

УДК 621.355:004.94

Доброго К.В.<sup>1</sup>, Лемешевский В.М.<sup>1</sup>,  
Червинский В.Л.<sup>2</sup>, Каледник А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Белинвестторг» холдинга 1AK-GROUP, Минск

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

## 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 разорванной 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 разорванной цепи, падения напряжения на активном и

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

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

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  $C_{\text{действ}} = C_{\text{ном}}(1+2\sigma_0)$ , где  $\sigma_0$  – относительное стандартное отклонение емкости. То есть, при  $C_{\text{ном}} = 105 \text{ А}\cdot\text{ч}$  и  $\sigma_0 = 1\%$   $C_{\text{действ}} = 107,1 \text{ А}\cdot\text{ч}$ , 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	$C_{\text{ном}}$ , $\text{А}\cdot\text{ч}$	$U_{\text{оп}}$ , $\text{В}$	$E_0$ , $\text{В}$	$A, \text{ В}$	$B, \text{ В}$	$D,$ б.р.	$F, \text{ В}$	$G,$ б.р.	$R_a,$ $\text{м}\Omega$	$R_p,$ $\text{м}\Omega$	$C_{\text{мод}},$ $\text{А}\cdot\text{ч}$	$\sigma_{\text{мод}}$
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.

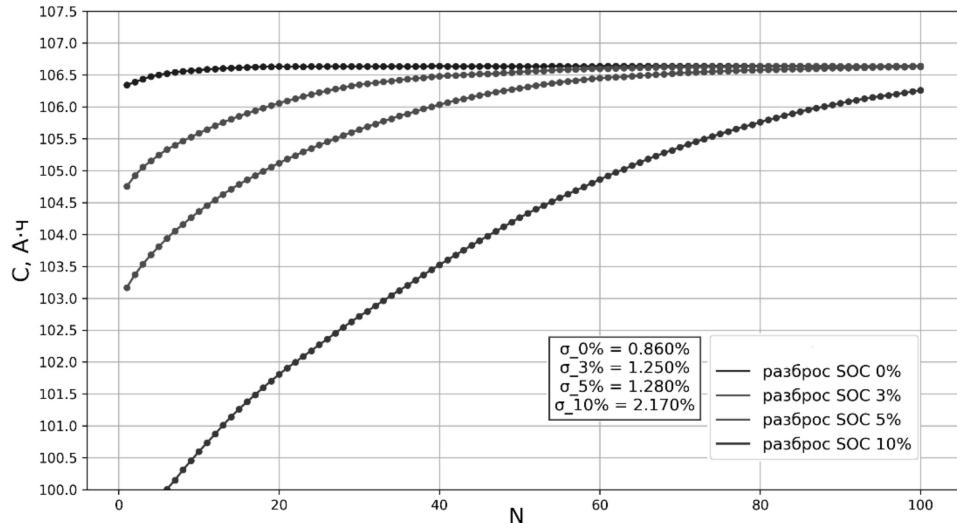


Рис.1. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов ( $N$ ) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 1 – 0%, 2 - 3%, 3 - 5% , 4 - 10%.

Двухканальная активная балансировка 1 А, порог балансировки 0,2 В.

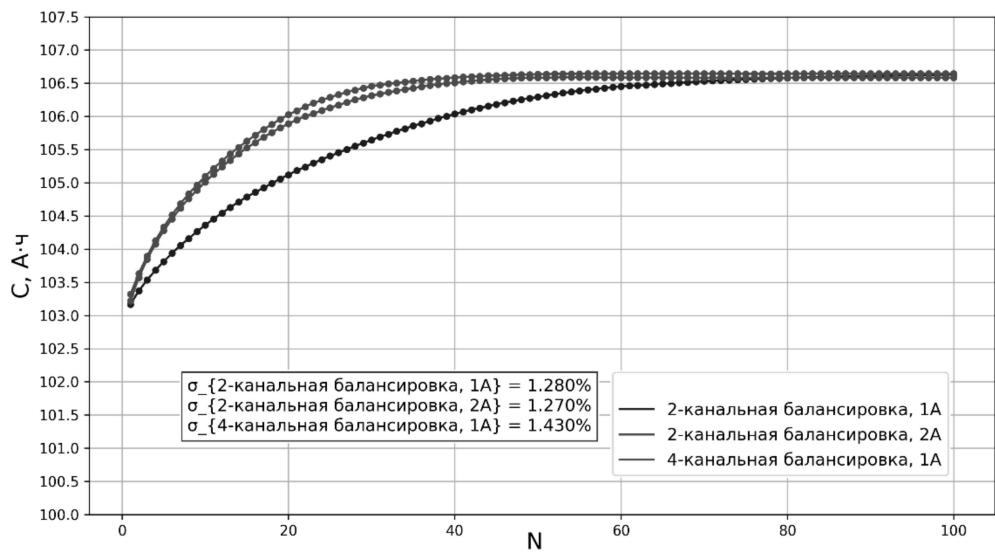


Рис.2. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов ( $N$ ) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 3% и пороге балансировки 0,2 В. 1- 2-канальная  $I_b=1$  А, 2 – 2-канальная  $I_b=2$  А, 3 - 4-х канальная 1 А.

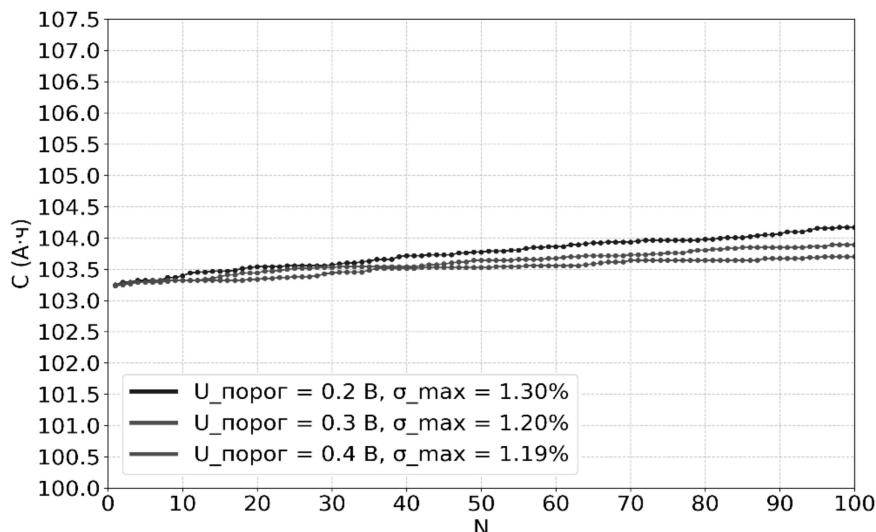


Рис.3. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение как функция количества циклов ( $N$ ) при начальном разбросе степени заряженности ячеек 5 % и двухканальной балансировке 1 А при пороге балансировки: 1 - 0.1 В; 2 - 0,2 В; 3 – 0.3 В

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 объед. СНГ. – 2021. – N 5. – C.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. – C.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.