

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИТИЙ-ИОННОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ БУФЕРНЫХ СХЕМ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

К.т.н. О.Н. Замирец, Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г.Харьков

В данной статье представлена полная динамическая модель литий-ионной батареи для создания прототипов систем электроснабжения с буферной схемой обеспечения питания. Модель учитывает нелинейные равновесные потенциалы, токовую и температурную зависимости, тепловые эффекты и реакцию на переходные процессы.

В даній статті представлена повна динамічна модель літій-іонної батареї для створення прототипів систем електропостачання з буферною схемою забезпечення живлення. Модель враховує нелінійні рівноважні потенціали, струмову і температурну залежність, теплові ефекти і реакцію на перехідні процеси.

We present here a complete dynamic model of a lithium ion battery that is suitable for virtual-prototyping of portable battery-powered systems. The model accounts for nonlinear equilibrium potentials, rate- and temperature-dependencies, thermal effects and response to transient power demand.

Ключевые слова: динамическая модель, литий-ионная батарея, тепловая модель, переходные процессы.

Введение

Благодаря высокой плотности энергии и длительного срока службы литий-ионные и литий-полимерные батареи все чаще используются в портативной электронике, электрических транспортных средствах, космических и авиационных системах электропитания и стационарных аккумуляторах питания [1]. Оптимизация конструкции таких систем требует моделирования и оценки в вычислительной среде характеристик прототипов. Детализированные модели батарей, основанные на физике, были построены для изучения внутренней динамики этих батарей и как правило, не подходят для задач разработки комплексов и изделий на системном уровне [2]. С другой стороны, простые динамические модели, основанные на эквивалентных схемах «конденсатор / резистор», могут быть использованы при имитации построения схем, однако настолько упрощены, что они не обладают такими характеристиками, как нелинейный равновесный потенциал, емкость зависящая от скорости и температурного влияния. И хотя нелинейные явления могут быть включены в модели с коммутацией каналов, резко увеличивается сложность процесса моделирования.

Модель, представленная в данной статье, имеет промежуточный подход. С одной стороны, необходима высокая точность получения основных электрических и тепловых свойств батареи, а с другой стороны, исключаются детальные расчеты внутренних

электрохимических процессов. Модель построена на основе метода резистивных ассоциированных моделей [3], который предлагает систематическую обработку нелинейностей в модельных уравнениях и простое согласование с другими объектами при моделировании комплексных систем электроснабжения. Модель приспособлена и может быть адаптирована для представления новых разновидностей батарей и более широкого динамического диапазона внешних факторов.

Динамическая модель литий-ионных батарей описана с использованием схемы представления, математических уравнений и ее реализации в резистивно-ассоциируемом формате. В результате подтверждено, что важные особенности и параметры модели батареи, такие как нелинейный равновесный потенциал, токовая и температурная зависимости, тепловые характеристики и переходные процессы первого порядка, соответствуют экспериментальным результатам.

Формулировка модели

Цель исследования состоит в том, чтобы воспроизвести такие же электрические и тепловые свойства литий-ионной батареи для систем электроснабжения КА, как и при функционировании в реальных условиях окружающей среды. При этом аппроксимируем все электрохимические и электротермические процессы как одно целое по всей батарее и пренебрегаем пространственными вариациями концентраций, фазовых распределений и потенциалов. Эти предположения позволяют смоделировать батарею с помощью «объемных» параметров, полученных из экспериментальных данных.

Наиболее доступными данными, будь то данные из технических спецификаций производителей или независимых измерений, являются кривые напряжения на клеммах во время разряда постоянным током при постоянной температуре, либо напряжение после ступенчатого изменения тока.

Модель, соответствующая оговоренным выше данным, состоит из трех компонентов:

- 1) равновесный потенциал E ;
- 2) внутреннее сопротивление R_{int} двух компонентов R_1 и R_2 ;
- 3) эффективная емкость, которая характеризует переходной процесс заряда слоев в пористых электродах.

Электрическая эквивалентная схема этих компонентов показана на рис. 1. Математические соотношения, описывающие каждый элемент и их роль, будут приведены ниже.

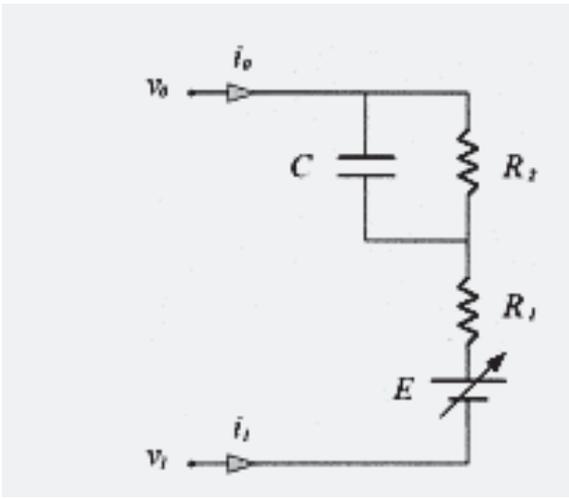


Рис. 1. Эквивалентное представление схемы литий-ионной батареи

Описание равновесного потенциала

Равновесный потенциал батареи (напряжение разомкнутой цепи), зависит от температуры и количества активного материала, имеющегося в электродах, и определяется через состояние разряда (SOD - state of discharge). Емкость разряда батареи зависит от скорости разряда и температуры. Таким образом, необходимо найти общее выражение для потенциала $E(i, T, t)$.

Для моделирования равновесного потенциала, на основе экспериментальных данных используется 4-шаговая процедура.

1. В качестве эталонной кривой берется типичная кривая напряжения батареи в зависимости от глубины разряда. Эталонная кривая может быть получена произвольно, но предлагается использовать кривую вблизи средне ожидаемого рабочего состояния, как правило, в 1-С или 0,5-С тока, чтобы получить самую высокую точность. Равновесный потенциал, в зависимости от состояния разряда, определяется путем исключения внутренних потенциальных потерь из-за омического ограничения, кинетического ограничения и концентрационно-имитационного сопротивления. На этой кривой использован многочлен n-го порядка.

2. В качестве опорного тока для эталонной кривой выбирается скорость разряда (т.е. тока). Зависимость состояния разряда от тока далее учитывается как токовый коэффициент $\alpha(i)$, который характеризует эталонную кривую.

3. Температура для эталонной кривой принимается эталонной. Зависимость состояния разряда от температуры учитывается в качестве температурного коэффициента $\beta(T)$.

4. На заключительном этапе, для компенсации изменения равновесного потенциала, индуцированного изменением температуры при опорном токе используется поправочный коэффициент потенциала $\Delta E(T)$. $\Delta E(T)$ равен нулю при опорной температуре.

Выражения для потенциала, напряжения на клеммах и состояния разряда, на основе приведенных выше описаний, может быть задано:

$$E[i(t), T(t), t] = v[i(t), T(t), t] - R_{int}i(t) \quad (1)$$

$$v[i(t), T(t), t] = \sum_{k=0}^n c_k \cdot SOD^k[i(t), T(t), t] + \Delta E(T) \quad (2)$$

$$SOD[i(t), T(t), t] = \frac{1}{Q_r} \int_0^t \alpha[i(t)] \cdot \beta[T(t)] \cdot i(t) dt \quad (3)$$

где c_k - коэффициент многочлена k-го порядка в полиномиальном представлении эталонной кривой и Q_r - емкость батареи, которое является граничным напряжением для эталонной кривой. Для $k=0$, $E=c_0$, - это напряжение разомкнутой цепи в начале разряда при расчетной температуре для эталонной кривой.

Метод определения токового коэффициента разрядной характеристики литий - ионной батареи 18650 приведен на рис. 2. Эталонная кривая (обозначенная квадратами), соответствующая экспериментальным данным при токе разряда 0,7А, описывает единичную разрядную емкость (по отношению к граничному напряжению 2,5 В). Полином, соответствующий эталонной кривой, показан пунктирной линией. Кривая, для которой необходимо определить коэффициент тока (представлена кружками) соответствует экспериментальным данным для скорости разряда 0,28А. Эта кривая имеет большую разрядную емкость, равную b.

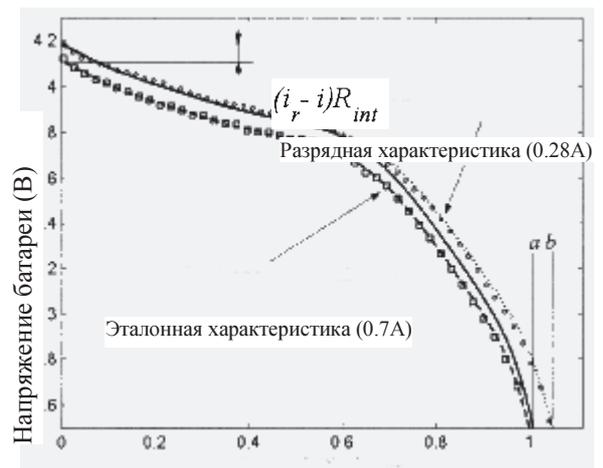


Рис. 2. Определение токового коэффициента

Сплошная линия, показанная на графике, получена путем удаления внутренних потерь из эталонной кривой (то есть, перемещение пунктирной кривой на расстояние, равное $R_{int}(i_r - i)$, где i_r - ток разряда эталонной кривой и i - ток, для которого определяется новый токовый коэффициент). Сплошная линия имеет разрядную емкость, равную a, которая в противном случае была бы равна 1, если разрядная емкость не зависит от тока. Коэффициенты тока варьируются от кривой к кривой и в общем случае определяются:

$$\alpha(i) = \frac{a}{b} \quad (4)$$

Для тока разряда 0,28А, мы определили, $a=1.005$ и $b=1.046$. Пунктирная линия, получена с учетом как внутренних потерь так и токового коэффициента и достаточно хорошо согласуется с данными измерений. Определение α для дополнительных токов разряда генерирует данные, отраженные на рис. 3.

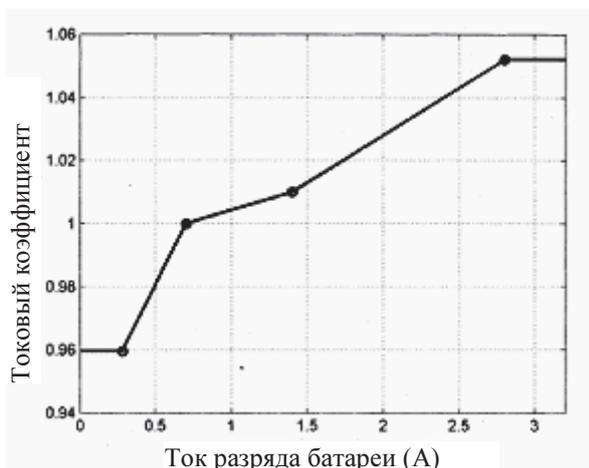


Рис. 3. Токовый коэффициент литий-ионной батареи (18650). Эталонный ток разряда 0.7 А соответствующий 0.5С.

Температурный коэффициент, а также температурно зависимые переменные потенциала можно найти по аналогичным процедурам, как это показано на рис. 4. В этом случае, данные соответствуют только одной скорости разряда (эталонная скорость 0,7 А), но определяются при различных постоянных (константах) температуры. Эталонная кривая при эталонной температуре (23°C) показана кружками и соответствующий полином показан сплошной линией. Кривая, для которой определяется температурный коэффициент обозначается квадратиками (- 10°C). Её разрядная емкость обозначается d . Пунктирная линия получена путем перемещения сплошной линии (эталонной кривой) вниз для достижения наилучшего совпадения с прямым участком кривой разряда. Расстояние перемещения определяется как поправочный член температуры $\Delta E(T)$. c – мощность разряда. Температурный фактор определяется в виде

$$\beta(i) = \frac{c}{d} \quad (5)$$

Для данных представленных на рис. 4, $\Delta E(T) = -0.32$ В, $c=0.949$, $d=0.883$, и $\beta = 1.075$ для кривой разряда - 10 ° С. Пунктирная линия, сгенерированная моделью, которая учитывает как температурный фактор так и поправку потенциала, имеет хорошее совпадение с экспериментальными данными (квадраты). Повторное построение дополнительных кривых дает температурные коэффициенты и поправочные члены, представленные на рис. 5 и 6.

Определение коэффициента тока $\alpha(i)$, коэффициента температуры $\beta(T)$ и поправочного коэффициента потенциала, зависящего от температуры, $\Delta E(T)$ являются достаточными для того, чтобы метод можно было использовать для моделирования различных типов батарей. Хотя $\alpha(i)$, $\beta(T)$ и $\Delta E(T)$ определяются по кривым постоянного тока при постоянной температуре, предлагается использовать эти три функции для общего случая, с изменяемым во времени током и температурой, как представлено в (1) - (3). В модели это достигается с помощью линейной интерполяции между значениями α , β и $\Delta E(T)$.

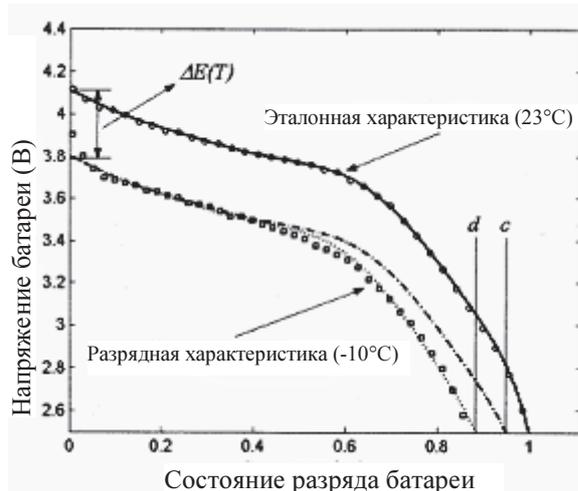


Рис. 4. Определение температурного коэффициента и поправочного члена потенциала.

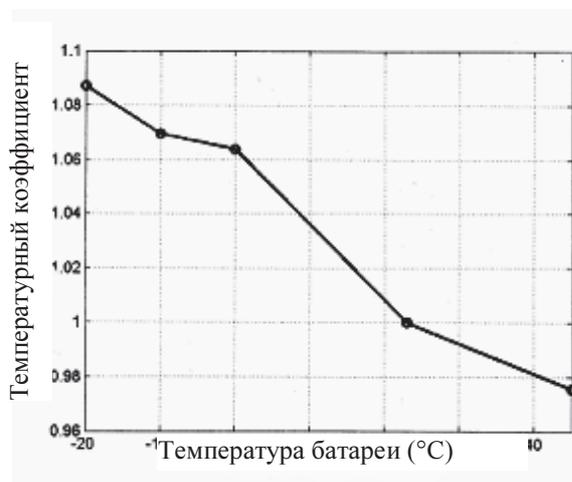


Рис. 5. Температурный коэффициент β для литий-ионной батареи 18650. Эталонная температура 23°C

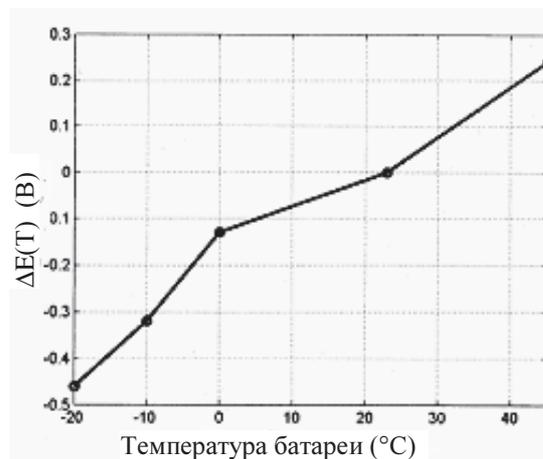


Рис. 6. Зависимость поправочного члена потенциала от температуры. Эталонная температура 23°C.

Следует отметить, что процесс зависимости скорости заряда батареи отличается от процесса разряда батареи. При этом постоянный коэффициент $\alpha=0.93$ для всех уровней тока соответствует данным заряда.

Описание потерь потенциала

Потери в батарее возникают прежде всего из-за омического сопротивления, конечных проводимостей электродов и сепараторов, градиентов концентрации ионных частиц вблизи электродов и ограниченных скоростей реакций (кинетика) на поверхности электродов [4]. Величина каждого компонента потерь зависит от конкретной химической структуры батареи, от конструктивных параметров, таких как геометрия, от пористой структуры и материалов электродов, электролитов, от температуры и скорости разряда. В данной модели для 18650 (или Panasonic CGR18650 или PolyStor PSC340 848-1200), в пределах заданных диапазонов достаточно объединить все потери вместе, и моделировать их с помощью эффективного сопротивления. Полное эффективное сопротивление может быть оценено по данным технических спецификаций производителей или полученным экспериментально. Разделим эффективное сопротивление на две части R_1 и R_2 . Нет необходимости исследовать условия возникновения этих сопротивлений, вместо этого необходимо сосредоточиться на представлении исследуемых характеристик батареи. В целом, подход двухрезисторного моделирования (R_1 и R_2) дает простую структурную схему, которая фиксирует основные характеристики производительности батареи. Отделение R_2 от общего сопротивления позволяет включать эффективную емкость в модели, для отображения воздействий переходных процессов.

Описание переходного процесса

Многие применения литий-ионных батарей представляют скачкообразные или импульсные нагрузки, для которых имеет важное значение переходной процесс. Применение батарей в буферной схеме электроснабжения связано с параллельными конфигурациями суперконденсаторов и батарей, в которых эффективная емкость батареи является определяющей. Емкостные эффекты возникают из двухслойного формирования в интерфейсе электрод/раствор [4], включающие в себя емкость электрической поляризации и емкость от диффузии ограниченных объемных зарядов (псевдо-емкости). И двухслойная емкость и диффузионная емкость (псевдо емкость) влияют на переходную характеристику батареи при высоких скоростях реакций. Таким образом, моделирование процессов производится с использованием одной смешанной емкости параллельно с сопротивлением R_2 . Дополнительные данные о переходных процессах могут быть описаны с помощью RC сети более высокого порядка, но для систем, рассматриваемых в нашей работе, смешанной емкости достаточно.

Доля полного сопротивления батареи R_2 и эффективной емкости C находятся путем сопоставления с измеренными данными переходных процессов батареи. Для 18650 и PolyStor PSC340 848-1200 батареи $R_2 = 40$ мОм, $C = 4$ F наилучшим образом соответствует экспериментальным данным. Общее внутреннее сопротивление составляет около 150 мОм.

Объединяя электрохимические характеристики, представленные в (1) - (3), с уравнениями для элементов схемы и схемы уравнений связи получим следующее дополнительное уравнение, связывающее клеммный потенциал к клеммному току

$$i(t) = \frac{1}{R_2} [v(t) - E[i(t), T(t), t] - R_1 i(t)] + C \frac{d}{dt} [v(t) - E[i(t), T(t), t] - R_1 i(t)] \quad (6)$$

Описание термических характеристик

Так как равновесный потенциал батареи зависит от температуры, температура должна быть учтена динамически, так чтобы была возможность расчета потенциала в течение каждого временного шага. Изменение температуры батареи учитывается за счет тепловой энергии баланса [5] и описывается

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 \cdot R_1 + \frac{1}{R_2} [v(t) - E[i(t), T(t), t] - i(t)R_1]^2 - h_c A [T(t) - T_a] \quad (7)$$

Условия тепловой энергии включают в себя резистивный нагрев и теплообмен с окружающей средой. Тепловыделение из-за изменения энтропии или изменения фазы, изменения в теплоемкости или всё перечисленное вместе было проигнорировано без явной потери точности модели.

Реализация метода резистивных ассоциированных моделей

Уравнения (1) - (3), (6) и (7) являются самосогласованным и полным описанием батареи. В этих уравнениях, напряжение батареи и температура являются "пересекающимися переменными", подчиняющимися ряду законов взаимодействия батареи с её электрическим и тепловым окружением, в то время как равновесный потенциал и состояние разряда являются внутренними переменными. Для построения резистивной ассоциированной модели, была проведена дискретизация приведенных выше уравнений после применения соответствующих численных алгоритмов [3], с получением выражения для сквозных переменных (тока на электрической клемме и потока мощности тепловой энергии на тепловой клемме).

Выводы.

Модель основана на данных приведенных в технических спецификациях производителей батарей. В качестве примера используется типопредставитель батарей 18650. Выходные данные модели совпадают с данными производителей и подтверждены экспериментальными результатами. Предложенная модель может быть модифицирована в соответствии с характеристиками для различных литий-ионных батарей и может быть расширена для широких динамических диапазонов температур и значений тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Безручко К.В. Научно-технические основы разработки, изготовления и эксплуатации систем электроснабжения космических аппаратов: монография [Текст] / К.В. Безручко, В.Н. Борцов, Н.В. Замирец, О.Н. Замирец и др. – Харьков: ХАИ, 2011 – 217 с.
2. Кедринский И.А. Li-ионные аккумуляторы / И.А. Кедринский, В.Г. Яковлев. – Красноярск: Платина, 2002. – 266 с.
3. Lightner M.R., Director S.W., Computer-aided design of electronic circuits, in: D.G. Fink, D. Christiansen (Eds.), Electronics Engineers' Handbook, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1989, Section 27.
4. J. S. Newman, Electrochemical Systems, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991
5. D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, "A general energy balance for battery systems," J. Electrochem. Soc., vol. 132, no. 1, pp. 5–12, 1985.