# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

EQUIVALENT DYNAMIC MODEL OF LITHIUM-ION BATTERIES

**УДК 621.355.9**

**Барсегян Карен Робертович,** бакалавр, Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Barsegyan Karen Robertovich**, Bachelor Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: karen.barsegyan-2001@bk.ru

## Аннотация

Из-за электрохимических свойств литий-ионные аккумуляторы очень нестабильны, опасны и требуют специальных мер по контролю заряда и температуры. Литий горит при тысячи градусов цельсия, его очень сложно потушить. Battery Management System (система контроля аккумуляторных батарей) позволяет избежать возгорания, перезеряда и переразряда сборки, состоящей из множества последовательно подключенных литий-ионных ячеек. При этом простая реализация BMS не может вычислять уровень заряда\разряда аккумулятора. Именно поэтому на основании физических и химический свойств литий-ионных ячеек была разработана эквивалентная модель. Написана программа для вычисления коэффициентов данной эквивалентной модели. Протестирована программа симуляции полученной эквивалентной модели. А так же проведено сравнение реальной ячейки и ее эквивалентной модели.

**Annotation**

Because of their electrochemical properties, lithium-ion batteries are very unstable, dangerous, and require special measures to control charge and temperature. Lithium burns at thousands of degrees Celsius and is very difficult to extinguish. The Battery Management System avoids ignition, overcharging and overdischarging of an assembly consisting of many lithium-ion cells connected in series. At the same time, a simple BMS implementation cannot calculate the charge/discharge level of the battery. That is why an equivalent model was developed based on the physical and chemical properties of lithium-ion cells. A program was written to calculate the coefficients of this equivalent model. The simulation program of the obtained equivalent model was tested. And also the comparison of a real cell and its equivalent model was carried out.

**Ключевые слова:** литий-ионная ячейка, система защиты, безопасность, аккумулятор, батарея, эквивалентная модель

**Keywords:** lithium-ion cell, protection system, safety, accumulator, battery, equivalent model

Литий-ионные аккумуляторы имеют ряд физических и химических свойств, из-за которых становится практически невозможно определить их уровень заряда, основываясь лишь на значении напряжения. В настоящее время в высоковольтных батареях Battery Management System используется только для балансировки, то есть выравнивания напряжения между более заряженными и менее заряженными ячейками. При этом BMS и, следовательно, конечный пользователь не обладает информацией об уровне заряда аккумуляторной батареи. Зависимость напряжения на аккумуляторе от уровня его заряда является нелинейной. В некоторых случаях одному уровню напряжения может соответствовать целый диапазон уровней заряда ячейки. На рисунке 1 показана зависимость  Open Circuit Voltage (напряжения на аккумуляторе) от State of

Charge (уровня заряда в процентах) для различных ячеек. Видно, что два нижних графика имеют полку примерно от 20% до 90% заряда.

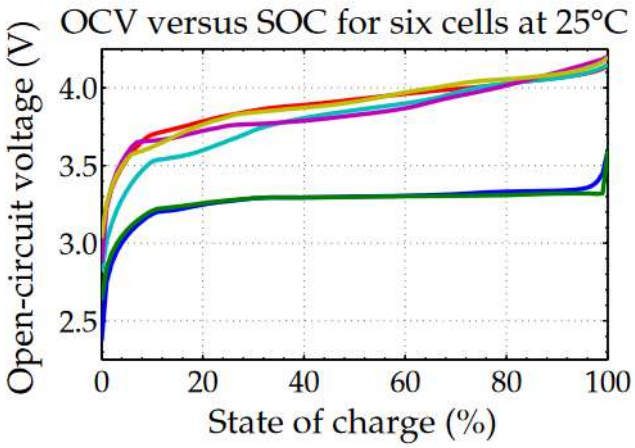



**Рисунок 1** – зависимость OCV от SOC

Для решения этой проблемы используется эквивалентная модель литий-ионной ячейки, позволяющая на основании лишь напряжения и тока, протекающего через аккумулятор в данный момент времени, определять все параметры батареи.

**Модель «Рэндлса».**

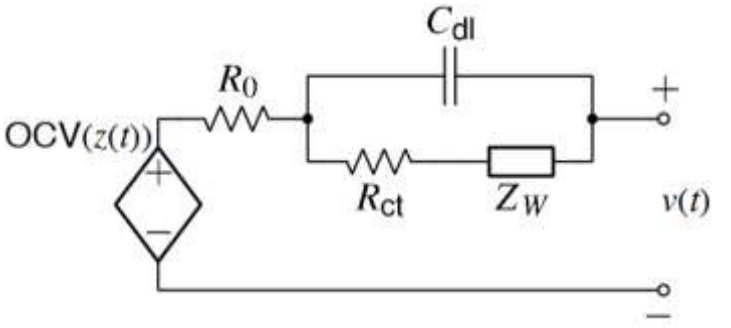



**Рисунок 2** – модель «Рэндлса»

В эквивалентной модели «Рендлса» (рисунок 2) учтены все основные явления, происходящие в литий-ионной ячейке [1]:

- $R_0$ моделирует сопротивление электролита
- $R_{ct}$ моделирует падение напряжения перехода электрод-электролит
- $C_{dl}$ моделирует накопления электронов в электролите на поверхности электрода

- $Z_w$ – импеданс Варбурга, моделирует дифузионные процессы

Зависимость амплитуды импеданса Варбурга от частоты описывается следующим уравнением:

$$Z_W = A_W / \sqrt{j\omega}, \quad (1)$$

где $A_w$ – амплитуда, ω - частота.

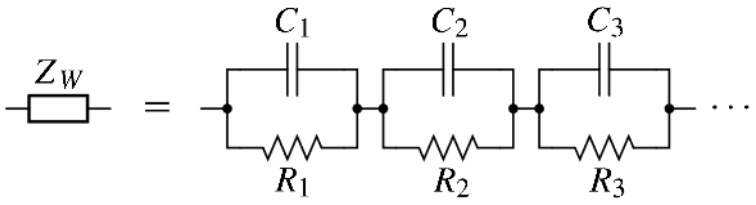



**Рисунок 3** – эквивалентная схема импеданса Варбурга

Промоделировать импеданс Варбурга можно бесконечным количеством последовательно соединеных RC цепочек. Но вычислить значения амплитуды дискретным методом в таком случае невозможно. Поэтому количество цепочек можно ограничить до двух – трех (рисунок 3). От их количества зависит точность моделирования и, соответственно, скорость вычисления. [2] Таким образом, эквивалентная модель, которая будет описываться программным кодом MatLab представлена на рисунке 4.

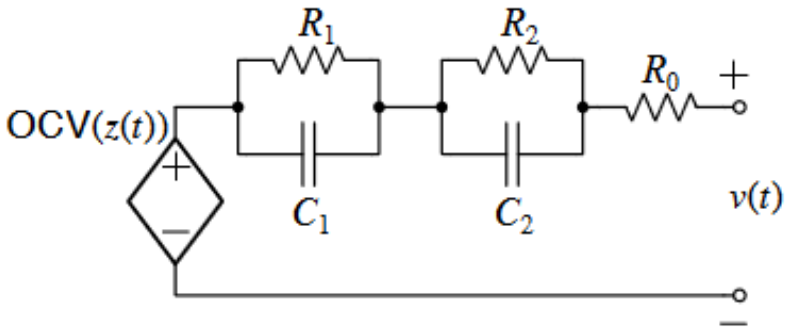



**Рисунок 4** – итоговая эквивалентная модель

Матрица, полностью описывающая состояние ячейки представлена ниже:

$$\begin{bmatrix} i_{R_1}[k+1] \\ i_{R_2}[k+1] \\ \vdots \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}\right) & 0 & \cdots \\ 0 & \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}\right) & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}}_{A_{RC}} \begin{bmatrix} i_{R_1}[k] \\ i_{R_2}[k] \\ \vdots \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \left(1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) \\ \left(1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_2 C_2}\right)\right) \\ \vdots \end{bmatrix}}_{B_{RC}} i[k] \quad , \quad (2)$$

где $i_{R_1}[k]$ – ток через резистор $R_1$,

$i[k]$ – ток через всю ячейку.

Или же в общем виде [3]:

$$i_R[k+1] = A_{RC} i_R[k] + B_{RC} i[k], \quad (3)$$

где $A_{RC}$ – диагональная матрица постоянных времени RC,

$B_{RC}$ – вектор постоянных времени RC.

## Тестирование литий-ионной ячейки

Для рассчета неизвестных коэффициентов, используемых в описанных формулах, необходимо получить некоторые данные о зарядке и разрядке реальной литий-ионной ячейки. Они должны быть получены в результате тестов, максимально приближенных к реальным условиям работы будущего устройства. Например, если мы проектируем аккумуляторную батарею для автомобиля, то зависимость нагрузки от времени в тестах должна быть соответствующей реальному передвижению автомобиля по городу. Причина этого заключается в том, что уравнения для описания работы аккумуляторной ячейки не совершенны. Они не идеально отражают свойства литий-ионной батареи. Поэтому процесс, используемый для того, чтобы модель соответствовала полученным в лаборатории данным как можно лучше, можно назвать динамической подгонкой. Таким образом, математическая модель ячейки, рассчитанная для конкретного устройства, будет точнее всего отражать состояние батареи при использовании ее именно в этом устройстве. На рисунке 5 показан график, построенный при тестах ячейки, используемой в электромобиле. Можно заметить, что направление тока часто меняется: батарея то разряжается, то заряжается. Этот тест отображает движение по городу с использованием рекуперации (торможение электродвигателем, при котором происходит зарядка аккумулятора). Автомобиль часто ускоряется и часто тормозит, соответсвенно направление тока постоянно меняется, а аккумуляторы постоянно заряжаются и разряжаются. [4]

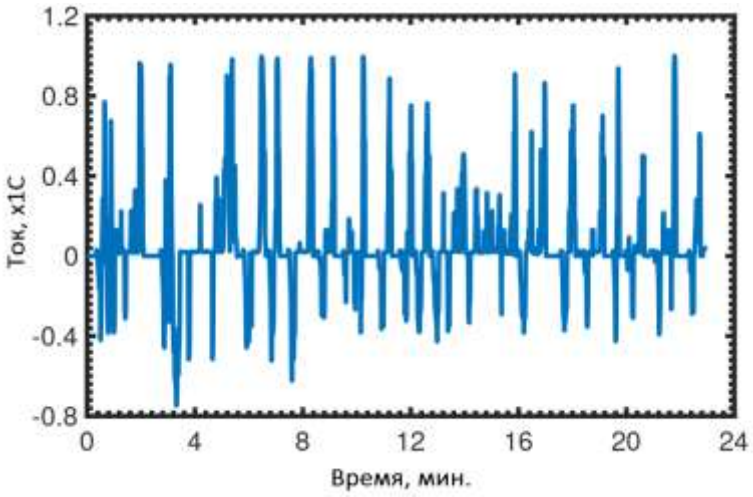



**Рисунок 5** – График завсисимости тока от времени в тестах для автомобилного применения

Описанные тесты производятся в термальной камере. В нее помещаетя ячейка, которая подключается к программируемой нагрузке и цифровому мультиметру(вольтметру). Напряжение измеряется 4х проводным методом Кельвина. Электроная нагрузка, мультиметр и сама термальная камера подключены к компьютеру, который задает нагрузке необходимый ток, камере требуемую температуру, а так же считывает данные с мультиметра. Благодаря этому есть возможность очень точно проводить довольно долгие тесты (больше 24 часов) при различных температурах и профилях применения аккумуляторной батареи.

**Оценка точности полученной модели**

Построим графики напряжения на клеммах аккумулятора. Один посчитан с помощью параметров эквивалентной модели (оранжевый), а другой получен в ходе тестов реальной ячейки (синий). На рисунке 6 изображены графики полного десяти часового теста, а на рисунке 7 сорока минут из середины теста, для лучшего понимания. По этим данным была посчитана среднеквадратичная ошибка между реальным напряжением и напряжением, полученным при симуляции. Она оказалась равна 5.3мВ. Это говорит о точности определения уровня заряда более, чем в 95%. [5]

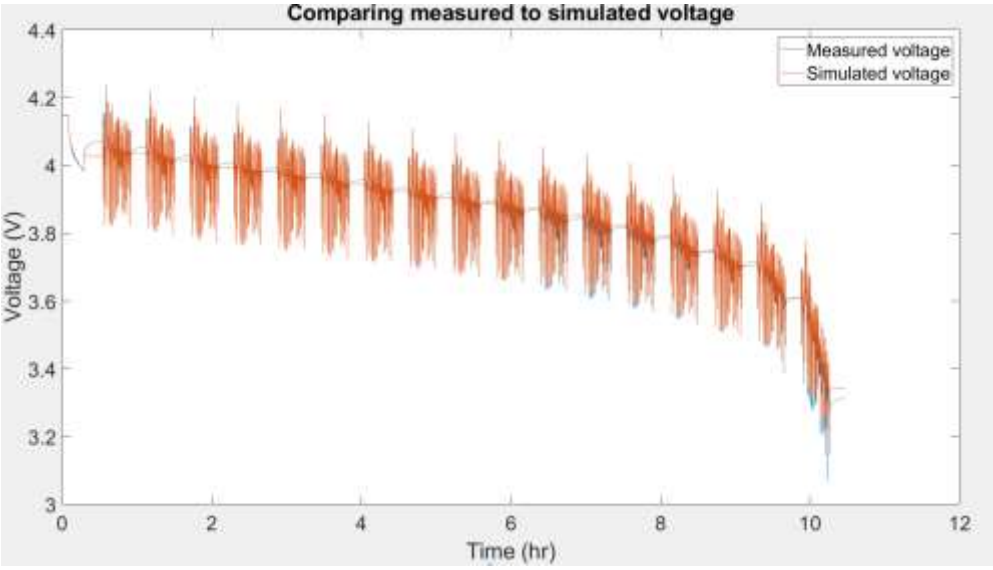



**Рисунок 6** – сравнение эквивалентной модели и реальной литий-ионной ячейки

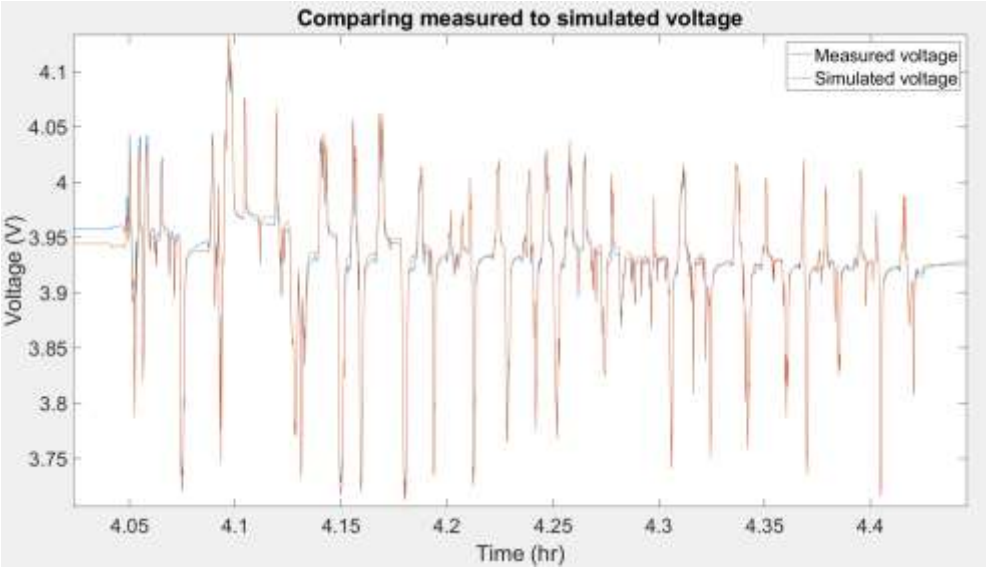



**Рисунок 7** – сравнение эквивалентной модели и реальной литий-ионной ячейки (детальный вид)

## Заключение.

В настоящее время эквивалентная модель создается на основании тонких химических особенностей конкретного аккумулятора и требует от месяца до полугода исследований, тестов и вычислений. Описанный в данной работе способ создания эквивалентной модели в отличие от ныне существующих позволяет получать хорошее приближение к реальному литий-ионному

аккумултяору за кротчайшие сроки, так как он подходит для любого типа ячеек и требует минимум тестов.

**Литература**

1. Курс университета Колорадо. Система контроля аккумуляторной батареи. // Coursera. 2019
2. Дэвид А. Система контроля аккумуляторной батареи для больших литий-ионных аккумуляторных сборок // 2010. №. 1. С. 50-55
3. Грегори Л. Плетт. Системы контроля аккумуляторной батареи // 2015. №. 1. С. 61-63
4. Филипп Вайкер. Системный подход к управлению литий-ионными аккумуляторами // 2014. №. 1. С. 32-35
5. Бруно Скросати, Юрген Гарче, Вернер Тильметц. Достижения в области аккумуляторных технологий для электромобилей // 2015. №. 1. С. 116-118

**Literature**

1. Course of university of Colorado. Battery Management System // Coursera. 2019
2. Davide A. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs // 2010. No. 1. P. 50-55
3. Gregory L. Plett. Battery Management Systems // 2015. No. 1. P. 61-63
4. Phillip Weicker. A Systems Approach to Lithium-ion Battery Management // 2014. No. 1. P. 32-35
5. Bruno Scrosati, Jurgen Garche, Werner Tillmetz. Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles // 2015. No. 1. P. 116-118