

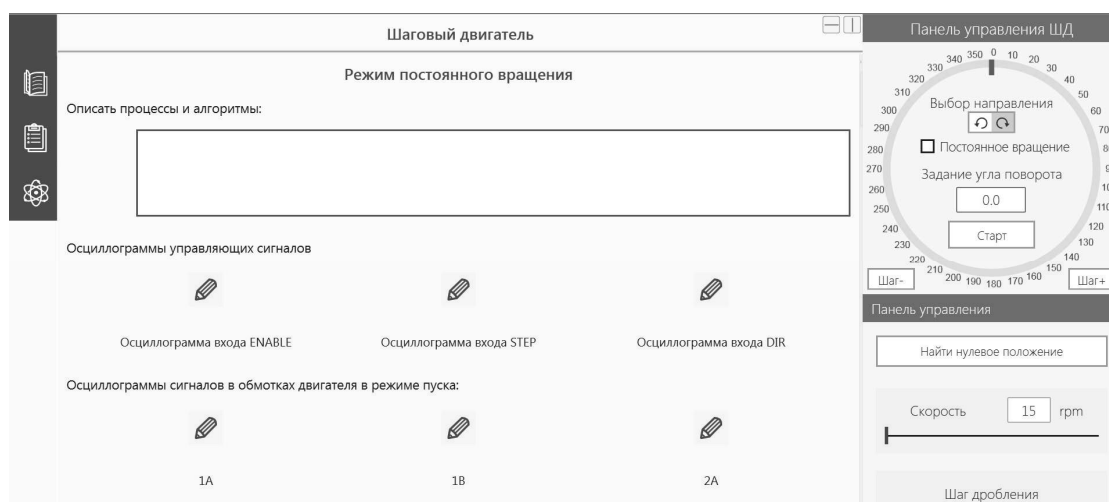


Рис. 2. Пример рабочего окна панели управления

Подобного рода блоки, интегрированные в лабораторные стенды, позволяют реализовывать несколько режимов работы следящей системы с ШД: режим постоянного вращения, режим одиночных шагов, режим синхронизации, режим реверсирования, режим ручного управления. Исследование режимов позволяет получить ряд зависимостей и определить влияние выбранного деления шага ШД на скорость и точность следящей системы, что в дальнейшем может быть использовано при проектировании более сложных конструкций.

УДК 621.355

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СБОРОК ЛИТИЙ-ИОННЫХ ЯЧЕЕК МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

К.В. ДОБРЕГО¹, В.Л. ЧЕРВИНСКИЙ², А.С. КАЛЕДНИК²

¹ ООО «Белинвестторг» холдинг 1AK GROUP

² Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В связи с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, необходимостью регулирования нагрузки энергосистем рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 % в год [1].

Батарейные подсистемы построены как последовательно-параллельные сборки электрохимических ячеек. Ячейки не являются абсолютно

одинаковыми устройствами, емкость сборки зависит от разброса параметров составляющих ее ячеек, структуры сборки, режима зарядки – разрядки, особенностей работы системы управления батареей (BMS) и других факторов. Важным вопросом является - *какова фактическая емкость батареи и как она может изменяться в процессе эксплуатации*. Основным способом решения задачи является прямое моделирование работы сборки ячеек на уровне электрохимических моделей, эмпирических моделей [2,3] с заданием обоснованного разброса параметров. Применение существующих моделей в контексте рассматриваемой задачи затруднительно ввиду их сложности и отсутствия информации о разбросе электрических, химических, структурных и прочих параметров ячеек.

В работе [4] предложена методика моделирования работы сборок литий-ионных ячеек как системы ячеек со статистически распределенными параметрами. Рассматривалась регулярная зарядка-разрядка постоянным током последовательной сборки (16s) литий ионных LiFePO4 ячеек. Настоящая работа посвящена применению указанного подхода для моделирования более сложной системы, - параллельной пары литий ионных батарей.

Аппроксимируем экспериментальную зависимость $V_{oc}(SOC)$ [2] статистической функцией (1).

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

где E_0, A, B, D, F, G - параметры модели. Используем (1) для моделирования электрических параметров ячеек.

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

$$U = V_{oc} - I(R_a + R_p) \quad (2)$$

Параметры модели (1), (2) не зависят от направления тока (разрядка или зарядка). Незначительный гистерезис функции $V_{oc}(SOC)$ при смене направления тока не учитывается. Значение SOC рассчитывается по величине протекшего заряда и емкости.

$$SOC = 1 - \int_0^t Idt / C \quad (3)$$

В основе метода лежит гипотеза о том, что при равном статистическом разбросе всех параметров модели (1)-(3) генерируемое множество кривых зарядки/ разрядки адекватно реальному множеству. Значения всех параметров распределены по нормальному закону с одинаковым относительным стандартным отклонением.

Статистическая модель ячейки. Согласно статистики компании 1AK-GROUP средняя емкость партии литий-ионных ячеек превышает

номинальную $C \approx C_H(1+2\cdot\sigma_0)$, где C_H – номинальная емкость, σ_0 – относительное стандартное отклонение емкости ячеек в партии. Так при $C_H = 105$ А·ч и $\sigma_0 = 1\%$ $C = 107,1$ А·ч. Емкость ячейки C_i определяется в цикле зарядки – разрядки в диапазоне $U = 2,5 - 3.65$ В при этом определяются параметры C и σ , Табл.1.

Табл.1. Параметры статистической модели ячейки ((1) -(3))

$C_{ном}$ 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, А·ч	σ
105	3,1 - 3,4	3,2 2	0,122 3	0,255	0,011 7	0,39 722	30,9 828	0,93	0,6	107. 1	0.9%

Ниже представлены расчеты эволюции емкости батареи s16 при циклировании при разных начальных значениях разброса SOC ее ячеек (σ_{SOC}) и для разных режимов балансировки. Среднее значение и разброс определялись на основании расчёта группы 30 батарей со случайным набором ячеек. Базовый вариант параметров: $\sigma_{SOC} = 5\%$; ток балансировки $I_b = 1$ А; порог напряжения для начала балансировки $\Delta U_b = 0.2$ В; время балансировки $\Delta \tau_b = 10$ сек.

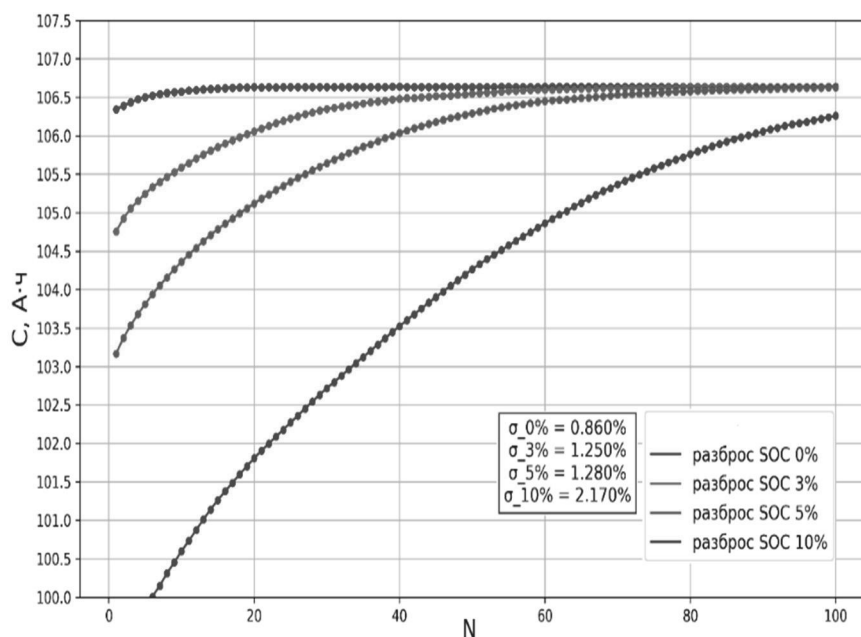


Рис.1. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение от количества циклов N. Базовые параметры балансировки. 1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0\%$, 3%, 5% и 10% соответственно

Скорость выхода емкости на максимальное значение зависит как от тока балансировки, так и от периода балансировки $\Delta \tau_b$, рис.1.

В [4] показан эффект срыва балансировки при снижении порога напряжения начала балансировки ΔU_6 ниже определенного значения, рис.2.

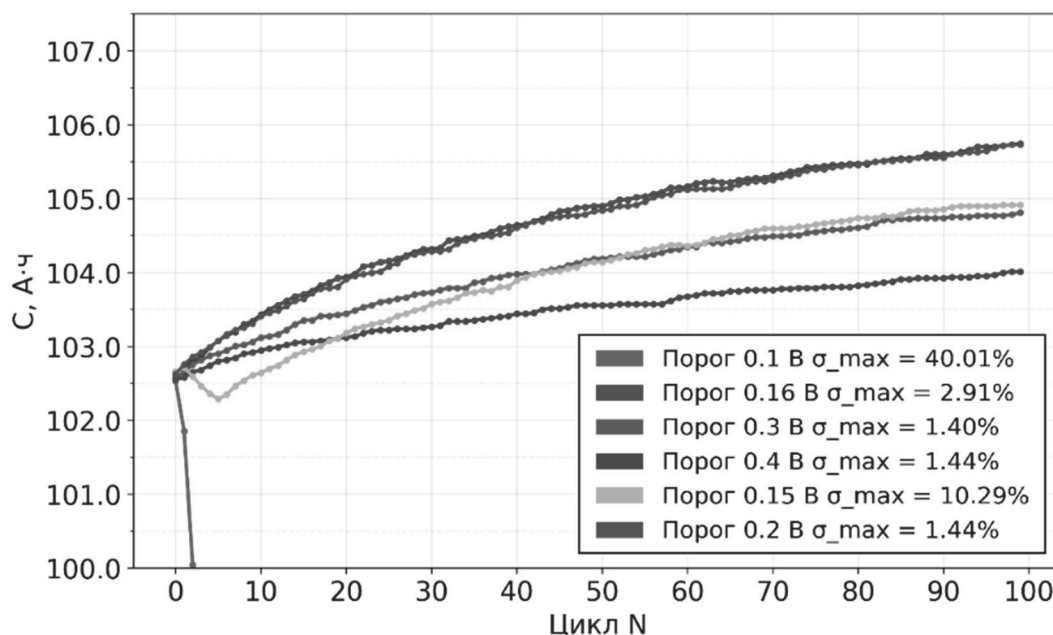


Рис.2. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение от количества циклов N, $\sigma_{SOC}=5\%$. 1, 2, 3, 4, 5 – порог начала балансировки $\Delta U_6=0.1, 0.15, 0.16, 0.2, 0.3$ и 0.4 В соответственно

Согласно рис. 2, при $\Delta U_6=0.1$, балансировка не выравнивает SOC ячеек. Граница, разделяющая режим эффективной балансировки от режима ее срыва - $\Delta U_{66} \sim 0.15$ В.

Обратимся к исследованию работы параллельных батарейных модулей. Каждый из модулей управляется независимой BMS. Зарядка и разрядка пары производится стабилизированным током (при режиме 0,5C ток 105 А). Ток разделяется в соответствии с ЭДС (ε) и внутренним сопротивлением батарей r_1 и r_2 :

$$I_1 = \frac{I \cdot r_2}{r_1 + r_2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{r_1 + r_2}, \quad I_2 = I - I_1, \quad (5)$$

где $I > 0$, $U > \varepsilon_1, \varepsilon_2$ при зарядке и $I < 0$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > U$ при разрядке.

На рис. 3 представлен результат статистического расчета для группы 30 пар модулей токов первого цикла зарядки – разрядки. Начальный статистический разброс степени заряженности ячеек в модуле $\sigma_{SOC}=5\%$. При моделировании реализован базовый режим балансировки с порогом начала балансировки $\Delta U_6=0.2$ В.

Как видно, при высокотокковых режимах зарядки велика вероятность превышения порога допустимого тока для одного из модулей и, как следствие, выключение и недозарядка модуля.

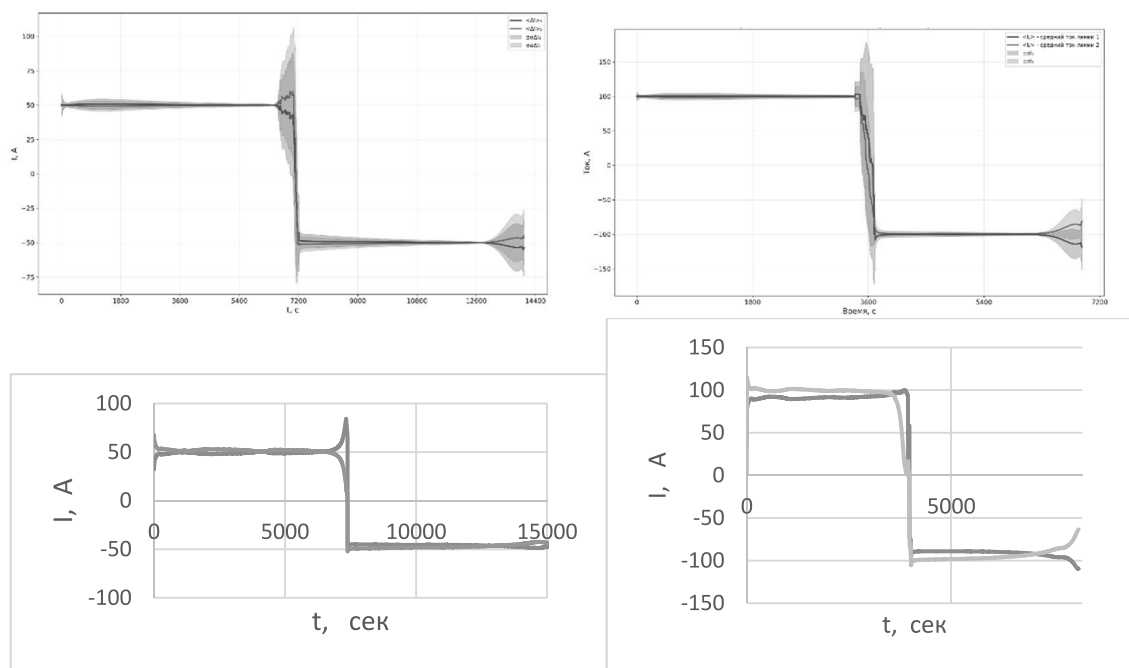


Рис.3. Амплитуда дисбаланса токов зарядки- разрядки первого цикла и ее относительное среднеквадратичное отклонение для 30 случайных пар модулей (верхние рисунки) экспериментальные данные (нижние рисунки). Ток 0.5C (слева) и 0.95C (справа). $\sigma_{SOC}=5\%$.

Интересный результат - наличие области схождения токов к номинальному значению на уровне $SOC \approx 90\%$ при зарядке и уровне $SOC \approx 25\%$ - при разрядке, что подтверждено экспериментами.

В табл. 2 и 3 приведены результаты статистических расчетов дисбаланса токов зарядки и разрядки и общей емкости от параметров системы. Дисбаланс рассматривался только при работающих модулях.

Табл. 2. Максимальный дисбаланс токов при зарядке и разрядке, соответствующие величины относительного среднеквадратичного отклонения, а также емкость цикла C_{fact} .

σ_{SOC} , %	$\langle I \rangle$, A	$ I_1 - I_2 _{max, chr}$	$\sigma_{\Delta I chr}$	$ I_1 - I_2 _{max, dchr}$	$\sigma_{\Delta I dchr}$	C_{fact} , A.ч
0	50	35.932	4.375	59.879	10.161	101.536
1	50	34.964	4.251	51.533	9.961	101.279
3	50	32.068	3.906	46.405	9.900	100.225
5	50	28.719	3.649	46.550	10.000	98.864

Фактическая емкость пары снижается с ростом начального расхождения σ_{SOC} , при этом дисбаланс токов также снижается с увеличением начального разброса SOC, что объясняется тем, что недозаряд и общее снижение емкости пары, обусловленное ростом σ_{SOC} , сильнее влияет на снижение дисбаланса токов чем рост σ_{SOC} на его увеличение.

Табл. 3. Максимальный дисбаланс токов при зарядке и разрядке, соответствующие величины относительного среднеквадратичного отклонения, а также емкость цикла C_{fact} при различных токовых режимах iC . $\sigma_{SOC}=3\%$.

iC	$\langle I \rangle, A$	$ I_1 - I_2 _{max,chr}$	$\sigma_{\Delta I_{chr}}$	$ I_1 - I_2 _{max,dchr}$	$\sigma_{\Delta I_{dchr}}$	$C_{fact}, A \cdot ч$
0.25	25	25.72	3.45	2.13	5.14	100.63
0.5	50	35.85	4.41	4.24	0.36	100.74
0.9	90	59.53	6.98	5.53	5.12	99.47

Исследуем характер изменения дисбаланса токов и общей емкости пары модулей при многократном циклировании, рис.4, 5.

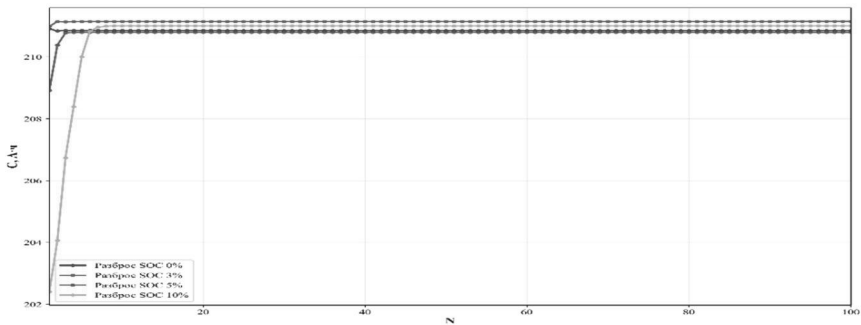


Рис. 4. Изменение доступной емкости параллельной пары от количества зарядно-разрядных циклов N . Ток $0.5C$; $\Delta U_6 = 0.15\text{ В}$. 1, 2, 3, 4 - $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ и 10%

Характерным поведением вновь собранной параллельной пары модулей является разбежка показываемой токовой емкости модулей на первых 5 – 10 циклах с последующей стабилизацией емкости каждого модуля и пары в целом.

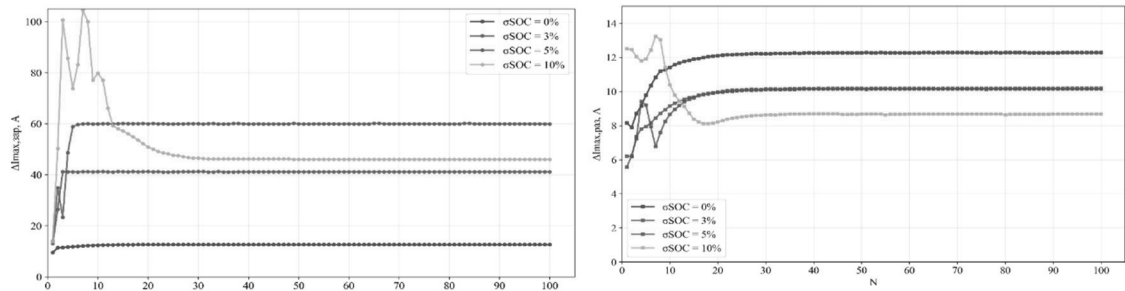


Рис. 5. Зависимость $\Delta I_{max,chr}$ и $\Delta I_{max,dchr}$ от количества циклов N . Ток $0.5C$. $\Delta U_6 = 0.15\text{ В}$. 1, 2, 3, 4 - $\sigma_{SOC} = 0, 3, 5$ и 10%

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемешевский В.М. Развитие аккумуляторной отрасли и стратегическое позиционирование холдинга 1ak-group. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2025. № 3(72), С.92- 96

2. Доброго К.В., Козначеев И.А., Червинский В.Л. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2024; т.67б №3, С. 209-227

3. Doyle, M.; Newman, J. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems. *Electrochim. Acta* 1995, 40, 2191–2196.

4. Доброго К.В., Лемешевский В.М., Червинский В.Л., Каледник А.С. Оценка рабочей емкости сборок литий-ионных аккумуляторов методом Монте-Карло. Сб. докладов Межд. науч. конф. «Современные электрохимические технологии и оборудование» МЕТЕ 2025 19-23 мая 2025, сс.61-64.

УДК 681.532.8:621.391

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Д.С. КАРПОВИЧ, И.О. ОРОБЕЙ, В. В. САРОКА, ЧЖЭН ЮЙТЯНЬ
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

При проектировании системы управления гиростабилизированного опорно-поворотного устройства (ГОПУ) необходимо уделить внимание таким вопросам как обеспечение высокой динамической точности наведения при движении объекта-носителя, обеспечение требований по количеству осей, диапазону и шагу углов наведения, требований по прочности элементов, устойчивости при воздействии механических вибраций и ударов, учет возможной инерции при позиционировании, подстройка под возможное изменение положения платформы, наряду с выполнением требований по массе и условиям размещения на объекте.

Высокая динамическая точность приводов наведения может быть обеспечена за счет выбора соответствующего закона управления, использования быстродействующих исполнительных устройств и механических передач с высокой жесткостью и малой зоной нечувствительности. Требования по минимизации массы и условиям размещения ГОПУ на объекте может быть устранено при использовании безредукторных приводов.

Погрешность измерения углов поворота ГОПУ определяется точностью физического метода измерения, собственной погрешностью