

УДК 62-83

**В. Г. Герасимьяк**

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ**

*Аннотация.* Исследуются преимущества применения суперконденсатора как дополнительного источника электроэнергии в автономных электротранспортных средствах. Приводятся данные о влиянии на емкость аккумулятора его температуры. Проведенное моделирование показало, что использование суперконденсатора положительно влияет как на увеличение пробега, так и на продолжительность жизни аккумуляторной батареи в целом.

*Ключевые слова:* транспортное средство, электропривод, суперконденсатор, электромобиль, электродвигатель, моделирование, температура, аккумулятор, емкость аккумулятора, циклы движения, эксперименты, рекуперация

**V. G. Gerasymiak**

### **THE EFFICIENCY OF SUPERCAPACITORS USING IN AUTONOMOUS ELECTRIC TRANSPORT**

*Abstract.* Advantages of supercapacitor usage as an additional source of electric power in autonomous Electric Vehicle are investigated. Temperature influence on battery capacity data is given. The simulation has shown that the use of supercapacitor positively affects both on increase of battery life cycle and it runtime.

*Keywords:* electric drive, supercapacitor, battery, electric car, electric motor, vehicle simulation, temperature, battery capacity, cycles movement experiments, recovery

**В. Г. Герасимьяк**

### **ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ У АВТОНОМНОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ**

*Анотація.* Досліджуються переваги застосування суперконденсатора як додаткового джерела електроенергії в автономних електротранспортних засобах. Наводяться відомості про вплив на ємність акумулятора його температури. Проведене моделювання показало, що використання суперконденсатора позитивно впливає як на збільшення пробігу, так і на тривалість життя акумуляторної батареї в цілому.

*Ключові слова:* транспортний засіб, електропривод, суперконденсатор, електромобіль, електродвигун, моделювання, температура, акумулятор, ємність акумулятора, цикли руху, експерименти, рекуперация

**Введение.** К настоящему времени сложилось общее представление об электромобиле как экономичном, простом и довольно надежном средстве передвижения. Однако один из главных недостатков, препятствующих массовому распространению электромобилей, – это несовершенство источников питания.

В современных автономных электротранспортных средствах (АЭТС) в качестве источников питания применяются в основном литий-ионные или литий-полимерные аккумуляторные батареи (АКБ), которые доказали свою эффективность по сравнению с остальными аккумуляторными батареями. Из недостатков можно выделить их высокую стоимость, которая может достигать до 40 % стоимости всего АЭТС, жестко ограниченная от-

даваемая мощность и эффект «старения» аккумулятора. Средняя продолжительность жизни литий-ионных аккумуляторов составляет от 3 до 7 лет или 600–3000 циклов заряда-разряда, после чего емкость аккумулятора существенно снижается (он «старееет») [14-15].

Различия во времени использования АКБ объясняются следующими свойствами аккумуляторов.

1. Хотя в данный момент силовые аккумуляторы могут отдавать токи до 10–20 С и принимать до 5–10 С, такое увеличение токов ведет к уменьшению заряда аккумулятора (здесь и далее: С – емкость аккумулятора в ампер-часах, а токи – в амперах). Причиной этого является наличие внутреннего сопротивления аккумуляторов. На рис. 1 приведены результаты эксперимен-

© Герасимьяк В.Г. 2013

тальных исследований аккумулятора «KeepPower 3100» емкостью 3100 мАч [1].

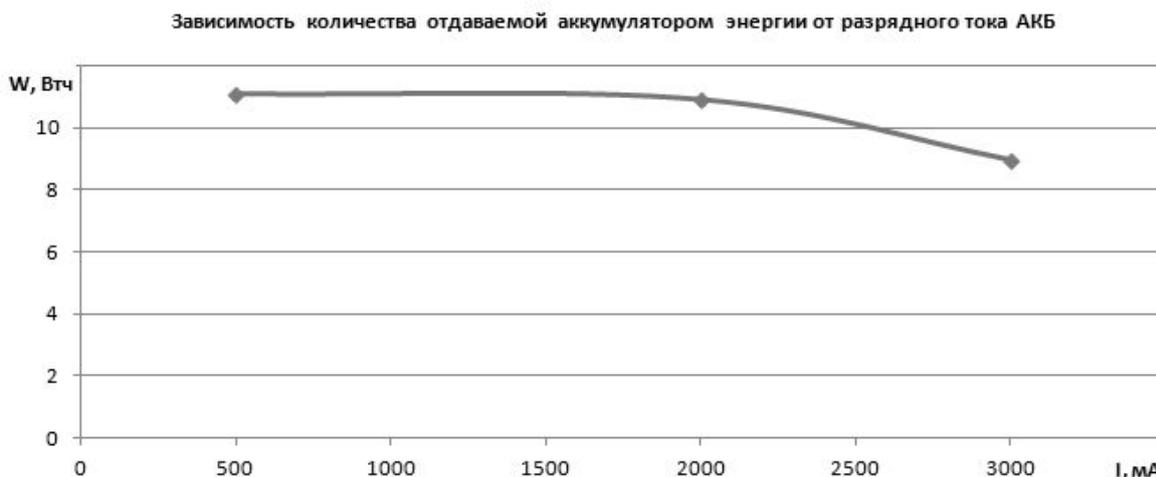


Рис. 1. Зависимость количества отдаваемой аккумулятором энергии от разрядного тока АКБ

2. Температурные ограничения в использовании аккумуляторов. Существующие литий-ионные аккумуляторы могут работать при температурах от 0 до +60°C. Но, исходя из исследований, высокая температура оказывает разрушительное воздействие на аккумулятор. В [1] приводятся данные, из которых следует, как снижается емкость аккумулятора во время хранения при разных температурах (табл. 1).

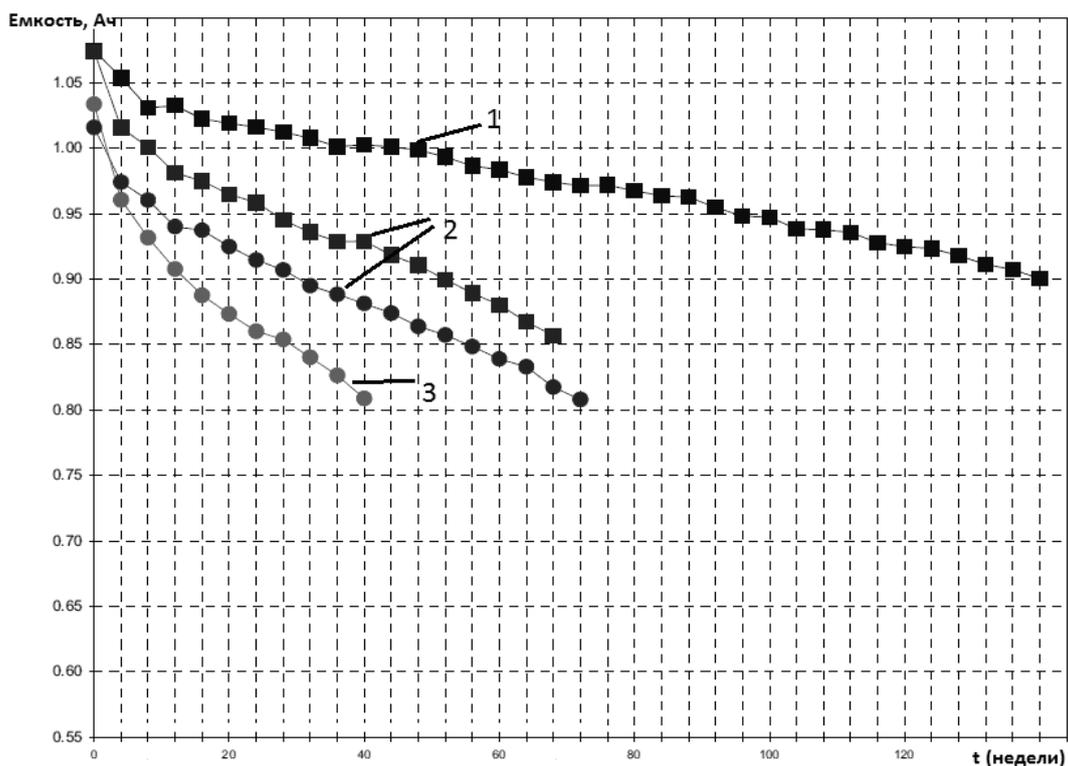
3. Высокие температуры при использовании аккумуляторов также ведут к быстрому старению и снижению заряда АКБ. На рис. 2 и 3 приведены графики изменения емкости аккумулятора, используемого при различных температурах [2]. Как говорилось ранее, основные потери в аккумуляторе под действием тока – потери на эквивалентном внутреннем сопротивлении. При длительном

использовании аккумулятора его эквивалентное сопротивление тоже изменяется, особенно при повышенной температуре эксплуатации аккумулятора [3].

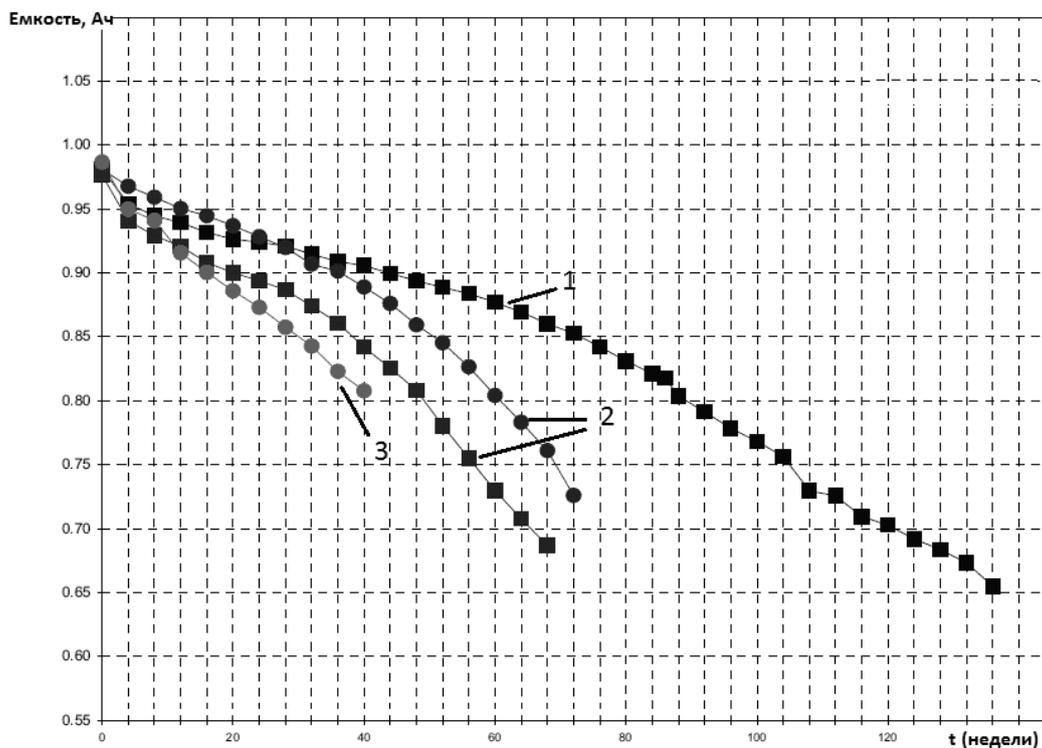
Анализ графиков рис. 2 и 3 свидетельствует, что повышение температуры крайне негативно сказывается на энергетических показателях литий - ионных аккумуляторов. Если проанализировать данные рис. 2,б, на котором ток разряда аккумулятора равняется 1С, то порог снижения емкости аккумулятора до 80 % от номинала при 25°C наступает на 46 % позже, чем при 45°C. График рис. 3 свидетельствует, что после года использования при температуре 25°C эквивалентное внутреннее сопротивление аккумулятора оказывается на 23 % меньше, чем когда он эксплуатируется при 45°C.

1. Снижение емкости аккумуляторов в складированном состоянии в зависимости от температуры окружающей среды (в % от  $C_{НОМ}$ )

| температура | с 40 % зарядом | со 100 % зарядом   |
|-------------|----------------|--------------------|
| 0 °C        | 2 % за год     | 2 % за год         |
| 25 °C       | 4 % за год     | 20 % за год        |
| 40 °C       | 15 % за год    | 35 % за год        |
| 60 °C       | 25 % за год    | 40 % за три месяца |



а



б

Рис. 2. Графики зависимости емкости аккумулятора от его рабочей температуры при токе C/25 (а) и C/1 (б) для температур, °С: 1 – 25; 2 – 45 (два эксперимента); 3 – 55

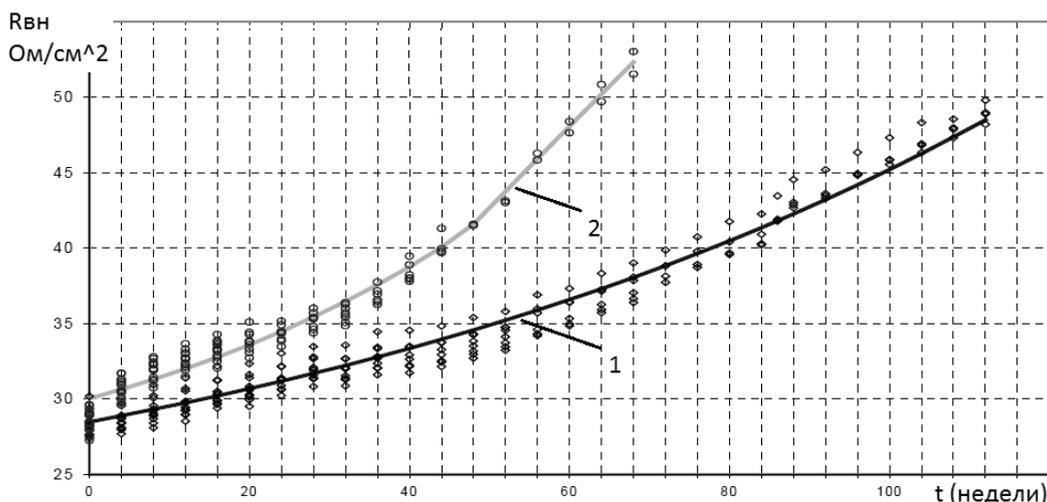


Рис. 3. Изменение внутреннего сопротивления аккумулятора с течением времени при температурах, °С: 1 – 25; 2 – 45

**Цель работы.** Приведенная информация позволяет сделать следующие выводы: уменьшение токов заряда/разряда аккумулятора приведет к лучшим энергетическим показателям, а снижение температуры, при которой эксплуатируется аккумулятор, замедляет процесс уменьшения емкости аккумуляторов. Поэтому целью работы является поиск способов управления электроприводом, снижающих токи аккумулятора и его температуру.

**Материалы исследования.** В данной статье исследуются преимущества применения суперконденсатора (СК) как дополнительного источника электроэнергии в АЭТС. Предполагается, что применение СК является одним из эффективных способов уменьшения токов аккумулятора. К особенностям СК можно отнести большой цикл жизни (миллионы циклов заряд-разряд), относительно низкое внутреннее сопротивление, возможность поглощения и генерации больших мощностей. Предлагается использовать СК для накопления энергии рекуперации при торможении АЭТС, а АКБ полностью исключить из этого процесса. Накопленную в СК энергию целесообразно использовать при разгоне АЭТС для увеличения мощности и уменьшения токов разряда АКБ. Так как напряжение отдельных серийных аккумуляторов часто не превышает 2,8 В, то СК объединяют в блоки суперконденсаторов (БСК).

Для эффективной работы БСК в системе электропривода АЭТС была предложена схема, в упрощенном виде показанная на рис. 4. В нем БСК – блок суперконденсаторов, соединенных последовательно, АКБ – аккумуляторная батарея, ЭД – электродвигатель, ПР-ЭД – преобразователь напряжения и тока ЭД. К1, К2 и К3 – полупроводниковые ключи. Токи: АКБ –  $I_{АКБ}$ , БСК –  $I_{СК}$ , ПР-ЭД –  $I_{ПР}$ . Схема на рис. 4 построена для решения задачи совместного заряда и разряда АКБ и БСК. Основная цель БСК – максимально разгрузить АКБ при разгонах и торможениях, когда в ЭД протекают большие динамические токи. Задавшись желаемым током разряда АКБ и управляя ключами К1 и К2, формируем ток  $I_{СК}$ , который протекает при разряде БСК,

$$\gamma I_{СК} = I_{ПР} - I_{АКБ}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – скважность импульсов, образуемых ключами К1 и К2. При рекуперации вся энергия уходит на заряд БСК:

$$\gamma I_{СК} = I_{ПР}. \quad (2)$$

Для исследования поведения СК и определения его роли в схеме рис. 4 предложена модель в системе MatLab Simulink. В модели электропривод ПР-ЭД представляет собой двухконтурную систему подчиненного регулирования: внутренний контур – контур тока двигателя, внешний – контур скорости ЭД. Аккумуляторная батарея прямо подключается к электроприводу ПР-ЭД, а БСК под-

ключен параллельно АКБ через свой понижающий преобразователь, собранный на

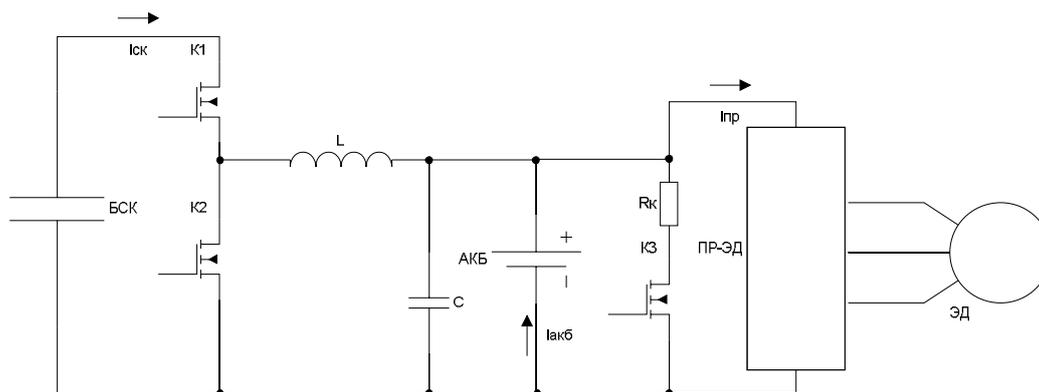


Рис.4. Электрическая схема СК и АКБ в системе управления электроприводом АЭТС

ключах K1, K2 и LC-фильтре.  $R_K$  – разрядный резистор, который подключается ключом K3. Резистор необходим в тех случаях, когда БСК зарядился полностью, а процесс торможения не прекратился.

В модели использовано АЭТС с такими базовыми параметрами: сухая масса 700 кг,  $R_K=0,2$  Ом. Параметры двигателя:  $P_{НОМ}=40$  кВт,  $U_{НОМ}=400$  В,  $I_{НОМ}=100$  А,  $I_{МАХ}=200$  А. Параметры АКБ: изготовитель – фирма «Vrusa», модель «EVB1-350-40»,  $U_{НОМ}=350$  В,  $I_{НОМ\text{РАЗР.}}=200$  А (5С),  $I_{ЗАР.}=80$  А (2С). Внутреннее сопротивление батареи  $R_{ВН. АКБ}=140$  мОм. БСК представляет собой последовательно соединенные СК фирмы «Maxwell», каждый емкостью 1500 Ф, с максимальным напряжением 2,8 В. Параметры БСК:  $U_{МАХ}=430$  В,  $I_{НОМ}=150$  А,  $R_{ВН. БСК}=60$  мОм,  $C_{БСК}=9,7$  Ф. В модели механической части АЭТС, кроме потерь на трение, учитываются также аэродинамические потери.

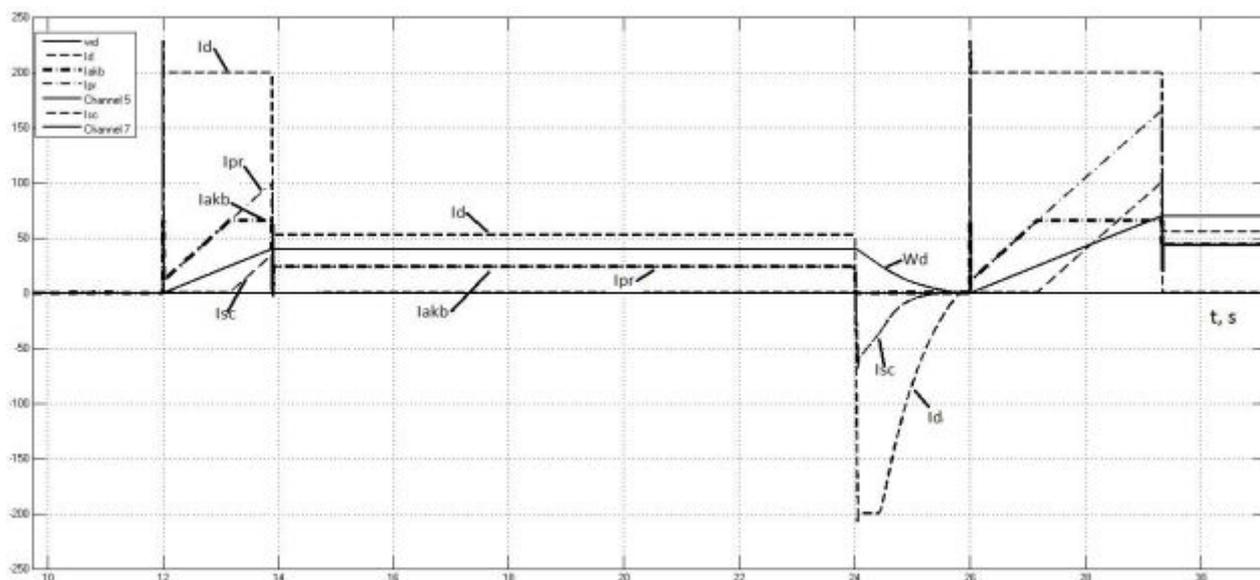
Основная цель моделирования – сравнить расход и тепловые характеристики АКБ при работе с БСК и без него. Для этого была проведена серия расчетов. Полагали, что АЭТС двигалась по трапецидальной тахограмме, ускорения и торможения приняты максимально допустимыми для данной силовой установки, а интервалы движения брались в соответствии с городским ездовым циклом по правилам №83 ЕЭК ООН. В варианте с использованием БСК максимальный ток разряда АКБ равнялся 66 А (при наличии достаточной энергии у БСК, в противном случае

увеличивался ток разряда АКБ), а при торможении вся энергия направлялась в БСК, чтобы максимально разгрузить АКБ и снизить количество циклов заряд-разряд. В варианте с использованием только АКБ максимальный ток АКБ не ограничивался, он равнялся 200 А, ток заряда при рекуперативном торможении составил 80 А – в соответствии с технической документацией к батарее.

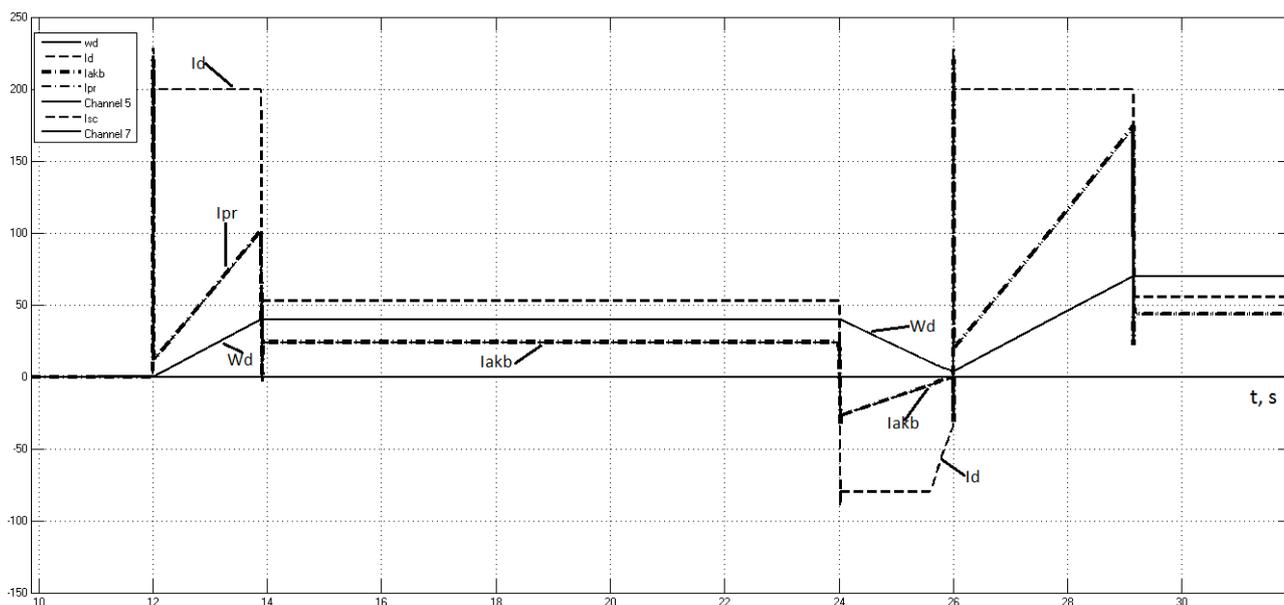
В обоих случаях учитывался разряд АКБ и изменение его температуры. Для сбора максимального количества информации моделирование происходило продолжительное время – 1260 с, что примерно соответствует 10 городским циклам по правилам №83 ЕЭК ООН.

Ниже представлены фрагменты осциллограмм обоих случаев. На осциллограммах показан фрагмент движения АЭТС при использовании БСК (рис. 5,а) и без него (рис. 5,б). В случае с использованием БСК ток АКБ ограничивался на уровне 66 А, а когда ток потребления преобразователя стремился стать больше 66 А, БСК начинал отдавать необходимую энергию при разгоне. При использовании только АКБ ток преобразователя двигателя был равен току АКБ. При торможении АКБ или вообще не заряжался (с использованием БСК), или заряжался небольшим допустимым током, что увеличивало время торможения. На рисунках 5:  $I_d$  – ток двигателя,  $I_{ск}$  – ток БСК,  $I_{акб}$  – ток аккумулятора,  $I_{пр}$  – ток потребления преобразователем,  $W_d$  – скорость ЭД.

Результаты моделирования сведены в табл. 2.



а



б

Рис. 5. Осциллограммы разгона и торможения АЭТС при использовании АКБ и БСК(а) и при использовании только АКБ(б)

## 2. Результаты моделирования

| Описание                                                                  | АКБ    | АКБ и БСК |
|---------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| ЭДС АКБ в начале моделирования, В                                         | 403,2  | 403,2     |
| ЭДС АКБ в конце моделирования, В                                          | 360,86 | 363,5     |
| Температура АКБ в конце моделирования, °С<br>(начальная температура 20°С) | 33,29  | 29,79     |

**Выводы.** Результаты моделирования показали: при использовании БСК с АКБ аккумулятор разрядился на 7,7 % меньше, чем при использовании только АКБ. Разница температур всего 3,5°C, так как моделирование проводилось только на небольшом отрезке времени. При более длительном применении аккумулятора разница температур должна увеличиться, поэтому можно говорить, что без использования БСК изменение температуры АКБ больше на 35%, чем с БСК. Особенно это будет заметно при поездках на большие расстояния с применением станций быстрой зарядки, которые заряжают АКБ большими токами, увеличивая температуру АКБ. Учитывая рис. 2 и 3, можно предположить, что с течением времени параметры АКБ будут ухудшаться, тогда как у СК параметры останутся практически неизменными, что увеличит эффективность применения СК еще больше. Применение СК и с точки зрения уменьшения зарядных циклов, и с точки зрения температуры АКБ будет иметь все возрастающее влияние с падением емкости АКБ. Таким образом, использование суперконденсатора повышает стоимость АЭТС, но при этом ощутимо увеличивает продолжительность жизни литий-ионных АКБ за счет уменьшения динамических нагрузок на аккумулятор.

Получено 13.08.2013

#### Список использованной литературы

1. Литий-ионный аккумулятор. – Wikipedia, the Free Encyclopedia, № 194056RU [Электронный ресурс] – Режим доступа : [http://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-ионный\\_аккумулятор](http://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-ионный_аккумулятор) – 24.06.2013.
2. Jon P. Christophersen. Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Gen 2. Performance Evaluation Final Report [Text] / P. Jon, Christophersen Ira Bloom, Edward V. Thomas // Idaho National Laboratory – 2006.
3. Harold Haskins. Battery Technology Life Verification Test Manual. Advanced Technology Development Program For

Lithium-Ion Batteries [Text] / Harold Haskins (USABC), Vince Battaglia (LBNL) // Idaho National Laboratory. – 2005.

4. Ключев В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [Текст] : учебник для вузов / В. И. Ключев, В. М. Терехов. – М. : Энергия, 1980. – 360 с.

5. Смотров Е. А. Оптимизация процесса торможения в электроприводах малых электротранспортных средств [Текст] / Е. А. Смотров, Д. В. Вершини, В. Г. Герасимьяк // *Электротехнические и компьютерные системы*. – Одесса, 2012. – № 07 (83). – С. 5 – 11.

6. Feng Q. Design of electric vehicle energy regenerative braking system based on super capacitor [Text] / Q. Feng, H. Li // *Applied Mechanics and Materials*. – 2012. – P. 149 – 153.

7. Lian L. Control system design of braking energy regeneration of miniature electric car based on super electric capacity [Text] / L. Lian, L. Gao, X. Chen // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 490. – P. 1114 – 1118.

8. Zhang J. Development of the electrically-controlled regenerative braking system for electrified passenger vehicle [Text] / [J. Zhang, C. Lv, X. Yue and others] // *SAE Technical Conference Papers*. – 2013. – Vol. 2.

9. Xiao H.-Q. Efficiency optimization of energy regeneration for electric vehicle [Text] / [H.-Q. Xiao, S.-M. Liu, Z.-J. Wang and others] // *ICECC 2011*. – Proceedings, art. no. 6067936. – P. 4276 – 4279.

10. Hellgren J. Maximisation of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car [Text] / J. Hellgren, E. Jonasson // *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. – 2007. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 95 – 121.

11. Chabchoub M. H. Consolidation of the electric vehicle battery by an ultracapacitor for performance improvement [Text] / M. H. Chabchoub, H. Trabelsi // *10-th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2013*, art. no. 6564066.

DOI : 10.1109/SSD.2013.6564066.  
URL : <http://sci-hub.org/pdf-cache/43f82adc a301e2c52a4aa902edcbf210.pdf>

12. Avelino W. O. a. Electric go-kart with battery-ultracapacitor hybrid energy storage system [Text] / [W. O. a. Avelino, F. S. b. Gar-

cia, A. A. c. Ferreira and others] // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics – From Technology to Business and Public Policy. ITEC 2013, art. no. 6573499.

DOI : 10.1109/ITEC.2013.6573499.

URL : <http://sci-hub.org/pdf-cache/a016a67b4ca9-2fbbf22e93d59d68334a.pdf>.

13. Eroglu H. H. a. Control, design, and implementation of a low-cost ultracapacitor test system [Text] / H. H. a. Eroglu, A. M. b. Hava // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2013. – 21 (3). – P. 630 – 648.

DOI : 10.3906/elk-1109 – 18.

14. Tankari M. A. a. Use of ultracapacitors and batteries for efficient energy management in wind-diesel hybrid system [Text] / [M. A. a. Tankari, M. B. b. Camara, B. b. Dakyo and others] // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2013. – 4 (2), art. no. 6392923. – P. 414 – 424.

DOI : 10.1109/TSTE.2012.2227067.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/TSTE.2012.2227067.pdf>.

15. Sun H. a. Application of battery-ultracapacitor hybrid system in the hybrid electric vehicles [Text] / [H. a. Sun, X. a. Pei, L. a. Xu and others] // Lecture Notes in Electrical Engineering, 192 LNEE(2013). – 2013. – Vol. 4. – P. 785 – 793.

DOI : 10.1007/978-3-642-33741-3\_7.

URL : [http://libgen.org/scimag5/10.1007/978-3-642-33741-3\\_7.pdf](http://libgen.org/scimag5/10.1007/978-3-642-33741-3_7.pdf).

Получено 13.08.2013

#### References

1. Lithium-ion battery. – Wikipedia, the Free Encyclopedia, № 194056RU. [Electronic resource] – Access mode.: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Lithium\\_ionnyy\\_akkumulyator](http://ru.wikipedia.org/wiki/Lithium_ionnyy_akkumulyator) – 24.06.2013 [in Russian].

2. Jon P. Christophersen. Advanced Technology Development Program for Lithium-Ion Batteries: Gen 2. Performance Evaluation Final Report [Text] / Jon P. Christophersen, Ira Bloom, Edward V. Thomas // Idaho National Laboratory – 2006 [in English].

3. Harold Haskins (USABC). Battery Technology Life Verification Test Manual. Advanced Technology Development Program For Lithium-Ion Batteries [Text] / Harold Haskins (USABC), Vince Battaglia (LBNL) // Idaho National Laboratory – 2005 [in English].

4. Klyuchev V. I. Electric Drive and Automation of General-purpose Mechanisms : School book [Text] / V. I. Klyuchev, V. M. Terekhov. – Moscow : Energy, 1980. – 360 p. [in Russian].

5. Smotrov E. A. Optimisation of Braking System in the Small Electric Vehicles [Text] / E. A. Smotrov, D. V. Vershinin, V. G. Gerasymiak // Electrotechnic and Computer Systems. – Odessa, 2012. – № 07 (83). – P. 5 – 11 [in Russian].

6. Feng Q. Design of Electric Vehicle Energy Regenerative Braking System Based on Super Capacitor [Text] / Q. Feng , H. Li // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – P. 149 – 153 [in English].

7. Lian L. Control System Design of Braking Energy Regeneration of Miniature Electric car Based on Super Electric Capacity / L. Lian, L. Gao, X. Chen // Advanced Materials Research. – 2012. – P. 1114 – 1118 [in English].

8. Zhang J. Development of the Electrically-controlled Regenerative Braking System for Electrified Passenger Vehicle (Conference Paper) [Text] / [J. Zhang, C. Lv, X. Yue and others] // SAE Technical Papers. – 2013. – Vol. 2 [in English].

9. Xiao H.-Q. Efficiency Optimization of Energy Regeneration for Electric Vehicle [Text] / [H.- Q. Xiao, S.-M. Liu, Z.-J. Wang and others] // ICECC 2011 – Proceedings, art. no. 6067936. – P. 4276 – 4279 [in English].

10. Hellgren J. Maximisation of Brake Energy Regeneration in a Hybrid Electric Parallel car [Text] / J. Hellgren, E. Jonasson // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. – 2007. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 95 – 121 [in English].

11. Chabchoub M. H. Consolidation of the Electric Vehicle Battery by an Ultracapacitor for Performance Improvement [Text] / M. H. Chabchoub, H. Trabelsi // 10-th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices,

SSD 2013, art. no. 6564066. – 2013 [in English].

DOI : 10.1109/SSD.2013.6564066.

URL : <http://sci-hub.org/pdfcache/43f82adca301e2c52a4aa902edcbf210.pdf>.

12. Avelino W. O. a. Electric go-kart with Battery-ultracapacitor Hybrid Energy Storage System [Text] / [W. O. a. Avelino, F. S. b. Garcia, A. A. c. Ferreira and others] // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo : Components, Systems, and Power Electronics – From Technology to Business and Public Policy, ITEC 2013, art. no. 6573499. – 2013 [in English].

DOI : 10.1109/ITEC.2013.6573499.

URL : <http://sci-hub.org/pdf-cache/a016a67b4ca9-2fbbf22e93d59d68334a.pdf>.

13. Eroglu H. H. a. Control, Design, and Implementation of a low-cost Ultracapacitor test System [Text] / H. H. a. Eroglu, A. M. b. Hava // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. –2013. – 21 (3). – P. 630 – 648 [in English].

DOI : 10.3906/elk-1109-18.

14. Tankari M. A. a. Use of Ultracapacitors and Batteries for Efficient Energy Management in Wind-diesel Hybrid System [Text] / [M. A. a. Tankari, M. B. b. Camara, B. b. Dakyo and others] // IEEE Transactions on Sustainable Energy, 4 (2), art. no. 6392923. – 2013. – P. 414 – 424 [in English].

DOI : 10.1109/TSTE.2012.2227067.

URL : <http://libgen.org/scimag5/10.1109/TSTE.2012.2227067.pdf>.

15. Sun H. a. Application of Battery-ultracapacitor Hybrid System in the Hybrid Electric Vehicles [Text] / [H. a. Sun, X. a. Pei, L. a. Xu and others] // Lecture Notes in Electrical Engineering, 192 LNEE. – 2013. – Vol. 4. –P. 785 – 793 [in English].

DOI : 10.1007/978-3-642-33741-3\_7.

URL : [http://libgen.org/scimag5/10.1007/978-3-642-33741-3\\_7.pdf](http://libgen.org/scimag5/10.1007/978-3-642-33741-3_7.pdf).



Герасимьяк  
Валдис Георгиевич,  
аспирант каф. ЭМС КУ  
Одесского нац.  
политехн. ун-та