

4. Федорова Н. А. Моделирование изогонально армированных кольцевых пластин в полярной системе координат // Журн. СФУ. Сер. «Матем. и физ.». 2011. Т. 4, № 3. С. 400–405.

5. Федорова Н. А. Моделирование деформирования плоских конструкций со сложными криволинейными структурами армирования // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 92–98.

6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Исследование рациональных структур криволинейного армирования в полярной системе координат // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки». 2013. Вып. 1 (30). С. 233–245.

References

1. Feodorova N. A., Skutin L. I. Asymptotic form of the axisymmetric elasticity problem for anisotropic cylin-

dric shell. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1981, vol. 22, p. 725–730.

2. Nemirovsiy Yu.V, Feodorova N.A. *Matematicheskoe modelirovanie ploskikh konstruksii iz armirovannykh voloknistykh materialov* (Mathematical modeling of flat structures made of reinforced fiber materials). Krasnoyarsk, Sib. Fed. Univ., 2010. 136 p.

3. Nemirovsiy Yu. V, Feodorova N. A. *Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2010, no 5 (21), p. 96–104.

4. Feodorova N. A. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.*, 2011, vol. 4, no. 3, p. 400–405.

5. Feodorova N. A. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 3 (36), p. 92–98.

6. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2013, no. 1 (30), p. 233–244.

© Федорова Н. А., 2014

УДК 621.355: 519.713

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ

М. М. Хандорин¹, В. Г. Букреев²

¹ОАО «Научно-производственный центр «Полус»

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в. E-mail: m.khandorin@gmail.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: bukreev@tpu.ru

Представлен метод оценки остаточной емкости литий-ионного аккумулятора. Приведен краткий обзор существующих подходов к решению данной проблемы. Предложен способ подстройки интегрирующего счетчика ампер-часов аккумулятора на основе модели Тевенина. Параметры модели, которые зависят от степени заряженности аккумуляторной батареи, заданы дискретными значениями. Интерполяция этих параметров производится при помощи кубического сплайна, при этом их значения принимаются за его узлы. Для снижения вычислительной сложности алгоритма сплайн-интерполяция выполняется по равномерной сетке. Приведены сравнительные результаты моделирования в среде Matlab Simulink. Они показывают, что относительная погрешность определения остаточной емкости по данному алгоритму не превышает 6 %. Также приведена оценка потребления ресурсов микроконтроллера при использовании данного алгоритма.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, модель Тевенина, интегрирующий счетчик ампер-часов, сплайн-интерполяция.

EVALUATION OF LITHIUM-ION BATTERY DISCHARGE CAPACITY BASED ON THE REFERENCE MODEL

M. M. Khandorin¹, V. G. Bukreev²

¹Joint Stock Company “Research and Production Center “Polus”

56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: m.khandorin@gmail.com

²National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: bukreev@tpu.ru

The method of lithium-ion battery remaining capacity has been developed. The short overview of approaches to solving this problem is provided in this paper. The integrating ampere-hour counter adjustment method based on the

Thevenin model has been developed. The state of charge dependent parameters of Thevenin model is defined in discrete values. Model parameters interpolation has been made using the cubic spline, wherein a parameter's values are used as its nodes. To reduce a spline coefficients algorithm computational complexity a uniform grid of values is used. The modeling results in Matlab Simulink software of algorithm work are provided. The relative error of remaining capacity estimation was less than 6%. The microcontroller consumption has been also rated in this paper.

Keywords: lithium-ion battery, integrating ampere-hour counter, Thevenin model, spline-interpolation.

Эффективное управление электропитанием и энергобалансом космического аппарата, на котором накопителем энергии служит аккумуляторная батарея, требует точной информации об имеющейся разрядной емкости. Для широко применяемых в настоящий момент литий-ионных аккумуляторных батарей не в полной мере определены аналитические зависимости между внешними измеряемыми параметрами аккумулятора и его остаточной емкостью.

Наиболее очевидно для подсчета остаточной емкости аккумулятора использование счетчика ампер-часов, который является составной частью многих алгоритмов оценки данной емкости. Он применяется даже в однокристалльных системах, например, в микросхемах DS2438, DS2780 и аналогичных [1]. Алгоритм определения остаточной емкости по счетчику ампер-часов предполагает вычисление полной емкости аккумулятора при текущих условиях эксплуатации и вычитание из этой величины затраченной емкости. Основной недостаток при этом – накопление интегральной ошибки при циклическом заряде и разряде батареи [2].

Для повышения точности работы счетчика ампер-часов применяются различные методы. Так, оценить степень заряженности аккумулятора можно при помощи счетчика ампер-часов и самообучающейся системы на основе нечеткой логической модели, которая корректирует показания счетчика при изменении параметров батареи [3]. Этот метод был разработан применительно к свинцово-кислотным аккумуляторам, но оказался достаточно универсальным.

Повысить точность работы счетчика ампер-часов можно и с помощью фильтра Калмана [4]. Данные от счетчика поступают в модель литий-ионной аккумуляторной батареи, которая вычисляет ее выходное напряжение при текущих значениях тока разряда и температуры. Полученное значение напряжения сравнивается с измеряемым напряжением на батарее, и в соответствии с ошибкой осуществляется коррекция показаний счетчика ампер-часов. При этом обеспечивается более высокая точность, чем обычно. Однако для работы с эталонной моделью батареи требуется большая вычислительная мощность, что не всегда возможно в микроконтроллерных системах.

Рассмотрим другой способ подстройки счетчика ампер-часов по эталонной модели. Для этого введем поправочный коэффициент δ_i и расчет значения остаточной емкости батареи $C_{ост}$ будем производить по следующей формуле:

$$C_{ост} = C_0 - \sum_{i=0}^n (I_i \Delta t_i + \delta_i), \quad (1)$$

где C_0 – разрядная емкость батареи после полного заряда, А·ч; I_i – ток разряда или заряда на i -м интервале времени; Δt_i – длительность i -го интервала времени интегрирования.

Так как напряжение на выходе батареи определяется ее остаточной емкостью [5], то значение поправочного коэффициента δ_i выбирается пропорционально ошибке определения указанного напряжения:

$$\delta_i = k(U_{и} - U_{м}), \quad (2)$$

где k – нормирующий множитель (способ определения которого будет рассмотрен ниже); $U_{и}$ – измеренное напряжение аккумуляторной батареи; $U_{м}$ – значение напряжения батареи, вычисленное по эталонной модели.

Для наглядности схема процесса коррекции показаний счетчика ампер-часов показана на рис. 1.

Исходя из обзора эмпирических моделей литий-ионных аккумуляторных батарей [6; 7], предлагается выбрать модель Тевенина, которая при относительной простоте реализации учитывает динамические параметры аккумулятора.

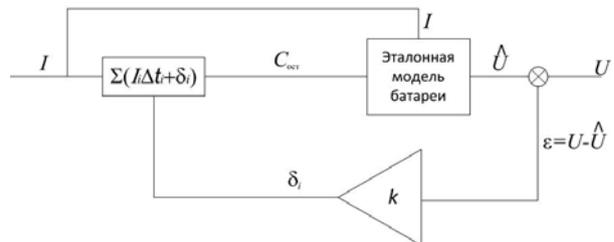


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс коррекции показаний счетчика ампер-часов

Модель выходного напряжения $U_{м}$ аккумуляторной батареи при заданном значении остаточной емкости $C_{ост}$ выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dU_{Th}}{dt_i} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_i}{C_{Th}}; \\ U_{м} = U_{oc} - U_{Th} - I_i R_0, \end{cases} \quad (3)$$

где U_{Th} – падение напряжения, зависящее от химических процессов в аккумуляторе, В; R_{Th} – эквивалентное сопротивление поляризации, Ом; C_{Th} – эквивалентная емкость (определяется динамическими параметрами аккумулятора), Ф; U_{oc} – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора, В; R_0 – постоянное сопротивление, зависящее от его конструкции, Ом.

При этом значения параметров R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} являются функциями от остаточной емкости аккумулятора

и могут быть определены экспериментально в любой точке разрядной характеристики [6]. Очевидно, что количество таких точек будет конечно, поэтому для нормальной работы алгоритма необходимо интерполировать значения параметров R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} на промежуточных интервалах разрядной характеристики аккумулятора.

Существует несколько способов построения интерполяционной функции между заданными точками. Интерполяция полиномом с применением кубического сплайна является предпочтительной, так как она позволяет получить форму кривой на интервалах, наиболее точно соответствующую исходной характеристике при незначительных аппаратных затратах.

Каждая точка в пространстве параметров, в которой экспериментальным образом установлены значения выбранных параметров, называется узлом сплайна. На интервалах между двумя узлами $[C_{ост\ i-1}, C_{ост\ i}]$ значения параметров вычисляются по следующим формулам [8]:

$$\begin{cases} C_{Th_i}(C_{ост}) = a_{c_i} + b_{c_i}(C_{ост} - C_{ост_i}) + \\ + \frac{c_{c_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост_i})^2 + \frac{d_{c_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост_i})^3; \\ R_{Th_i}(C_{ост}) = a_{R_i} + b_{R_i}(C_{ост} - C_{ост_i}) + \\ + \frac{c_{R_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост_i})^2 + \frac{d_{R_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост_i})^3; \\ U_{oc_i}(C_{ост}) = a_{U_i} + b_{U_i}(C_{ост} - C_{ост_i}) + \\ + \frac{c_{U_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост_i})^2 + \frac{d_{U_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост_i})^3, \end{cases} \quad (4)$$

где a , b , c , d – коэффициенты сплайна.

В результате получаем семейство сплайнов для описания зависимостей R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} в функции от значений остаточной емкости $C_{ост}$.

Так как начальный и конечный участки разрядной характеристики с экспоненциальной зависимостью параметров модели от остаточной емкости занимают около 20 % емкости батареи [5], то для построения сплайна в пространстве параметров U_{oc} , R_{Th} , C_{Th} целесообразно иметь не менее 20 узлов. При достаточно большом количестве узлов можно использовать равномерную сетку для расчета коэффициентов сплайна [8].

Следует отметить, что значения параметров R_{Th} , C_{Th} модели для заряда и разряда аккумулятора будут отличаться при известном значении $C_{ост}$, поэтому для их описания потребуется, как минимум, два семейства сплайнов.

В качестве имитационной модели реального аккумулятора используется стандартная модель в среде моделирования Simulink, параметры которой соответствуют литий-ионному аккумулятору ЛИГП-10 (ОАО «Ригель», г. Санкт-Петербург). Параметры эталонной модели Тевенина для подстройки счетчика ампер-часов определены для того же аккумулятора.

Нормировочный коэффициент k определяется экспериментально и для данного класса аккумуляторов

находится в пределах 0,0001–0,001. Выбор оптимального значения коэффициента k в рамках данного диапазона обеспечивает подстройку модели за приемлемое время и уменьшает перерегулирование.

Сравним три варианта организации счетчика ампер-часов: один с подстройкой по эталонной модели Тевенина, другой – без такой подстройки и образцовый, связанный со встроенной моделью. Показания счетчиков с подстройкой по эталонной модели и без подстройки были смещены на 3 А·ч (35 % для данного аккумулятора) для имитации накопленной ошибки. В процессе моделирования попеременного заряда и разряда аккумулятора (изменения тока от 5 А на разряде до 2 А на заряде) выполнялась оценка остаточной емкости аккумулятора (рис. 2).

В результате моделирования установлено, что подстройка счетчика ампер-часов по эталонной модели позволяет уменьшить ошибку оценивания остаточной емкости с 3 А·ч (35 %) до 0,5 А·ч (6 %).

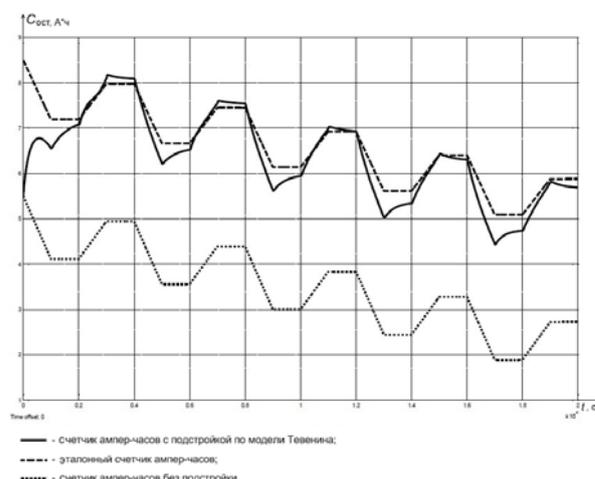


Рис. 2. Сравнение работы трех счетчиков ампер-часов

Расчет необходимых вычислительных ресурсов микроконтроллера для реализации данного метода подстройки показывает, что при использовании микроконтроллера типа Intel 8051 потребуется около 200 байт ПЗУ (в основном для хранения коэффициентов кубических сплайнов) и около 32 байт ОЗУ. Время одной итерации алгоритма составит приблизительно 900 мкс.

Рассмотренный способ подстройки счетчика ампер-часов позволяет вычислить значение остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации без заряда до максимальной емкости и не требует существенных программных ресурсов. Дальнейшим развитием данного метода является учет изменения параметров батареи при изменении температуры и деградации ее элементов.

Библиографические ссылки

1. Application note 131. Lithium-Ion Cell Fuel Gauging with Maxim Battery Monitor ICs. URL: <http://www.maximintegrated.com/design/techdocs/appnot>

es/index.mvp/id/5/c/Battery%20Management#c5 (дата обращения: 09.10.2013).

2. Chang W. Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery : A Review. Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics. 2013. Article ID 953792. 7 p.

3. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. A. J. Salkind [et al.] // J. of Power Sources. 1999. Vol. 80, № 1–2. P. 293–300.

4. Shifei Y., Hongjie W., Chengliang Y. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model // Energies. 2013. № 6. P. 444–470.

5. Таганова А. А. Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации. СПб. : Химиздат, 2005.

6. Hongwen H., Rui X., Jinxin F. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // Energies. 2011. № 4. P. 582–598.

7. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). 2012. № 7b. P. 152–156.

8. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М. : Мир, 2001.

References

1. Application note 131. Lithium-Ion Cell Fuel Gauging with Maxim Battery Monitor ICs. Available at :

<http://www.maximintegrated.com/design/techdocs/app-notes/index.mvp/id/5/c/Battery%20Management#c5>.

2. Chang W. Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics, 2013, Article ID 953792.

3. Salkind A. J., Fennie C., Singh P., Atwater T., Reisner D. E. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology, *Journal of Power Sources*, vol. 80, no. 1–2, p. 293–300, 1999.

4. Shifei Y., Hongjie W. and Chengliang Y. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model. *Energies*, 2013, 6, p. 444–470

5. Таганова А. А. *Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации* (Sealed chemical power sources. Batteries, equipment for tests and exploitation). St. Petersburg, Himizdat, 2005.

6. Hongwen H., Rui X., Jinxin F. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. 2011, № 4, p. 582–598.

7. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012, № 7b, p. 152–156.

8. Rogers D., Adams D. *Математические основы машинной графики* (Mathematical basis of computer graphics). Moscow, Mir Publ., 2001.

© Хандорин М. М., Букреев В. Г., 2014

УДК 523.64: 52-33

ДРУГОЙ СЦЕНАРИЙ ТУНГУССКИХ СОБЫТИЙ 1908 ГОДА

В. В. Шайдуров

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44.
E-mail: shaidurov04@mail.ru

Излагается сценарий многочисленных событий 30 июня 1908 года, обычно называемых тунгусской катастрофой и относящихся ко взрыву космического тела в земной атмосфере. Этот сценарий не совпадает с наиболее распространенной версией событий, но может объяснить разнообразный круг явлений, произошедших на огромной территории от Западной Европы до Восточной Сибири. Его обоснование опирается на фактический материал, собранный и классифицированный на протяжении десятилетий самоотверженными исследователями тунгусских событий. В статье изложена только схема обоснования, опирающаяся на физические явления, известные из университетских учебников. Более подробное изложение и верификация каждого эффекта будут проведены в последующих статьях путем детального сравнения с накопленным за десятилетия фактическим материалом.

Ключевые слова: Тунгусский метеорит, кометные осколки, ионизация, сила Лоренца, разделение ионов, диссоциация молекул, дипольные образования.