

ОЦЕНКА РАБОЧЕЙ ЕМКОСТИ СБОРОК ЛИТИЙ ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Важным вопросом, встающим при изготовлении батарей для электротранспорта и других применений является определение реальной доступной емкости таких батарей, которая отличается от суммы номинальных емкостей ячеек и зависит от разброса электрофизических параметров ячеек, структуры параллельно-последовательной сборки, от режима зарядки – разрядки, особенностей работы BMS и других факторов. Прямое моделирование большой совокупности ячеек сложно с точки зрения вычислительных ресурсов, а также из-за отсутствия информации о разбросе электрических, химических, структурных и прочих параметров ячеек [1,2]. Поэтому существует потребность в универсальных, менее трудоемких подходах, требующих меньшего числа исходных данных. Развитию такого подхода и его применению для конкретной технической системы посвящена данная работа.

Для моделирования разброса совокупности параметров ячейки используем модельную 6-ти параметрическую зависимость напряжения разомкнутой цепи V_{OC} от состояния зарядки SOC (или принятого заряда) в процессе зарядки и разрядки, [3]

$$V_{OC} = E_0 + A \cdot SOC + B \cdot \exp((SOC - 1)/D) - F \cdot \exp(-G \cdot SOC) \quad (1)$$

где E_0 , A , B , D , F , G - параметры модели. Особенностью функции (1) по сравнению с, например, функцией Шеперда [4] является то, что она состоит из трех относительно независимых функциональных частей, что обеспечивает высокую эффективность аппроксимирования экспериментальных данных. Это также служит обоснованием принятого допущения – единой дисперсии для всех параметров модели. Действительно, поскольку нет оснований предполагать принципиально разного варьирования зарядной кривой на начальном, среднем и конечном участках – нет оснований предполагать и существенное различие дисперсии параметров модели (1).

Напряжение на ячейке представляется в виде суммы напряжения разомкнутой цепи, падения напряжения на активном и

поляризационном сопротивлении. Электрическую емкость эквивалентных R-C цепей не учитываем ввиду квазистационарности зарядки и разрядки.

$$U = V_{oc} - IR_a - U_p. \quad (2)$$

Предполагаем, что параметры модели не зависят от направления тока (разрядка или зарядка). Незначительный гистерезис функции $V_{oc}(SOC)$, возникающий при смене направления тока [ссылка из 1 Зауэра] не моделируется. Значение SOC рассчитывается по величине протекшего заряда и номинальной емкости.

$$SOC = 1 - \int_0^t Idt / C_N, \quad \text{или} \quad d(SOC)/dt = -I, \quad (3)$$

при начальном значении $SOC(t=0)=1$.

Основная гипотеза методики состоит в том, что в случае задания статистического разброса параметров модели (1)-(3) возникающее множество кривых зарядки адекватно реальному спектру кривых зарядки и разрядки отдельных ячеек, а также сборок ячеек. Таким образом принимается во внимание разброс совокупности параметров ячеек, не вникая в физико-химию процессов зарядки и отдачи электроэнергии.

Полагаем, что значения параметров (1), (2) распределены по нормальному закону с равными относительными стандартными отклонениями. Согласно методике, статистические характеристики сборок ячеек исследуются методом Монте-Карло.

Как правило, реальная емкость ячеек выше паспортной номинальной. Это связано с тем, что изготовитель, страхуясь от рекламаций, изготавливает ячейки с некоторым запасом емкости, который мы оцениваем как $C_{действ} = C_{ном}(1+2\cdot\sigma_0)$, где σ_0 – относительное стандартное отклонение емкости. То есть, при $C_{ном} = 105$ А·ч и $\sigma_0 = 1\%$ $C_{действ} = 107,1$ А·ч, что близко к реальной статистике емкостей литий-ионных ячеек, используемых в компании 1AK-GROUP.

В качестве базовых значений параметров (1)-(3) примем данные [3]. В результате моделирования получена следующая статистическая модель литий ионной ячейки EVE 105 А·ч, см. таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Тип	$C_{ном}$, А·ч	$U_{ор}$, В	E_0 , В	A, В	B, В	D, б.р.	F, В	G, б.р.	R_a , мΩ	R_p , мΩ	$C_{мод}$, А·ч	$\sigma_{мод}$
LFP	105	3,1 - 3,4	3,22	0,122	0,255	0,011 7	0,397	30,98	0,93	0,6	107,1	0,9 %

Приведем результаты расчета усредненных (вероятных) емкостных характеристик модуля s16 выполненных методом Монте-Карло.

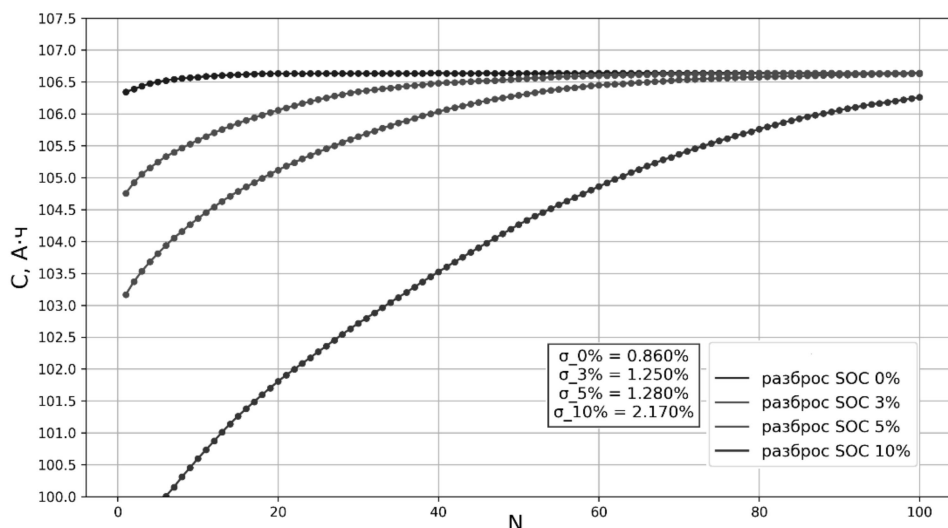


Рис.1. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов (N) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 1 – 0%, 2 - 3%, 3 - 5% , 4 - 10%. Двухканальная активная балансировка 1 А, порог балансировки 0,2 В.

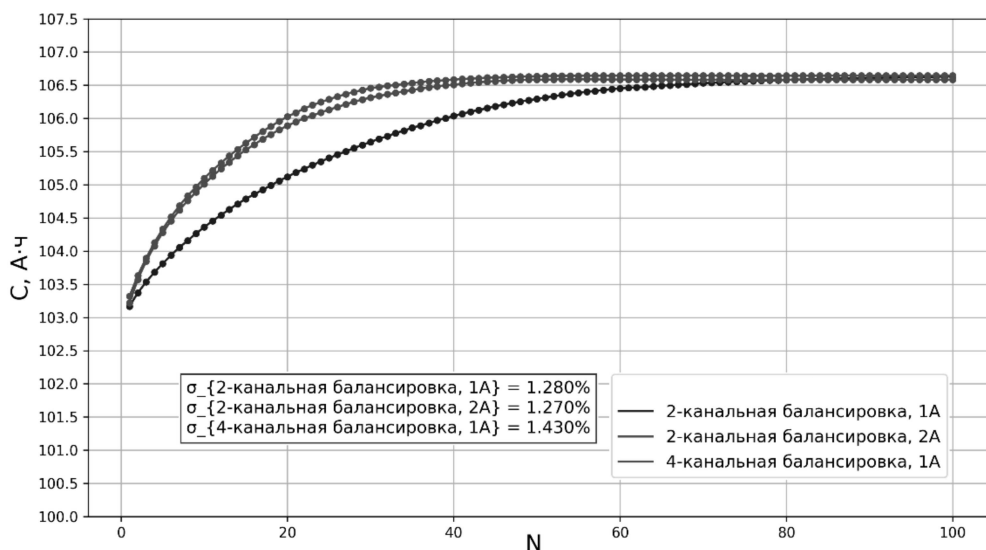


Рис.2. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов (N) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 3% и пороге балансировки 0,2 В. 1- 2-канальная $I_b=1$ А, 2 – 2-канальная $I_b=2$ А, 3 - 4-х канальная 1 А.

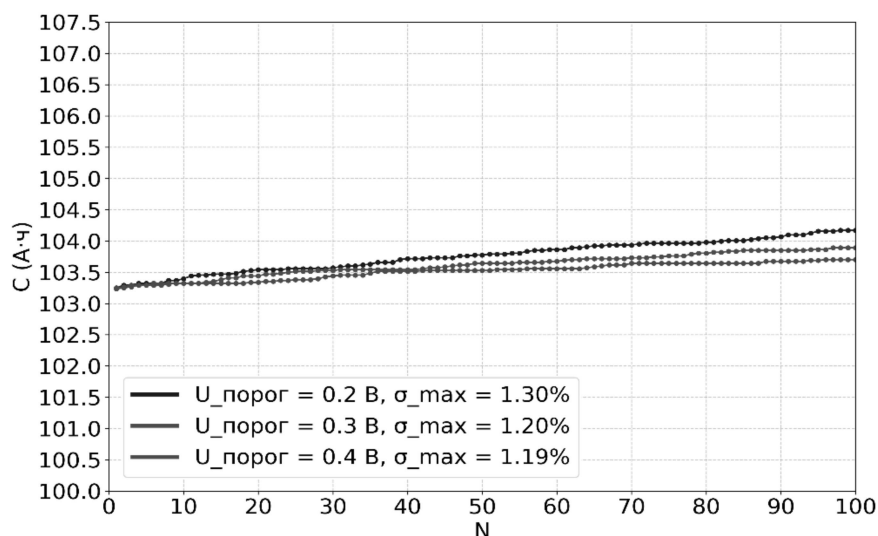


Рис.3. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов (N) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 5 % и двухканальной балансировке 1 А при пороге балансировки: 1 - 0.1 В; 2 - 0,2 В; 3 – 0.3 В

Величины максимального отклонения от усредненных трендов представлены на врезках рисунков и лежат в пределах 2 %.

Моделирование дает четкое представление о доступной (рабочей) емкости литий -ионной LFP батареи s16. Видно, что выход на максимальную емкость требует длительного циклирования. Модель применима для батарей с любой сложной структурой. На ее основе может быть построен специализированный калькулятор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Huria, T. Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium / T.Huria, R.Jackey, M.Ceraolo // SAE International. - 2013. – 01. - P.1547.
2. Доброго, К.В. Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории / К.В.Доброго, Ю.В.Бладыко // Энергетика. Изв. ВУЗов и энергетических объедин. СНГ. – 2021. – N 5. – С.381-395.
3. Доброго, К.В. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии / К.В.Доброго, И.А.Козначеев, В.Л.Червинский // Энергетика. Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. – 2024. – N 3. – С.209-227.
4. Shepherd, C.M. Design of Primary and Secondary Cells: II. An Equation Describing Battery Discharge. J. Electrochem. Soc. – 1965. - V112 – P. 657.