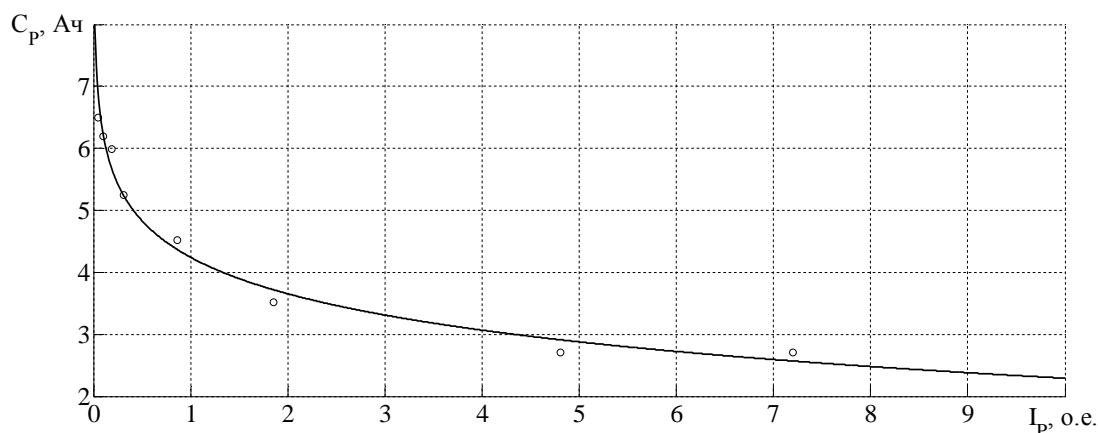


Рис. 2. Зависимость разрядной емкости от разрядного тока

## Анализ разрядных кривых dryfit A512/6,5

Приблизительное время разряда $t_p$ , ч	20	10	5,4	3,22	1,16	0,542	0,208	0,139
Разрядная емкость, $C_p$ , Ач	6,5	6,2	5,99	5,25	4,52	3,523	2,704	2,71
Разрядный ток, $I_p / C_{20}$ , о.е.	0,05	0,10	0,19	0,31	0,86	1,85	4,81	7,2
Разрядный ток, $I_p / I_{20}$ , о.е.	1	1,908	3,415	5,015	12	20	40	60
Глубина разряда, %	100	95	92	80,8	69,5	54,2	41,6	41,7

– при интенсивном разряде повышается концентрационная поляризация, что приводит к смещению электрохимических реакций из зоны фронтальной поверхности.

– увеличиваются омические потери напряжения, а, значит, и потери мощности в АБ.

Еще один важный параметр – срок службы аккумулятора (или технический ресурс, если выражать в циклах заряда-перезаряда).

Основной причиной сокращения срока службы АБ являются необратимые процессы, приводящие к искажению структуры активных масс, сокращению рабочей поверхности электродов. Эти процессы наблюдаются главным образом при циклической работе. В результате таких процессов, по истечении определенного срока, становится невозможным зарядить аккумулятор до требуемой емкости.

Вторая причина – разрушения электродов, коррозионное и эрозионное, которое возникает под действием тепловых и механических нагрузок.

Глубокий разряд АБ при такой работе может привести к резкому ухудшению его характеристик и существенно сократить срок службы (рис. 3.). Это связано с разбросом параметров единичных элементов, которые входят в состав аккумулятора. При циклической работе различия усугубляются, что приводит к систематическому неполному заряду одних элементов и последующему их отказу в процессе разряда.

Можно сделать вывод из рис. 3, что емкость АБ в процессе службы имеет два выраженных участка. Участок приработки АБ, сопровождающийся незначительным (обычно до 10 – 20 %) увеличением разрядной емкости АБ, и участок старения АБ, который характеризуется постепенным уменьшением разрядной емкости АБ, вплоть до допусти-

мого минимума. Допустимым минимумом считается такой износ АБ, при котором её разрядная емкость уменьшилась до 60 %.

На основании рис. 3 определено предельное число циклов для каждой глубины разряда. Оно составляет порядка 177. 452 и 1374 для глубины разряда 100, 50 и 30 % соответственно. Некоторые производители АБ, в частности АБ «dryfit», утверждают, что ресурс батареи линейно связан с глубиной разряда, а нелинейность имеет место только при глубине разряда 100%.

На рис. 4 приведено графическое сопоставление полученных данных (кривая 2) с данными из другого источника [3] (кривая 1). Будем ориентироваться на график 1 на рис.4 ввиду большего числа опорных точек.

На основании рис. 4 определена суммарная емкость, отданная АБ за время «жизни».

Зависимость суммарной емкости АБ  $C_{\Sigma}$  от глубины разряда, которая получена при разряде до фиксированного напряжения, изображена на рис. 5.

Из анализа рис. 5 видно, что большее использование емкости может быть достигнуто путем уменьшения глубины разряда АБ. Но меньшие величины глубины разряда (до 30 %) могут быть получены как при токах меньших номинального, так и больших его. Целесообразно выбирать такую емкость АБ, которая сможет обеспечить при требуемых токах и требуемой длительности работы наименьшую глубину разряда. В транспортных средствах, в которых желательно уменьшить массогабаритные показатели АБ, и улучшить энергетические характеристики, целесообразно особым образом формировать режим АБ. Причем важно не только уменьшить потребляемый ток, как и ограничить ток рекуперации.

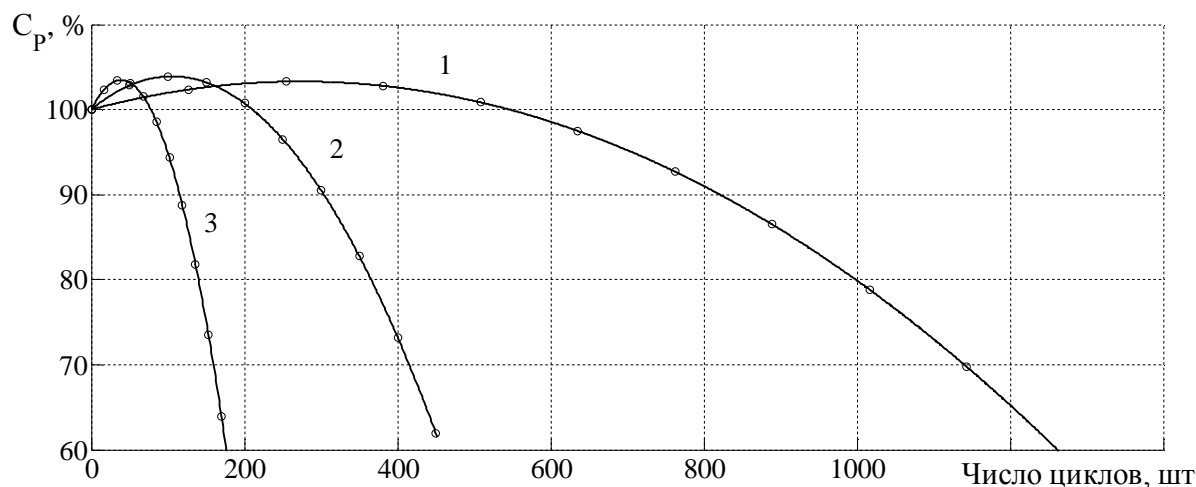


Рис. 3. Изменение разрядной емкости АБ при циклической работе с различной глубиной разряда: 1 – 30 %; 2 – 50 %; 3 – 100 %

Число циклов, шт

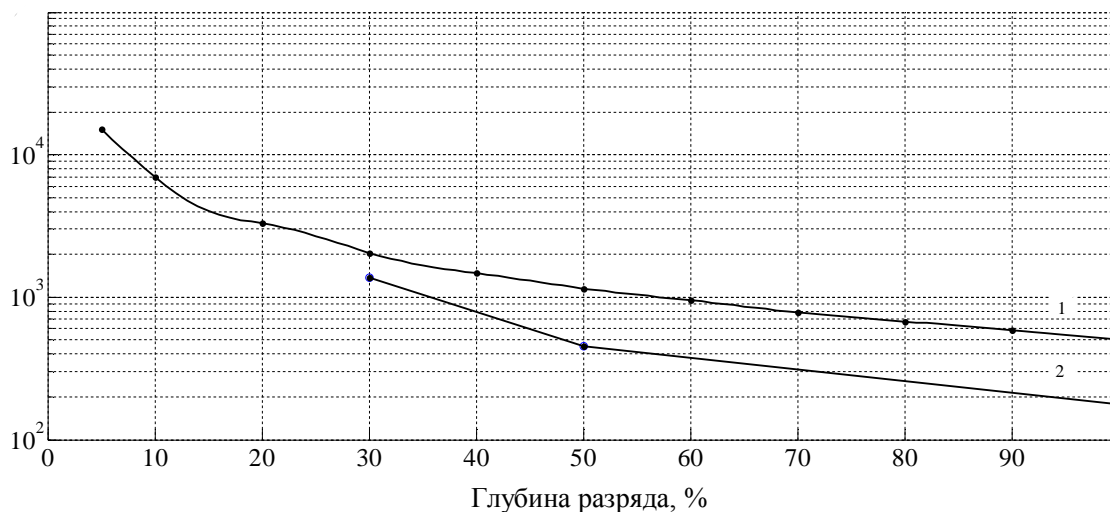


Рис. 4. Зависимость числа циклов от глубины разряда

Так как режим движения ТС определяется водителем, то недопустимо ограничивать динамику транспортного средства, а следовательно, и ток, чтобы продлить срок «жизни» АБ. Но даже при малых допустимых замедлениях ТС, когда токи не превышают желаемых значений, для литиевых АБ, установленных на борту ТС, существуют дополнительные ограничения.

Так, тестовые испытания [5] показали, что длительность цикла жизни литиевых АБ, в основном, определяется условиями заряда и мало зависит от режима разряда (в отличие от свинцово-кислотных АБ, у которых этот параметр очень зависит от глубины разряда).

Заряд литиевых АБ при высоком напряжении ячейки, большем 3,9 В, ускоряет деградацию ячейки, которая усиливается при увеличении указанного напряжения. Очевидно поэтому, говоря об ускоренном заряде литиевых АБ за 20-30 мин, производители ограничивают уровень заряда 80% емкости. При этом время полного заряда от сети составляет 6 – 8 ч, что соответствует току заряда  $(0,12 - 0,16)C_{20}$ . При меньшем напряжении ячейки при токе зарядки до  $0,5C_{20}$  скорость деградации незначительна. Но она существенно возрастает при токе  $1C_{20}$ .

Немаловажно и влияние температуры. Максимально допустимый ток заряда при

0°C составляет менее  $0,1C_{20}$ , так как зарядка при низкой температуре приводит к выделению металлического лития на отрицательном электроде [4]. При низкой температуре необходимо ограничивать так же и разрядный ток – при температуре ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  для литиевой батареи обычно необходимо ограничить ток на уровне  $C_{20}/5$  или ниже [1]. Внутреннее сопротивление литиевой АБ возрастает при низкой температуре и является наибольшим при граничных значениях степени заряда (100 – 80 и 20 – 0 % SOC). Оно будет тем больше, чем больше зарядный/разрядный ток и возрастает при увеличении срока эксплуатации АБ [2].

В литературе неоднократно отмечалась целесообразность применения гибридного БИП: суперконденсаторов (СК) в комбинации с АБ. Возможны различные схемные сочетания СК и АБ, и ввиду указанных выше особенностей применения АБ, по мнению авторов, наиболее рациональным является создание динамического источника тока на базе СК, связанного с АБ через реверсивный DC-DC преобразователь (рекуператор) [8]. Указанное устройство (рис.6) должно обеспечить реализацию следующих основных функций:

- принять необходимый ток рекуперации при торможении (подтормаживании) ЭТС;
- отдать необходимый ток в требуемый момент времени при разгоне для уменьшения динамических токов АБ;

– обеспечить реализацию вышеуказанных функций при промежуточных значениях скорости ТС.

Анализ реальной эффективности процесса рекуперации ЭТС в стандартизованном режиме движения (городском цикле) [6] показал, что предельный максимум рекуперированной энергии составляет 30-40 % от запасенной кинетической энергии ТС. С учетом целесообразности разгона (обеспечения динамической составляющей тока АБ) за счет энергии СК очевидно, что необходимо дозарядить СК от АБ до требуемого уровня. Поэтому разделять энергию рекуперации на два потока – часть в АБ на уровне тока заряда, рекомендованного производителем АБ [8], часть в СК, чтобы затем дополнительно заряжать СК до требуемого уровня, неэффективно. Кроме того, требует дополнительного исследования эффективность работы АБ при частом чередовании режимов заряда и разряда, свойственному движению ЭТС в городском цикле, с учетом переходных процессов в АБ по окончании процессов заряда и разряда.

Таким образом, с учетом описанных выше ограничений величины зарядного тока АБ по температуре и уровню напряжения ячейки представляется предпочтительным всю энергию торможения отдавать только в СК, избавив АБ от практически любых зарядных токов в процессе движения ТС.

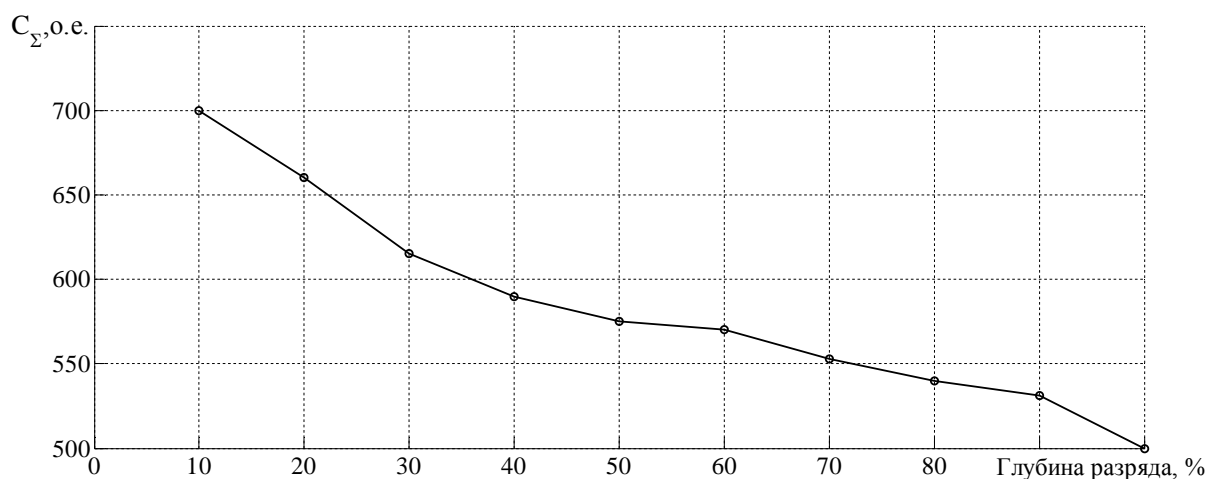


Рис. 5. Зависимость суммарной энергии  $C_{\Sigma}$  от глубины разряда при разряде до фиксированного напряжения

На рис. 7 представлена диаграмма, полученная при натурных испытаниях ТС [7] с гибридным БИП, реализующим предложенный алгоритм работы. На ней приведен фрагмент движения ТС в стартстопном режиме: транспортное средство разгоняется с максимальным ускорением до скорости в 35 км/ч, после чего начинается замедление с тем же ускорением при помощи рекуперативного торможения.

В начале фрагмента рекуператор приве-

ден в исходное состояние: СК заряжены до максимального напряжения.

В начале разгона, пока ток разряда АБ (потребления приводов) не превышает заданного значения (40 А), рекуператор не участвует в процессе разгона. Как только ток разряда АБ достигает заданного уровня (1,75 с на рис. 7) включается рекуператор и обеспечивает постоянный ток разряда АБ, полностью обеспечивая потребление приводов для достижения необходимой динамики..

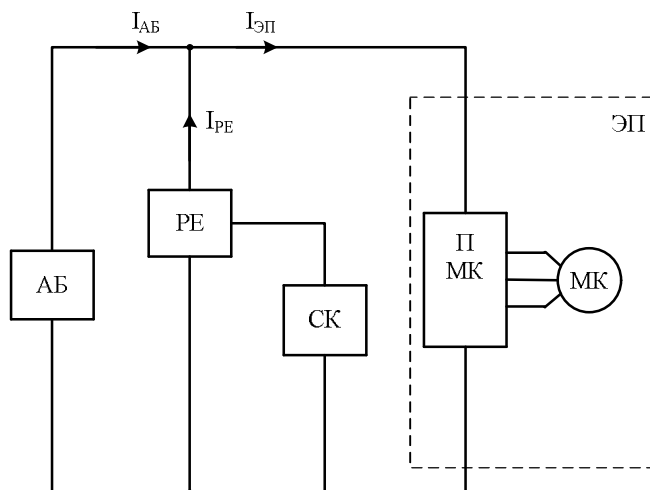


Рис. 6. Структура энергетической системы ТС: АБ – аккумуляторная батарея, СК – суперконденсатор, ПМК – преобразователь мотор-колеса, МК – мотор-колесо, ЭП – электропривод, РЕ – рекуператор

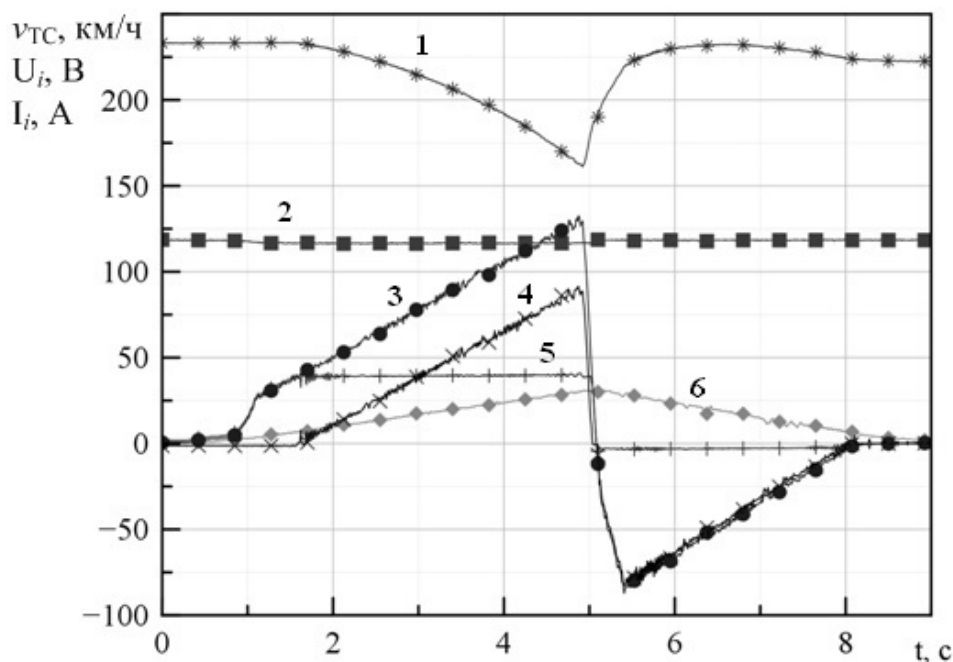


Рис. 7. Диаграмма параметров ТС с интегрированным гибридным БИП: 1 – напряжение СК, В; 2 – напряжение АБ, В; 3 – ток приводов ТС, А; 4 – ток рекуператора, А; 5 – ток АБ, А; 6 – скорость ТС, км/ч

При этом происходит разряд СК, что очень хорошо видно на диаграмме. Аккумуляторная батарея обеспечивает только статическую составляющую тока (необходимую для движения с постоянной скоростью)

С началом рекуперативного торможения (5 с на рис. 7) ток приводов полностью используется рекуператором для зарядки СК. Как видно из диаграммы, напряжение на СК растет, в нем запасается энергия рекуперации, в то время когда ток, а следовательно, и энергия, рекуперированная в АБ, равна нулю. По окончании процесса торможения, когда привода уже не могут создавать ток (8 с на рис.7), рекуперации не происходит. Рекуперированный ток становится равным нулю, привода переходят в режим динамического торможения до полной остановки ТС.

Результатом применения данного БИП является значительное снижение пиковой нагрузки на АБ, что, как отмечалось ранее, благотворно влияет на ресурс.

#### **Выводы**

В процессе анализа рассмотрены особенности, происходящие в свинцово-кислотных и литиевых АБ, указаны основные параметры, сокращающие жизненный цикл. Указаны пути увеличения жизненного цикла, один из которых – выбор АБ с большим запасом емкости, что обеспечит меньшую глубину разряда. Также обязательным является обеспечение температурной стабилизации и формирование требуемых для данного типа батарей условий при заряде. Предложенная структура – динамический источник тока на базе СК – позволяет не только ограничить глубину разряда АБ, разряжая её требуемым током, но и сформировать (или полностью исключить) зарядный режим АБ.

Предложенный алгоритм распределения энергии – ограничение динамических токов АБ при разгоне на допустимом уровне и при торможении на нулевом – обеспечивает меньшую глубину разряда АБ в цикле движения ТС, устраняет возможные негативные последствия заряда АБ, чем увеличивает её ресурс.

#### **Список использованной литературы**

1. Born, T. Active Combination of Ultracapacitors with Batteries for PHEV ESS / T. Born, L. Slezak // DOE Merit Review – 2009.
2. Andrea, D. Battery management systems for large Lithium-ion battery packs / D. Andrea – 2010 – 290 p.
3. Woodbank Communications, Battery Life (and Death). – Режим доступа: <http://www.mpoweruk.com/life.htm> 19.08.2005.
4. Dubarry, M. Evaluation of commercial Lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug – in hybrid electric vehicle applications / M. Dubarry and other // Journal of Power Sources 196. – 2011. – P. 10336 – 10343.
5. Choi, S. Factors that effect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO<sub>2</sub>. / S. Choi, H. Lim // Journal of Power Sources 111. – 2011 – P. 130 – 136.
6. Смотров, Е. А. Анализ эффективности процесса рекуперации. / Е. А.Смотров, О. Г.Дашко, Д. В.Вершинин, А. Ю.Сусленко, В. В.Субботин // Электротехнические и компьютерные системы – 2012 – № 8(84) – К. : Техника – С.12 – 16.
7. Смотров, Е. А. Исследование характеристик легкого электротранспортного средства с электроприводом мотор-колесо./ Е. А. Смотров, Д. В. Вершинин, А. Ю. Сусленко. Электротехнические и компьютерные системы – 2011 – №3(79) – К. : Техника – С.119 –122.
8. Смотров, Е. А. Рекуператор бортового источника питания электротранспортного средства/ Е. А. Смотров // Электротехнические и компьютерные системы – 2011– № 2(78) – К. : Техника – С. 7 – 12.
9. Шейндлин, А. Е. Комбинированная энергоустановка транспортного назначения на основе воздушно-алюминиевого электрохимического генератора/ А. Е.Шейндлин, А. З. Жук // Известия российской академии наук. Энергетика – 2011 – № – М. : Наука – С.45 – 55.

Получено 26.01.2013

## References

1. Born, T. Active Combination of Ultracapacitors with Batteries for PHEV ESS / T. Born, L. Slezak // DOE Merit Review – 2009 [in English].

2. Andrea, D. Battery management systems for large Lithium-ion battery packs / D. Andrea – 2010 – 290 p. [in English].

3. Woodbank Communications, Battery Life (and Death) – Режим доступа: <http://www.mpoweruk.com/life.htm> – 19.08.2005 [in English].

4. Dubarry, M. Evaluation of commercial Lithium-ion cells based on composite positive electrode for plug – in hybrid electric vehicle applications // M. Dubarry and other // Journal of Power Sources 196 – 2011 – P. 10336 – 10343 [in English].

5. Choi, S. Factors that effect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on  $\text{LiCoO}_2$ . / S. Choi, H. Lim // Journal of Power Sources 111. – 2011 – P. 130 – 136 [in English].

6. Smotrov, E. A. Analysis efficiency of the recuperation process. / E. A. Smotrov, O. G. Dashko, D. V. Vershinin, A. Y. Suslemko, V. V. Subbotin // Electrotechnic and computer systems – Kyiv : – 2012. – Iss. 8 (84). – P.12 – 16 [in Russian].

7. Smotrov, E. A. Determination the characteristics of the light electric vehicle with motor-wheel electric drive / E. A. Smotrov, D. V. Vershinin, A. Y. Suslemko // Electrotechnic and computer systems – Kyiv : – 2011. – Iss. 79. – P.119 – 122 [in Russian].

8. Smotrov, E. A. Recuperator of the on-board power supply of the electric vehicle/ E. A. Smotrov // Electrotechnic and computer systems – Kyiv : – 2011. – Iss. 2(78). – P.7 – 12 [in Russian].

9. Sheidlin, A. E. The combined power installation of transport appointment on the basis of air-aluminum electrochemical generator/ A. E. Sheidlin, A. 3. Zhyk // News of the Russian Academy of Sciences. Power– Moscow : – 2011. – № 5 – P. 45 – 55[in Russian].



Смотров  
Евгений Александрович,  
канд. техн. наук, веду-  
щий инж. НТЦ «Стан-  
косерт»,  
тел. 048-728-85-05



Вершинин  
Дмитрий Вениамино-  
вич,  
инженер– исследователь  
ОСКБ спец. станков,  
тел. 048-728-85-05



Сусленко  
Александр Юрьевич,  
аспирант Одесского нац.  
политехн. ун-та, каф.  
КСУ



Субботин  
Виктор Владимирович,  
студент Одесского нац.  
политехн. ун-та,  
каф. ЭМС КУ