

УДК 541.136:519.876.5

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЁМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

М. М. Хандорин, В. Г. Букреев¹ ✉

ОАО «Научно-производственный центр «Полюс»
634050, Россия, Томск, пр. Кирова, 56в

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

✉ E-mail: polus@online.tomsk.net, bukreev@tpu.ru

Поступила в редакцию 30.07.14 г.

Предложены алгоритмы оценки остаточной и полной ёмкости литий-ионного аккумулятора на основе модели Тевенина. Рассмотрен вариант определения параметров модели с применением сплайн-интерполяции дискретных экспериментальных данных. Выполнен анализ возможности реализации предложенных алгоритмов в приложениях реального времени на микроконтроллере.

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

LITHIUM-ION BATTERY CAPACITY ESTIMATION AT THE REAL-TIME

М. М. Khandorin, V. G. Bukreev¹ ✉

Joint Stock Company «Research and Production Center «Polus»,
56 v, Kirov ave., Tomsk, 634050, Russia

¹National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia

✉ E-mail: polus@online.tomsk.net, bukreev@tpu.ru

Received 30.07.14

At this paper algorithms of accessible and full capacity estimation are presented. The model discrete parameter interpolation, based on spline function is shown. Presented algorithms are analyzed for use in real-time applications.

Key words: lithium-ion battery, integrating ampere-hour counter, Thevenin model, spline-interpolation, microcontroller, Matlab, Simulink.

ВВЕДЕНИЕ

Важной характеристикой литий-ионного аккумулятора (ЛИА) является его остаточная ёмкость, для определения которой часто используется программная или аппаратная реализация счётчика ампер-часов [1]. Как правило, алгоритм работы такого счётчика включает установку начального значения остаточной ёмкости при условии достижения полной заряженности и фиксированного напряжения аккумулятора. При этом предполагается, что первоначально аккумулятор имеет остаточную ёмкость, указанную в технической документации, и один из алгоритмов определения полной ёмкости аккумулятора использует момент его полного разряда [2].

Несмотря на то что программная реализация счётчика ампер-часов не требует значительных вы-

числительных ресурсов, при его эксплуатации в составе измерительной системы оценки состояния аккумулятора выявлен ряд существенных недостатков. Во-первых, аккумулятор не всегда заряжается до максимального значения напряжения, что обуславливает невозможность определения момента начальной установки счётчика ампер-часов и, как следствие, накопление ошибки. Во-вторых, счётчик ампер-часов не учитывает часть ёмкости, которую теряет ЛИА в составе батареи из-за саморазряда при хранении и вследствие протекания балансирующих токов аккумуляторов. Те же недостатки проявляются и при использовании счётчика ампер-часов для оценки полной ёмкости ЛИА. Кроме того, остаточная ёмкость аккумулятора экспоненциально зависит от тока нагрузки согласно закону Пеккерта [1]. Невозможность точного учёта этого эффекта приводит к значительным ошибкам определения остаточ-

ной ёмкости, особенно при больших токах разряда аккумулятора.

Определение ёмкости аккумулятора с помощью счётчика ампер-часов используется для лабораторных испытаний ЛИА, а для работы в составе систем электропитания космических аппаратов чаще применяются другие методы, основанные на математических моделях аккумулятора (например, фильтр Калмана, структуры на основе нечёткой логики и нейронных сетей) и обладающие гораздо большей точностью [1, 2].

Однако сдерживающим фактором применения таких методов для систем измерения остаточной ёмкости аккумулятора в реальном времени является необходимость значительных вычислительных ресурсов [1, 3].

Исходя из этого предлагается вычислительный алгоритм, позволяющий на основе степени заряженности ЛИА оценить в реальном времени остаточную и полную ёмкость аккумулятора. Данный алгоритм также исключает недостатки, присущие классическому определению этих параметров с использованием счётчика ампер-часов.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Поведение ЛИА на малом отрезке времени достаточно адекватно описывается математической моделью Тевенина [3, 4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_n(t) = -\frac{U_n(t)}{R_n C_n} + \frac{1}{C_n} i_{\text{ЛИА}}(t); \\ U_{\text{ЛИА}}(t) = E_0 - U_n(t) - R_0 i_{\text{ЛИА}}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $U_n(t)$ – поляризационное напряжение ЛИА; R_n , C_n , E_0 , R_0 – поляризационное сопротивление, поляризационная ёмкость, ЭДС, активное сопротивление соответственно; $i_{\text{ЛИА}}(t)$ – ток разряда-заряда аккумулятора; $U_{\text{ЛИА}}(t)$ – напряжение на выходе аккумулятора.

Малый отрезок времени используется для того, чтобы пренебречь влиянием степени заряженности на параметры модели (1). При описании работы аккумулятора на больших интервалах времени необходимо учитывать функциональные зависимости параметров $E_0(SOC)$, $R_0(SOC)$, $R_n(SOC)$, $C_n(SOC)$ от степени заряженности SOC аккумулятора [3, 4]. Эти функции могут быть экспериментально определены в дискретных точках разрядной характеристики с промежуточной интерполяцией значений [2, 4]. Иногда [1, 4] для этой цели применяется кусочно-линейная аппроксимация, однако для уменьшения объёма экспериментальных данных це-

лесообразно интерполировать дискретные значения $E_{0i}(SOC_i)$, $R_{0i}(SOC_i)$, $R_{ni}(SOC_i)$, $C_{ni}(SOC_i)$ кубическим сплайном. На каждом интервале между двумя интерполяционными узлами $[SOC_{i-1}, SOC_i]$ промежуточные значения параметров вычисляются по формулам [5]:

$$\begin{cases} C_{ni}(SOC) = a_{c_i} + b_{c_i}(SOC) + \frac{c_{c_i}}{2}(SOC)^2 + \frac{d_{c_i}}{6}(SOC)^3; \\ R_{ni}(SOC) = a_{R_i} + b_{R_i}(SOC) + \frac{c_{R_i}}{2}(SOC)^2 + \frac{d_{R_i}}{6}(SOC)^3; \\ E_{0i}(SOC) = a_{E_i} + b_{E_i}(SOC) + \frac{c_{E_i}}{2}(SOC)^2 + \frac{d_{E_i}}{6}(SOC)^3; \\ R_{0i}(SOC) = a_{R_{0i}} + b_{R_{0i}}(SOC) + \frac{c_{R_{0i}}}{2}(SOC)^2 + \frac{d_{R_{0i}}}{6}(SOC)^3, \end{cases} \quad (2)$$

где a_{c_i} , b_{c_i} , c_{c_i} , d_{c_i} , $a_{R_{0i}}$, $b_{R_{0i}}$, $c_{R_{0i}}$, $d_{R_{0i}}$, a_{E_i} , b_{E_i} , c_{E_i} , d_{E_i} – коэффициенты сплайна, определяемые предварительно в диапазоне изменения характеристик или в режиме реального времени.

Таким образом, для описания функций $E_0(SOC)$, $R_0(SOC)$, $R_n(SOC)$, $C_n(SOC)$ получаем семейство сплайнов, определяемых степенью заряженности SOC . Вычисление значений параметров по дифференцируемой сплайн-функции позволяет более точно решить дифференциальное уравнение (1).

Так как начальный и конечный участки разрядной характеристики с экспоненциальной зависимостью параметров модели от остаточной ёмкости занимают около 20% ёмкости аккумулятора [6], то для обеспечения адекватности модели (1) параметры $E_{0i}(SOC_i)$, $R_{0i}(SOC_i)$, $R_{ni}(SOC_i)$, $C_{ni}(SOC_i)$ определяются не менее чем в 20 опорных точках. Такое количество экспериментальных данных позволяет применить равномерную сетку дискретных значений SOC_i при расчёте коэффициентов сплайна, обеспечивающих необходимую точность определения параметров аккумулятора [6]. Следует отметить, что значения параметров $R_n(SOC)$, $C_n(SOC)$ в модели Тевенина для разряда и заряда аккумулятора будут отличаться при одинаковых значениях SOC , поэтому их описание будет требовать, как минимум, двух семейств сплайнов.

Для имитационного моделирования переходной характеристики аккумулятора формируется импульс тока $i_{\text{ЛИА}}(t)$ разряда (нагрузки), а затем равный по значению импульс тока заряда. Далее измеряются значения напряжения $U_{\text{ЛИА}}(t)$, которые используются для определения параметров модели Тевенина.

Расчёт напряжения $U_{\text{ЛИА}}(t)$ аккумулятора производится путём решения системы уравнений (1) ме-

тодом Рунге–Кутта. Обозначив результат этих вычислений функцией $F_{rk}(R_{п}, C_{п}, E_0, R_0, I_{ЛИА_i}, t_i)$, запишем среднеквадратическое отклонение:

$$r = \sum_i^n (U_{ЛИА_i} - F_{rk}(R_{п}, C_{п}, E_0, R_0, I_{ЛИА_i}, t_i))^2, \quad (3)$$

где $U_{ЛИА_i}$ – значение напряжения аккумулятора в дискретных точках.

Определение значений параметров модели в конечном итоге сводится к оптимизации многомерной функции суммы квадратов отклонений. Для оптимизации многомерной функции, включающей изменяемые параметры модели аккумулятора, целесообразно использовать алгоритм координатного спуска (рис. 1) [7].

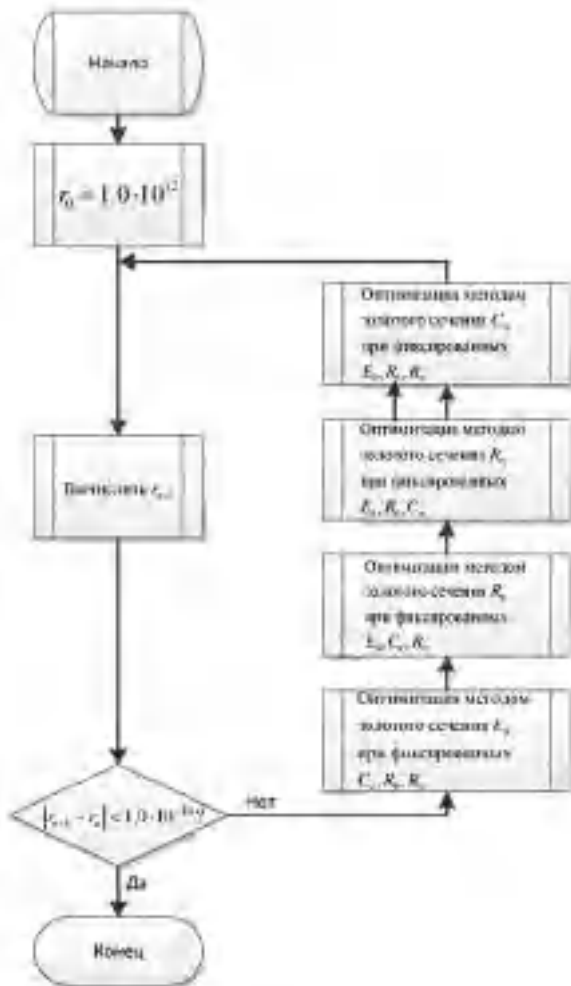


Рис. 1. Алгоритм определения параметров модели Тевенина

Алгоритм реализует подбор параметров модели за несколько итераций, каждая из которых состоит из четырёх этапов. На каждом из них последовательно оптимизируется один из параметров – $E_0, R_0,$

$C_{п}, R_{п}$, при этом остальные параметры фиксируются.

Алгоритм подстройки параметров модели Тевенина под экспериментальный аккумулятор предполагает остановку при уменьшении темпа сокращения среднеквадратической ошибки. Как только изменение среднеквадратической ошибки между следующей итерацией r_{n+1} и текущей r_n оказывается меньше порогового значения, равного $1 \cdot 10^{-10}$, то вычислительный процесс завершается. В результате моделирования в среде Matlab Simulink установлено, что такая процедура позволяет достичь суммарной среднеквадратической ошибки $r < 0.1$ (при использовании встроенной модели ЛИА в среде Matlab для имитации реальной батареи).

Функция (3) может иметь несколько экстремумов, и для сходимости алгоритма к области глобального минимума необходимо определить направление поиска, которое обеспечит его нахождение с приемлемой точностью. Для ускорения оптимизации предлагается использовать значения координат предыдущего интерполяционного узла в качестве начальной точки поиска.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАРЯЖЕННОСТИ ЛИА

Модель Тевенина достаточно адекватно описывает процессы в ЛИА только для некоторого известного значения степени заряженности, и очевидно, что по мере протекания разрядно-зарядного тока степень заряженности аккумулятора будет изменяться. Данные изменения будут приводить к появлению разности $\varepsilon(t)$ между напряжением $U_{ЛИА}(t)$ на выходе аккумулятора и оценкой $\widehat{U}_{ЛИА}(t)$ этого напряжения по модели Тевенина:

$$\varepsilon(t) = U_{ЛИА}(t) - \widehat{U}_{ЛИА}(t). \quad (4)$$

Так как напряжение на выходе аккумулятора $U_{ЛИА}(t)$ будет связано со степенью заряженности SOC через параметры модели Тевенина, соотношение (4) можно использовать для их определения.

Введём поправочный коэффициент для коррекции степени заряженности ЛИА по мере накопления ошибки по напряжению. Таким образом, степень заряженности в любой момент времени будет описываться соотношением

$$\widehat{SOC}_i = \widehat{SOC}_0 + \sum_{j=0}^i \delta_j(\varepsilon), \quad (5)$$

где \widehat{SOC}_0 – начальная степень заряженности, $\delta_j(\varepsilon)$ – поправочный коэффициент в предыдущие моменты времени.

Если степень заряженности \widehat{SOC} в модели ЛИА не превышает реальную SOC , т. е. $\widehat{SOC} < SOC$, то ошибка принимает отрицательное значение: $\varepsilon(t) < 0$, при $\widehat{SOC} > SOC$ имеем положительное значение: $\varepsilon(t) > 0$. Таким образом, используя поправочный коэффициент $\delta(\varepsilon)$ при вычислении значений \widehat{SOC} , можно получить примерное равенство: $\widehat{SOC} \approx SOC$. Примем пропорциональную зависимость между поправочным коэффициентом и ошибкой по напряжению $U_{\text{ЛИА}}(t)$ аккумулятора:

$$\delta(\varepsilon) = k\varepsilon(t), \quad (6)$$

где k – нормировочный множитель.

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЁМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА

Для оценки остаточной ёмкости ЛИА $Q_{\text{ост}}$ необходимо знать его полную ёмкость Q_{max} и степень заряженности. При этом остаточная ёмкость может быть вычислена по уравнению

$$Q_{\text{ост}} = Q_{\text{max}} SOC. \quad (7)$$

Полная ёмкость ЛИА, как правило, известна в начальный момент его использования и по мере эксплуатации будет снижаться. В реальной системе электропитания происходят неполные циклы разряда-заряда аккумулятора, поэтому построение алгоритма определения полной ёмкости при частичном заряде и разряде представляет собой важную задачу. Так, алгоритм Impedance Track [8] позволяет определить полную ёмкость ЛИА по линейному участку разрядной характеристики. Исходными данными для работы этого алгоритма является график зависимости степени заряженности аккумулятора SOC от напряжения E_0 без нагрузки. Используя эту характеристику, можно вычислить SOC следующим образом.

Предположим, что в некоторый начальный момент времени известны значение ёмкости Q_1 и соответствующая ей степень заряженности SOC_1 . Далее при разряде аккумулятора счётчик ампер-часов подсчитывает изменение ёмкости аккумулятора ($Q_1 - Q_2$) на интервале времени ($t_2 - t_1$). Уменьшение остаточной ёмкости ЛИА приведёт к снижению степени заряженности до значения SOC_2 . Предполагая линейность характеристик ЛИА на интервале ($t_2 - t_1$), полную электрохимическую ёмкость аккумулятора можно определить по выражению

$$Q_{\text{max}} = \frac{(Q_1 - Q_2)}{(SOC_1 - SOC_2)}. \quad (8)$$

Наибольшая точность вычисления Q_{max} будет обеспечиваться на линейном участке разрядной харак-

теристики при изменении относительных значений SOC в пределах от 0.6 до 0.4.

Таким образом, объединяя модель Тевенина, алгоритмы определения степени заряженности и полной ёмкости ЛИА, можно вычислить остаточную ёмкость аккумулятора (рис. 2).

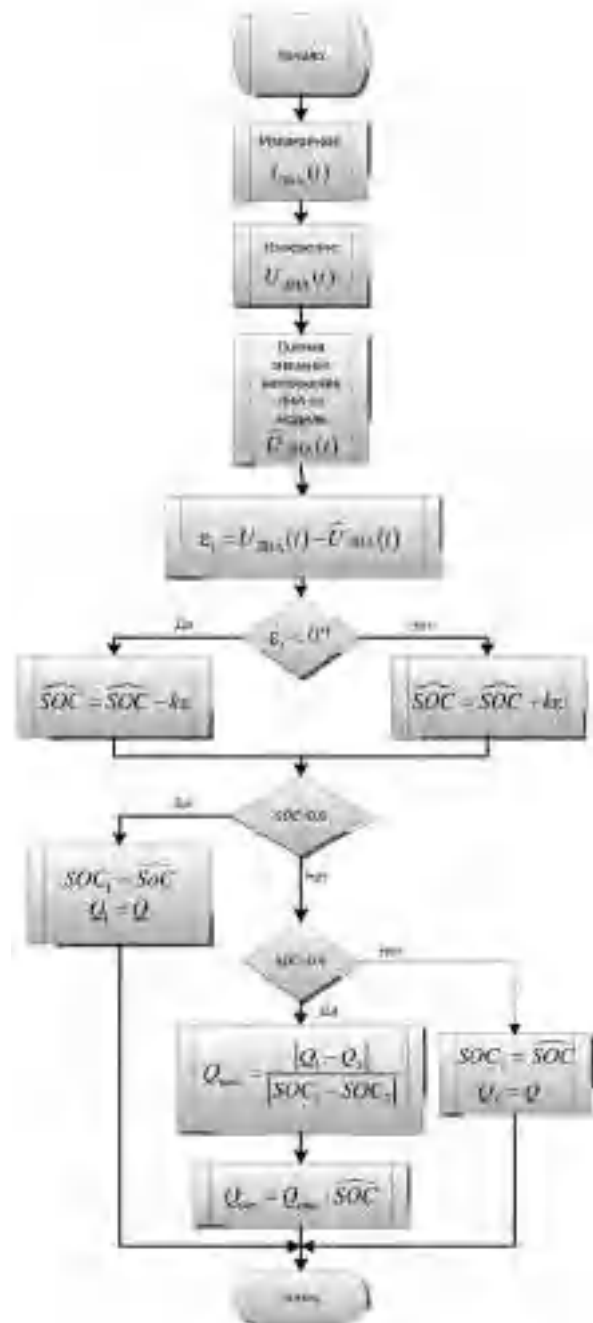


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки остаточной ёмкости ЛИА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТРОЕННЫХ АЛГОРИТМОВ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Для проверки работоспособности алгоритма оценки остаточной ёмкости было проведено ими-

тационное моделирование в среде Matlab Simulink, где в качестве эквивалента реального аккумулятора использовалась модель батареи ЛИГП-10 ТУ 3482–063–20503890–2006. Параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры модели батареи ЛИГП-10

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Номинальное напряжение, В | 3.6 |
| Полная ёмкость, А·ч | 10 |
| Максимальная ёмкость, А·ч | 10.35 |
| Напряжение при полном заряде, В | 3.9 |
| Номинальный ток разряда, А | 2 |
| Внутренне сопротивление, Ом | 0.02 |
| Ёмкость при номинальном напряжении, А·ч | 4.5 |
| Граница экспоненциальной зоны по напряжению, В | 3.8 |
| Граница экспоненциальной зоны по ёмкости, А·ч | 0.5 |

Вычислительный алгоритм решения дифференциальных уравнений для модели Тевенина выполнен на стандартных элементах среды Matlab, прочие алгоритмы моделировались логическими блоками. Параметры модели определялись на основе экспериментальных данных при помощи специальной программы, реализующей оптимизационный алгоритм координатного спуска. Значения этих параметров при различной степени заряженности ЛИА приведены в табл. 2.

Первый численный эксперимент был поставлен для проверки адекватности оценки значений степени заряженности ЛИА при различных начальных условиях SOC_0 (рис. 3).

В результате исследований установлено, что алгоритм обеспечивает погрешность определения SOC на приемлемом уровне, при этом точность практически не зависит от начальных условий.

Для проверки алгоритма оценки полной ёмкости аккумулятора на основе изменения степени заряженности и показаний счётчика ампер-часов была построена его логическая модель в среде Matlab Simulink. При этом используется имитационная модель аккумулятора и модель Тевенина из предыдущего численного эксперимента.

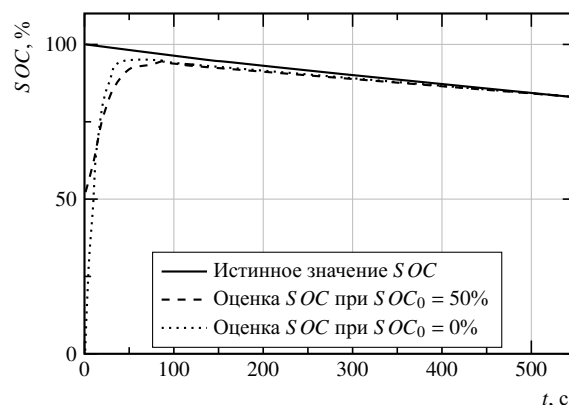


Рис. 3. Определение степени заряженности ЛИА

На рис. 4 представлен график работы алгоритма при определении значения полной ёмкости ЛИА, реальное значение которой равно 10.35 А·ч.

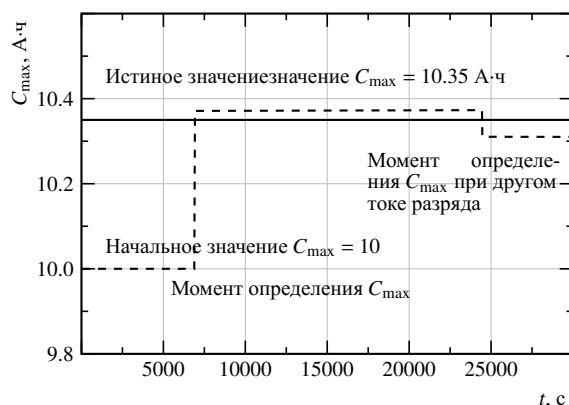


Рис. 4. Определение значения полной ёмкости ЛИА

Таблица 2

Значения параметров модели Тевенина

| SOC | E_0 , В | R_0 , Ом | Зарядное сопротивление R_{th} , Ом | Разрядное сопротивление R_{th} , Ом | Зарядная ёмкость C_{th} , Ф | Разрядная ёмкость C_{th} , Ф |
|-------|-----------|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 0.2 | 2.96227 | 0.01216 | 0.03414 | 0.12636 | 344.81133 | 94.77973 |
| 0.3 | 3.35284 | 0.01480 | 0.03390 | 0.08289 | 327.88814 | 139.40513 |
| 0.4 | 3.54723 | 0.01560 | 0.03680 | 0.06201 | 291.63949 | 180.17834 |
| 0.5 | 3.66364 | 0.01577 | 0.04175 | 0.04985 | 251.40727 | 215.55111 |
| 0.6 | 3.74112 | 0.01572 | 0.04913 | 0.04189 | 211.68956 | 245.26821 |
| 0.7 | 3.79638 | 0.01545 | 0.06050 | 0.03635 | 172.10408 | 267.24373 |
| 0.8 | 3.83778 | 0.01489 | 0.07964 | 0.03247 | 131.81754 | 277.53342 |
| 0.9 | 3.86981 | 0.01348 | 0.11822 | 0.03011 | 89.88268 | 262.67406 |
| 1.0 | 3.93204 | 0.01000 | 0.23429 | 0.03085 | 47.65809 | 250.45772 |

В первый момент времени полная ёмкость будет равна произвольному начальному значению. Это продолжается до тех пор, пока аккумулятор не разрядится до 60% (до начала линейного участка), после начинается работа алгоритма определения C_{max} . К моменту достижения степени заряженности ЛИА 40% работа алгоритма завершается. При следующем определении C_{max} алгоритм может сформировать значение, отличающееся от предыдущего на 0.1–0.5 А·ч. Это связано с тем, что разрядная характеристика аккумулятора имеет небольшую нелинейность, следовательно, изменение тока разряда будет отражаться на результате.

С использованием имитационной модели в среде Matlab и модели Тевенина был проведён численный эксперимент для оценки точности алгоритма определения остаточной ёмкости, структура которого была построена из логических блоков среды Matlab. Входным сигналом для имитационной модели ЛИА является ток разряда или заряда, изменяющийся случайным образом один раз за 10 с. При этом оценка остаточной ёмкости аккумулятора обеспечивается с точностью не хуже 2.5% (рис. 5).

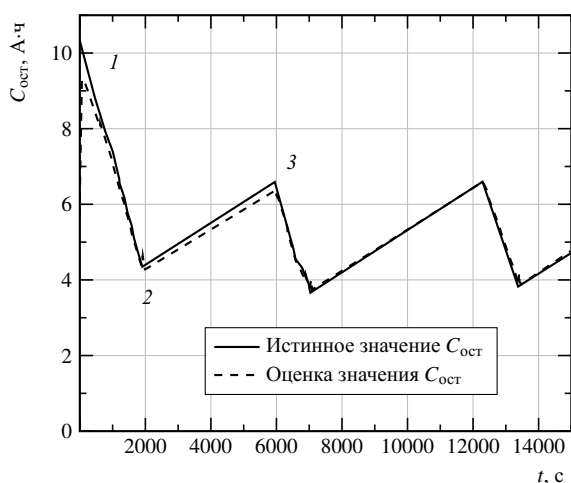


Рис. 5. Сравнение оценочного значения остаточной ёмкости ЛИА (сплошная линия) с действительным (штриховая линия)

В первоначальный момент времени работы алгоритма (примерно 500 с) погрешность весьма велика, так как выполняется приближение расчётного значения степени заряженности к действительному значению. Далее, до момента времени 6000 с, погрешность остаётся также значительной из-за неточного определения полной ёмкости аккумулятора. После завершения работы алгоритма определения полной ёмкости аккумулятора погрешность вычисления остаточной ёмкости сокращается до минимального значения и составляет примерно 2.5%.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Так как большинство микроконтроллеров обладает ограниченными вычислительными ресурсами, представляется важным вопрос об объёме памяти и процессорном времени, необходимых для выполнения алгоритма.

Объём памяти для хранения коэффициентов сплайнов при 16-битной разрядности каждого коэффициента определяется исходя из следующего: четыре коэффициента в каждом сплайне, четыре параметра модели Тевенина, десять узлов сплайна, два режима работы (разряд и заряд), что составляет 320 байт. Хранение промежуточных данных при решении дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты потребует 16 байт ОЗУ. С учётом необходимого резерва вычислительных алгоритмов ответственных микропроцессорных систем общий объём оперативной памяти не будет превышать 320 байт. Затраты процессорного времени для одной итерации алгоритма оценки остаточной ёмкости ЛИА и метода Рунге–Кутты на языке Си с использованием 16-разрядной целочисленной арифметики будут составлять 10 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работоспособность и эффективность предлагаемой методики оценки остаточной ёмкости ЛИА доказана путём численных экспериментов в среде Matlab Simulink на имитационной модели аккумулятора ЛИГП-10. Алгоритм позволяет оценивать степень заряженности ЛИА с погрешностью не более 2%, а остаточную ёмкость – не более 2.5%.

По сравнению с алгоритмом, основанным на фильтре Калмана [3], предложенный алгоритм требует значительно меньших вычислительных затрат, точность определения с его помощью степени заряженности ЛИА не зависит от задания начальных условий.

Кроме того, разработанный алгоритм позволяет оценивать полную электрохимическую ёмкость ЛИА в процессе эксплуатации, что открывает путь не только для предупреждения аварийных ситуаций, но и для управления ресурсом ЛИА.

Высокая точность и низкие требования к аппаратно-программным ресурсам микроконтроллера делают полученную методику оценки остаточной ёмкости ЛИА перспективной для внедрения в аппаратуре различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang W. Y. The state of charge estimating methods for battery // Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics. 2013. № 1. P. 1–7.
2. Ng K. S., Moo C. S., Chen Y. P., Hsieh Y. C. Enhanced Coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. // Applied Energy. 2009. Vol. 86, № 9. P. 1506–1511.
3. 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.
4. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. // Przegląd elektrotechniczny. 2012. № 7b. P. 152 – 156.
5. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.
6. Таганова А. А., Бубнов Ю. И., Орлов С. Б. Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации. СПб.: Химиздат, 2005.
7. Bunday B. D. Basis optimisation methods. London: Edward Arnold Publ., 1984.
8. Wen S. Impedance Track Gas Gauge for Novices // Texas Instruments Application Report [официальный сайт]. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slua375/slua375.pdf> (дата обращения 10.06.2014).

REFERENCES

1. Chang W. Y. The state of charge estimating methods for battery. Hindawi Publishing Corporation ISRN. *Applied Mathematics*. 2013, vol. 1, pp. 1–7.
2. Ng K. S., Moo C. S., Chen Y. P., Hsieh Y. C. Enhanced Coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*. 2009, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511.
3. 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, no. 4, pp. 582–598.
4. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd elektrotechniczny [Electrical Review]*. 2012, no. 7b, pp. 152 – 156.
5. Zavyalov Yu. S., Kvasov B. I., Miroshnichenko V. L. *Metody splyayn-funktsiy*. [Methods of spline functions]. Moscow, Nauka Publ., 1980 (in Russian).
6. Taganova A. A., Bubnov Yu. I., Orlov S. B. *Germetichnyye khimicheskiye istochniki toka. Elementy i akkumulyatory, oborudovaniye dlya ispytaniy i ekspluatatsii*. [Sealed power sources. Elements and battery testing equipment and operation]. S. Peterburg, Khimizdat Publ., 2005 (in Russian).
7. Bunday B.D. *Basis optimisation methods*. London. Edward Arnold Publ., 1984.
8. Wen S. Impedance Track Gas Gauge for Novices, Texas Instruments Application Report. Available at: <http://www.ti.com/lit/an/slua375/slua375.pdf> (accessed 10 June 2014).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хандорин Михаил Михайлович – инженер-конструктор, ОАО «НПЦ «Полус». Служебный телефон 8 (382–2) 55–46–94, e-mail: polus@online.tomsk.net

Букреев Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра «ЭПЭО». Служебный телефон +79138542196, e-mail: bukreev@tpu.ru