

УДК 621.313.04

А. С. Бешта, В. С. Федорейко, доктора техн. наук,
А. В. Балахонцев, канд. техн. наук,
А. А. Албу

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ БАТАРЕИ КАК СРЕДСТВО ДЛЯ РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация. Представлена модель гальванической батареи. Модель основана на уравнениях, которые пригодны для моделирования различных типов батарей при использовании соответствующих коэффициентов. Модель может быть использована как средство для расчета характеристик электрического транспортного средства, например для расчета потенциала экономии топлива и проверки эффективности стратегии управления состоянием заряда. Представлен метод вычисления необходимых коэффициентов уравнений на основе номинальных характеристик.

Ключевые слова: источник питания, накопитель энергии, транспортное средство, моделирование разряда

A. Beshta, ScD., V. Fedoreyko, ScD.,
A. Balakhontsev, PhD.,
A. Albu

UNIVERSAL MODEL OF GALVANIC BATTERY FOR CALCULATIONS OF ELECTRIC VEHICLES

Abstract. The paper deals with the model of galvanic battery, which is based on equations, suitable for simulation of any kind of battery given proper coefficients. The model can be used as a tool for calculations of electric vehicles performances, e.g. to estimate fuel economy potential or to verify the efficiency of various state-of-charge management strategies. The technique for calculation of necessary coefficients is given.

Keywords: power source, energy accumulator, hybrid vehicle, simulation of discharge

О. С. Бешта, В. С. Федорейко, доктора техн. наук,
О. В. Балахонцев, канд. техн. наук,
А. А. Албу

УНІВЕРСАЛЬНА МОДЕЛЬ ГАЛЬВАНІЧНОЇ БАТАРЕЇ ЯК ЗАСІБ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. Представлена модель гальванічної батареї. Модель базується на рівняннях, які придатні для моделювання різних типів батарей при використанні відповідних коефіцієнтів. Модель може бути використана як засіб для розрахунку характеристик електричного транспортного засобу, наприклад для розрахунку потенціалу економії палива та перевірки ефективності стратегії управління станом заряду. Представлено метод обчислення необхідних коефіцієнтів рівнянь на основі номінальних характеристик.

Ключові слова: джерело живлення, накопичувач енергії, транспортний засіб, моделювання розряду

Введение. Батарея – основной элемент как гибридного, так и строго электрического транспортного средства. Другие компоненты, такие как электрические двигатели, электрические преобразователи энергии различных типов и даже двигатель внутреннего сгорания предположительно достигают своей максимально возможной эффективности. Их дальнейшее усовершенствование едва возможно в ближайшем будущем. Кроме того, для текущих характеристик накопителей энергии, которые в основном представлены гальваническими батареями, улучшение других электрических компонентов нецелесообразно. В гибридном транспортном средстве (ГТС) любой топологии обычно батарея ограничивает экономию топлива и динамику ТС.

Для подтверждения этого мы рассмотрели источники экономии топлива и их потенциал. ГТС экономит топливо, используя три основных процесса: рекуперация кинетической энергии на протяжении торможения

ТС; улучшение рабочего режима двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и отключение двигателя на протяжении остановок (микро гибридные технологии).

Использование или рекуперация кинетической энергии означает ее улавливание на протяжении торможения (иначе она рассеивается, как тепло на тормозном диске) и ее хранение в батарее или другом устройстве, таком как суперконденсатор или супермаховик. Этот подход обеспечивает лучшую экономию топлива для диаграммы движения с частыми пусками и остановками. К тому же, это может быть выполнено, если у электрической части силовой цепи достаточно номинальной мощности для обеспечения необходимого торможения. В большинстве современных ГТС лишь небольшая часть кинетической энергии рекуперирована, в основном, ограниченной скоростью заряда батареи.

Смещение рабочих точек ДВС в более эффективную зону выполняется, в основном, для ТС последовательной топологии. Двигатель вращается с постоянной скоростью и моментом, и заряжает батарею оптимальным током. Далее ДВС останавливается и ТС движется самостоятельно, используя запасенную энергию. Этот

© Бешта А.С., Федорейко В.С., Балахонцев А.В.,
Албу А.А., 2014

принцип может быть реализован в ГТС параллельной конфигурации, однако требует более сложных подходов управления. В основном, принцип хорошо приспособлен для циклов движения с относительно длинным крейсерованием. С другой стороны, энергетическая емкость батареи определяет эффективность ТС [1 – 5].

В заключение, во многих современных ТС используются так называемые микро гибридные технологии. В микрогибридах нет механической связи между электродвигателем и колесами, и отсутствует электрическая силовая цепь. Электрическая часть используется только для обеспечения работы дополнительного оборудования, когда ДВС отключается. Этот подход особо эффективен для движения в городском режиме с частыми остановками на светофорах, экономии топлива и уменьшения выбросов CO₂.

Максимальное количество сэкономленного топлива, обеспечиваемое этими технологиями, равно 100%. Итак, рекуперация кинетической энергии обеспечивает наибольшую долю максимально возможного сэкономленного топлива, но в тоже время, этот принцип требует использования батарей с более высокими номинальными параметрами, особенно, тока заряда [4].

На сегодняшний день, электрические двуслойные конденсаторы или ультраконденсаторы появились на рынке и стали довольно дешевыми. Их применение для рекуперации энергии в ГТС очень многообещающе, но необходимость стабилизации напряжения делает это решение дорогостоящим. Итак, в ближайшем будущем, преобладающим накопителем энергии останутся гальванические батареи.

Все стратегии энергосбережения для электрических ТС основаны на определенной стратегии управления состоянием заряда батареи (SOC). Для их использования необходимо знать режим работы батареи, факторы ограничивающие ее работу на протяжении заряда/разряда. Мы провели исследования для расчета эффективности энергетических стратегий управлений и проверки характеристик ТС [3].

Цель работы – построение модели батареи, ее использование для анализа эффективности различных стратегий управления приводом гибридного транспортного средства.

МОДЕЛЬ БАТАРЕИ. Допущения. Физические явления, происходящие в гальванических батареях, очень сложны и, в основном, описываются нелинейными уравнениями. Для расчетов ГТС модель батареи должна быть упрощена, насколько это возможно [6 – 10]. Таким образом, были приняты некоторые допущения:

- внутреннее сопротивление постоянно на протяжении циклов заряда и разряда, и не изменяется с изменением амплитуды тока;
- все необходимые коэффициенты уравнений и параметры модели извлекаются из характеристики разряда и принимаются такими же для режима заряда;
- температура не влияет на характеристики батареи;
- не представлен саморазряд батареи;
- отсутствует эффект памяти.

Основные уравнения. Модель батареи, представленная ниже, отражает все электрические режимы работы для нескольких типов накопителей энергии. Уравнения достаточно точно описывают динамику напряжения с изменением тока и учитывают напряжение разомкнутого контура (OCV), как функцию состояния заряда батареи (SOC). Поляризованное напряжение добавлено в уравнения для повышения точности моделирования работы при разомкнутом контуре [7].

Напряжение батареи описывается следующим уравнением:

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it - R \cdot i + A \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* \quad (1)$$

где V_{batt} – напряжение батареи, В; E_0 – постоянное напряжение батареи, В; K – поляризованная постоянная (В/(А час)) или поляризованное сопротивление (Ом); Q – ёмкость батареи, А час; it – действительный заряд батареи, А час; A – амплитуда экспоненциальной зоны, В; B – инверсная постоянная времени экспоненциальной зоны, А час⁻¹; R – внутреннее сопротивление, Ом; i – ток батареи, А; i^* – отфильтрованный ток, А.

Ограничения в модели:

- минимальное напряжение ненагруженной батареи 0 В, а максимальное составляет $2 \times E_0$;
- минимальная емкость батареи 0 А час, а максимальная Q .

Уравнение содержит компонент падения напряжения, вследствие протекания отфильтрованного тока через поляризованное сопротивление. Этот член уравнения позволяет моделировать медленное уменьшение напряжения, в зависимости от амплитуды тока, после того, как оно достигнет максимального. Использование отфильтрованного тока позволяет исключить алгебраические обратные связи - типичную проблему моделирования батарей [8 – 10].

Еще одна проблема – OCV изменяется нелинейно с изменением SOC. Этот эффект моделируется с помощью, так называемого, поляризованного напряжения. Последний элемент уравнения представляет собой нелинейную функцию напряжения батареи от тока разряда и действительного заряда.

Экспоненциальная зона разряда в уравнении 1 типична для Li-Ion батарей. У других типов батарей (Lead-Acid, NiMH и NiCD) присутствует явление гистерезиса между зарядом и разрядом, не зависящий от их действительного SOC. Падение напряжения, обусловленное этим феноменом, может быть рассчитано при помощи нелинейной динамической системы, показанной ниже:

$$\text{Exp}(t)' = B \cdot |i(t)| \cdot (-\text{Exp}(t) + A \cdot u(t)) \quad (2)$$

где $\text{Exp}(t)$ – напряжение экспоненциальной зоны, В; $i(t)$ – ток батареи, А; $u(t)$ – режим заряда или разряда.

Напряжение экспоненциальной зоны зависит от его начального значения $\text{Exp}(t_0)$ и режима работы (заряда или разряда). Необходимо учитывать, что описание процесса заряда и разряда зависит от типа батареи. Соответствующие уравнения для различных типов батарей представлены ниже.

1. Функции падения напряжения для различных типов батарей представлены в таблице ниже

Тип батареи	Уравнения для режимов заряда и разряда
Lead-Acid	Разряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$ Заряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$
Li-Ion	Разряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it)$ Заряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it)$
NiMH и NiCd	Разряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$ Заряд $V_{batt} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{ it - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$

Используя эти уравнения и взаимозависимость между компонентами напряжения и током батареи, мы можем составить универсальную модель батареи (рис. 1).

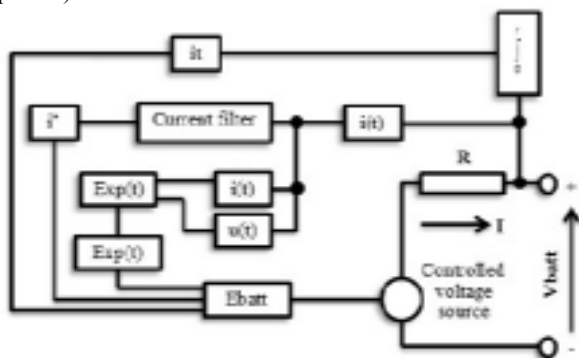


Рис. 1. Модель батареи

Определение коэффициентов уравнения. Для определения коэффициентов уравнения и параметров модели необходимо измерить три точки характеристики разряда батареи: напряжение полного заряда (V_{full}), конец экспоненциальной зоны (напряжение и емкость), конец номинальной зоны (напряжение и емкость), как показано на рис. 2.

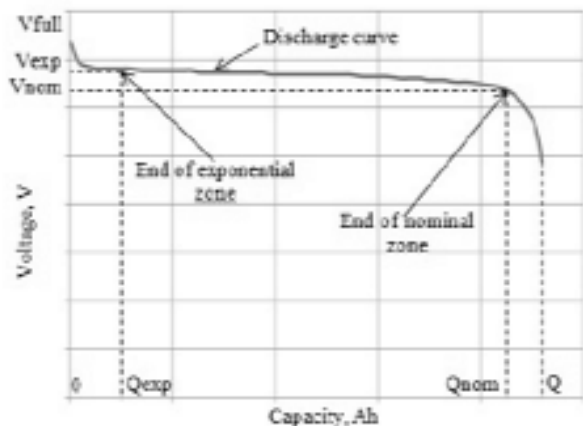


Рис. 2. Типичная характеристика разряда

Экспоненциальная часть уравнений рассчитывается согласно таким выражениям:

$$A = V_{full} - V_{exp} \quad (3)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (4)$$

Коэффициент K рассчитывается следующим образом:

$$K = \frac{[V_{full} - V_{nom} + A(\exp(-B \cdot Q_{nom}) - 1)] \cdot (Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (5)$$

Моделирование. С помощью уравнений (1 – 5) и структуры, показанной на рис. 1, была смоделирована работа типичной Lithium-Ion батареи. Зависимости напряжения батареи от емкости – кривая, полученная при моделировании и экспериментально – приведены ниже.

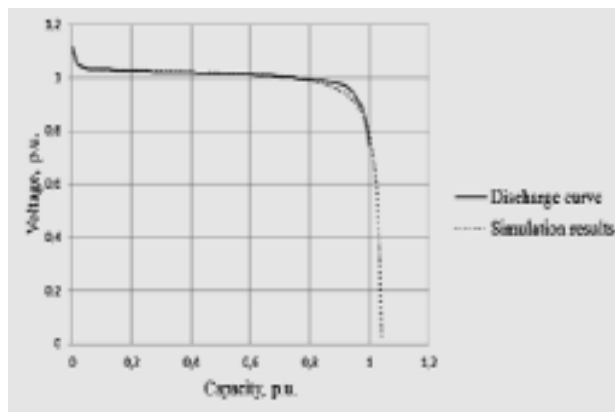


Рис. 3. Результаты моделирования

Как видим, модель довольно точно отображает процесс разряда. Динамический режим работы батареи на протяжении нескольких циклов заряда/разряда показан на рисунке ниже. Кривые построены в относительных единицах [6 – 10].

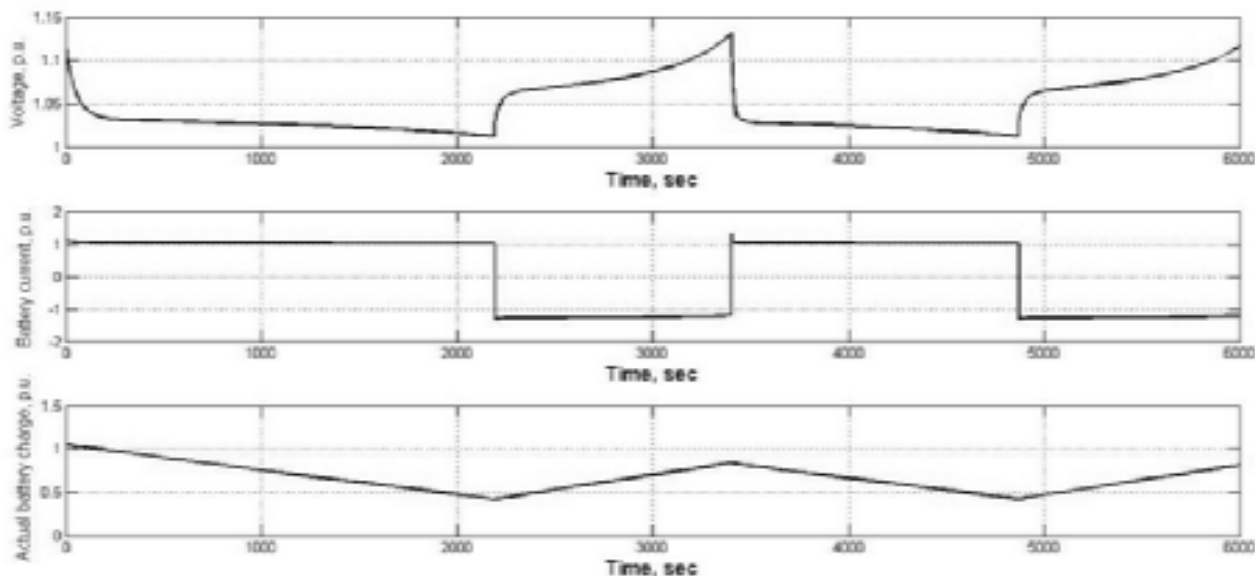


Рис. 4. Динамические процессы на протяжении циклов заряда/разряда

Вывод. Структура и зависимости отражают связь между состоянием заряда батареи, ее напряжением и током в различных режимах работы. Таким образом, модель может быть использована для моделирования процессов обмена энергией как в гибридном, так и чисто электрическом ТС, расчета необходимых параметров для достижения требуемых характеристик экономии топлива или динамики ТС и для других целей.

Для того чтобы улучшить описание режимов работы батареи, необходимо рассмотреть зависимость емкости батареи от амплитуды тока. Это особенно важно, когда используются Lead-Acid батареи.

Список использованной литературы

1. Ehsani M., Gao Y., and Emadi A., (2010), *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel cell Vehicles*, CRC Transactions Press, New York.
2. Husain I., (2005), *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, CRC Transactions Press, New York.
3. Mi C., Abul M., and Gao D., (2011), *Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives*, John Wiley & Sons, Ltd.
4. Larminie J., and Lowry J., (2003), *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Ltd.
5. Wipke K., Cuddy M., and Burch S., (1999), "ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach", *National Renewable Energy Laboratory*.
6. Beshta A., "Design of Electromechanical System for Parallel Hybrid Electric Vehicle", *Proceedings of the European Control Conference, IEEE Trans. Issue*.

7. Benn H., (2009), *Simulations of Batteries and their Physical Effects*, *IEEE Trans. Issue*, Vol. 1, pp. 123 – 125.

8. Tremblay O., and Dessaint L., (2009), *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications*, *World Electric Vehicle Journal Vol. 3, EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*,

9. Tremblay O., Dessaint, L., and Dekkiche A. A., (2007), "Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", *IEEE*.

10. Erdinc O., Vural B., and Uzunoglu M., (2009), "A Dynamic Lithiumion Battery Model Considering the Effects of Temperature and Capacity Fading", *IEEE*, pp. 383 – 386.

Получено 04.07.2014

References

1. Ehsani M., Gao Y., and Emadi A., (2010), *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel cell Vehicles*, CRC Transactions Press, New York (In English).
2. Husain I., (2005), *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, CRC Transactions Press, New York (In English).
3. Mi C., Abul M., Gao D., (2011), *Hybrid Electric Vehicles Principles and Applications with Practical Perspectives*, John Wiley & Sons, Ltd. (In English).
4. Larminie J., Lowry J., (2003), *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Ltd. (In English)
5. Wipke K., Cuddy M., Burch S., (1999), "ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Ap-

proach”, *National Renewable Energy Laboratory* (In English).

6. Beshta A. “Design of Electromechanical System for Parallel Hybrid Electric Vehicle”, *Proceedings of the European Control Conference, IEEE Trans. Issue* (In English).

7. Benn H., (2009), “Simulations of Batteries and their Physical Effects”, *IEEE Trans. Issue*, Vol. 1, pp. 123 – 125 (In English).

8. Tremblay O., Dessaint L., (2009), “Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications”, *World Electric Vehicle Journal Vol. 3, EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium* (In English).

9. Tremblay O., Dessaint, L., and Dekkiche A.A., (2007), “Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, *IEEE* (In English).

10. Erdinc O., Vural B., and Uzunoglu M., (2009), “A Dynamic Lithium-ion Battery Model Considering the Effects of Temperature and Capacity Fading”, *IEEE*, pp. 383 – 386 (In English).



Бешта
Александр Степанович,
член-корр. НАН Украины, д-р техн.
наук, проректор на научной работе
и зав. каф. электропривода Государ-
ственного ВУЗ «Национальный
горный ун-т».
Днепропетровск, пр. К. Маркса 19.
Тел.+38 (0562) 47 32 09.
E-mail: beshtaa@nmu.org.ua



Федорейко
Валерий Степанович,
д-р техн. наук, проф., академик
Академии экономических наук, зав.
каф. машиноведения и компьютер-
ной инженерии Тернопольского
нац. педагогического ун-та им.
Владимира Гнатюка.
г. Тернополь, ул. Максима Криво-
носа, 2. Тел.(0352) 43-56-83.
E-mail: kaf_mki@tnpu.edu.ua



Балахонцев
Александр Васильевич,
канд. техн. наук, доц. каф. электро-
привода Государственного ВУЗ
«Национальный горный универси-
тет».
Днепропетровск, пр. К. Маркса 19.
Тел. +38(056) 372 07 71.
E-mail: au95@ukr.net



Албу
Андрей Андреевич,
аспирант каф. электропривода
Государственного ВУЗ «Нацио-
нальный горный ун-т».
Днепропетровск, пр. К. Маркса 19.
Тел. +38(056) 372 07 71.
E-mail: andrey_albu@mail.ru