

*Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский*

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАРЯДА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

*D. V. Serdechnyy, Yu. B. Tomashevskiy*

## THE CONTROL OF A MULTI-ELEMENT CHARGE LITHIUM-ION BATTERIES

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** В основе эффективной эксплуатации литий-ионного накопителя лежит непрерывный мониторинг состояния основных параметров аккумуляторных ячеек. Актуальной задачей является определение структуры системы управления накопителем энергии и разработка алгоритма заряда многоэлементной батареи, который позволит определить оптимальное соотношение времени работы накопителя и временных затрат на процесс зарядки и балансировки. **Материалы и методы.** Рассмотрен метод пассивной балансировки ячеек многоэлементного литий-ионного накопителя. Представлена структура системы управления при реализации пассивного метода балансировки для  $n$  последовательно соединенных ячеек. В качестве основных параметров зарядного и балансировочного процесса определены значение тока заряда, сопротивление балластного резистора и количество циклов балансировки. **Результаты.** По результатам эксперимента можно сделать вывод, что количество балансировочных циклов влияет на эксплуатационные характеристики литий-ионного накопителя. С увеличением числа балансировочных циклов  $m$  увеличивается уровень минимального напряжения среди всех ячеек и, следовательно, увеличивается время разряда многоэлементной батареи, но при этом увеличивается и время заряда накопителя. Для рассмотренной конфигурации батареи определено оптимальное число балансировочных циклов. **Выводы.** Разработан алгоритм заряда и балансировки батареи, обеспечивающий оптимальное соотношение величины разбаланса, потерь и времени заряда. Разработана методика выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи, эффективность которой подтверждена экспериментально.

**A b s t r a c t. Background.** The operational efficiency of the lithium-ion battery is based on continuous monitoring of the state of its main parameters. The actual task is to determine the structure of the energy storage management system and develop a charging algorithm for a multi-cell battery that will allow determining the optimal ratio of the operating time and charge and balancing time. **Materials and methods.** The method of passive balancing of cells of a multi-element lithium-ion battery is considered. The structure of the control system for implementing a passive balancing method for series-connected cells is presented. As the main parameters of the charging and balancing process, the value of the charge current, the resistance of the ballast resistor and the number of balancing cycles are determined. **Results.** Based on the results of the experiment, it can be concluded that the number of balancing cycles affects the performance characteristics of the lithium-ion storage. With an increase in the number of balancing cycles, the minimum voltage level among all cells and the time of discharge of a multi-cell battery increase, but the charge time of the accumulator also increases. The optimum number of balancing cycles is determined for the battery configuration considered. **Conclusions.** The algo-

rithm of charging and balancing of the battery is developed, which provides the optimal ratio of unbalance, losses and charge time. A method for selecting the number of balancing cycles for a multi-element lithium-ion battery has been developed, the effectiveness of which has been confirmed experimentally.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** литий-ионный аккумулятор, накопитель, балансировка, емкость.

**К e y w o r d s:** lithium-ion battery, storage, balancing, and capacity.

### Введение

Развитие электроэнергетических систем в последнее время характеризуется интенсивным ростом использования батарей на основе литий-ионных (литий-полимерных) аккумуляторов [1–4]. Этому в значительной степени способствует прогресс в таких областях, как возобновляемые источники энергии, сетевые технологии обработки данных и управление на базе технологий интеллектуальных сетей электроснабжения (*smart grid*) [1]. Аккумуляторная батарея (АБ) на основе литий-ионных аккумуляторов обладает оптимальным соотношением массо-габаритных характеристик и накопленной энергии и, как следствие, может использоваться не только в стационарных, но и мобильных системах различного назначения [5].

В основе безопасной и эффективной эксплуатации литий-ионных батарей лежит непрерывный контроль за основными параметрами аккумулятора, а также мониторинг истории заряда/разряда и фактической емкости.

При формировании многоэлементной последовательно соединенной литий-ионной аккумуляторной батареи (ЛИАБ) возникает проблема разброса напряжений и уровней заряда отдельных аккумуляторных ячеек («разбаланс ячеек»). По достижении хотя бы одной из ячеек критического напряжения при разряде необходимо отключить накопитель от нагрузки, так как дальнейший разряд повлечет нарушение требований эксплуатации. В этом случае емкость батареи будет определяться емкостью самой слабой ячейки.

Таким образом, чтобы повысить эксплуатационные характеристики аккумуляторных батарей, необходимо управлять зарядным процессом накопителя и балансировкой аккумуляторных ячеек [6–8].

Способы балансировки можно разделить на два типа: активная и пассивная балансировка [9–11]. Вид балансировки аккумуляторной батареи определяется техническими, эксплуатационными, экономическими требованиями, а также особенностями построения накопителя [12–16]. В работе [14] предложен способ балансировки литий-ионной батареи, который заключается в отводе избытков энергии с аккумуляторов, напряжение на которых превышает наименьшее из напряжений на всех ячейках батареи на определенную величину. Предложенный способ увеличивает время разряда многоэлементной батареи, однако он затронул с точки зрения продолжительности времени подготовки накопителя и технической сложности реализации. Предложенный в работе [15] способ подготовки литий-ионного накопителя эффективен для автономных систем, подзарядка которых производится в произвольный момент времени, и неприемлем для накопителей, время заряда которых определяется оператором. Способ, описанный в [16], применим в системах накопления энергии, однако неприемлем для накопителей энергии мобильных энергосистем и электротранспортных средств.

Таким образом, актуальной задачей является определение структуры системы управления накопителем энергии и разработка алгоритма заряда батареи, состоящей из  $n$  аккумуляторных ячеек, обеспечивающих оптимальное соотношение времени разряда накопителя и временных затрат на процесс зарядки и балансировки.

### *Структура системы управления многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареей и разработка алгоритма ее заряда*

Рассмотрим пассивный метод балансировки, выбор которого определяется простотой реализации и эксплуатации, а также низкими затратами на производство в сравнении с системой активной балансировки. На рис. 1 представлена структура системы управления при реализации пассивного метода балансировки для  $n$  последовательно соединенных ячеек.

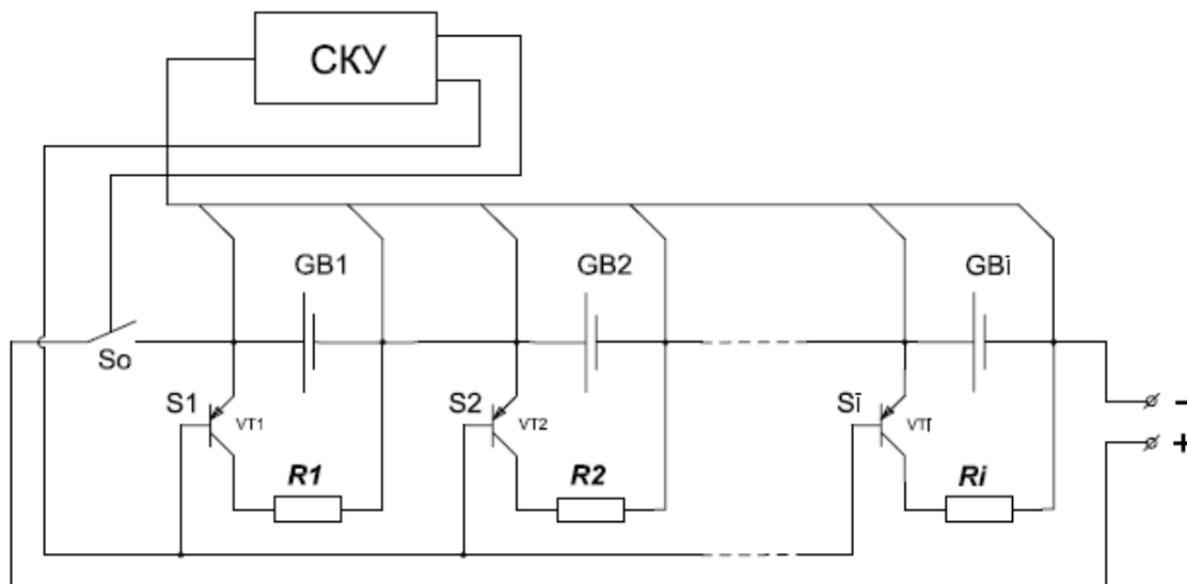


Рис. 1. Пример реализации пассивного способа балансировки

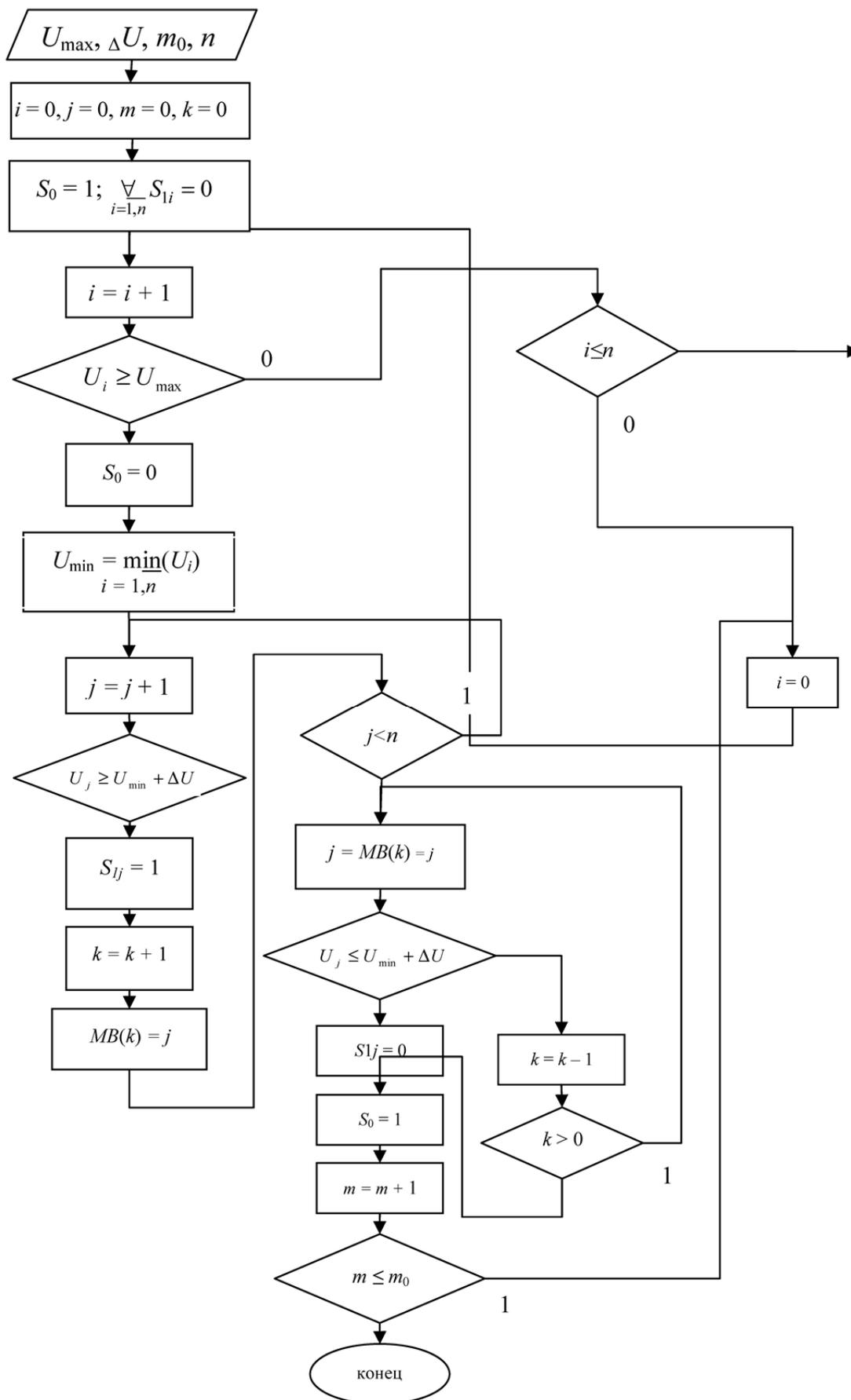
В процессе заряда последовательно соединенной аккумуляторной батареи система контроля и управления (СКУ) производит контроль уровней напряжений на аккумуляторных ячейках  $GB_i$  (вход СКУ). При достижении одной из ячеек критического уровня напряжения  $U_{\max}$  происходит отключение ключа  $S_0$  (выход СКУ) и наступает стадия балансировки: подключение балластных резисторов  $R_i$  к ячейкам  $GB_i$  посредством ключей  $S_i$ , в роли которых выступают транзисторы  $VT_i$ , управляющие сигналы поступают с выхода СКУ. Среди различных вариантов реализации СКУ на базе микроконтроллеров отечественных и зарубежных производителей, рассмотренных в [12–17], предпочтительной выглядит система управления с использованием микроконтроллеров Texas Instrument [18].

Блок-схема предлагаемого алгоритма заряда батареи, содержащей  $n$  литий-ионных аккумуляторов, показана на рис. 2 и состоит из следующих этапов:

1. Измеряются напряжения  $U_i, i = \overline{1, n}$  на ячейках. Если  $U_i \geq U_{\max}$ , то размыкается ключ  $S_0$ .
2. Формируется множество ячеек, для которых выполняется условие  $U_i \geq (U_{\min} + \Delta U) \forall i, i = \overline{1, n}$ , куда добавляется  $i$ -я ячейка из п. 1;  $\Delta U$  – это величина уставки балансировки. Процессу балансировки подлежат ячейки с напряжением, превышающим минимальное из напряжений всех ячеек  $U_{\min}$  на величину  $\Delta U$ .
3. Для каждой ячейки сформированного множества замыкаются ключи  $S_i$ , обеспечивающие разряд соответствующей ячейки на балластный резистор  $R_i$  до уровня  $U_i = \min_{i \neq j} \{U_j\} + \Delta U$ .
4. Фиксируется завершение цикла балансировки. Осуществляется переход к процессу заряда: замыкание ключей  $S_0$  и  $S_i$ . Количество циклов балансировки увеличивается на 1:  $m = m + 1$ .
5. Если  $m \leq m_0 \forall i, i = \overline{1, n}$ , то переход к пункту 1.
6. Окончание процесса заряда.

Определяющими параметрами процесса зарядки балансировочного процесса являются значение тока заряда ( $I_3$ ), сопротивление балластного резистора  $R_i$  и количество циклов балансировки  $m$ . При  $I_3 = \text{const}$  и  $R_i = \text{const}$  параметром, определяющим продолжительность процесса зарядки, является количество циклов балансировки  $m$ .

Параметр  $m$  зависит от величины начального разбаланса между ячейками, который изменяется от цикла к циклу до заранее задаваемого значения  $\delta$ .

Рис. 2. Блок-схема алгоритма заряда батареи, содержащей  $n$  литий-ионных аккумуляторов

Большое влияние на величину разбаланса оказывают внутренние характеристики аккумуляторной ячейки: фактическая емкость (Ач) и внутреннее сопротивление (Ом, для батарей из одной серии может варьироваться в интервале  $\pm 0,005$  Ом). В процессе эксплуатации эти факторы оказывают существенный вклад в увеличение разбаланса и, как следствие, приводят к уменьшению емкости аккумуляторной батареи и соответственно к увеличению числа стадий балансировки [17]. Следует отметить, что процесс эксплуатации ЛИАБ без процедур балансировки, помимо увеличения разбаланса, сопровождается уменьшением емкости аккумуляторной батареи в целом [19].

### Определение параметров балансирующего процесса

Рассмотрим процесс заряда многоэлементной ЛИАБ с использованием режима балансировки и дальнейшим разрядом. Пример соответствующих графиков изменения напряжений на ячейках трехэлементной батареи представлен на рис. 3.

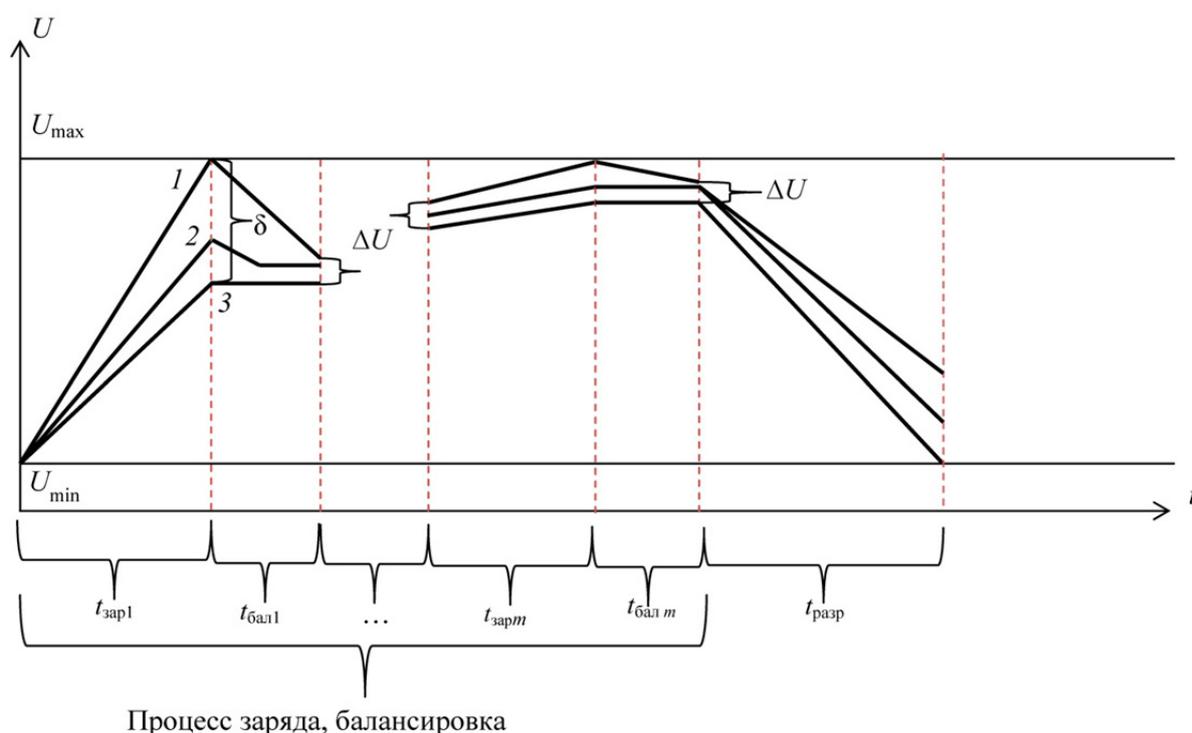


Рис. 3. Графики напряжения на трех последовательно соединенных ячейках в процесс заряда ЛИАБ с использованием режима балансировки и дальнейшим разрядом

На рис. 3:  $U_{\max}$  – максимальное напряжение на ячейке;  $U_{\min}$  – минимальное напряжение на ячейке;  $\delta$  – заранее задаваемое значение разбаланса уровня напряжений на ячейках ЛИАБ;  $t_{\text{зар}i}$  – время заряда,  $t_{\text{бал}i}$  – время балансировки;  $\Delta U$  – уставка балансировки.

С реализацией каждого последующего  $i$ -го цикла «заряд/балансировка» уменьшается время балансировки  $t_{\text{бал}i}$ , а также происходит повышение уровня минимального напряжения  $U_{\min}$  среди ячеек. Это благоприятно сказывается на состоянии общего уровня заряда многоэлементного литий-ионного накопителя и, как следствие, на такой важный эксплуатационный показатель как время разряда  $t_{\text{разр}}$ . Здесь  $\Delta U$  задает диапазон «небалансированности» аккумуляторных ячеек.

Таким образом, балансировка обеспечивает стабильность времени разряда, улучшая эксплуатационные характеристики батареи, а ее отсутствие приводит к тенденции постепенного уменьшения емкости батареи. Важной задачей является определение числа  $m$  циклов «заряд/балансировка». Здесь обнаруживаются две противоположные тенденции: с одной стороны, как было уже отмечено, при увеличении  $m$  стабилизируется величина заряда накопителя, что очень важно для систем энергообеспечения автономных объектов, с другой, – увеличивается

общее время балансировки и соответственно время подготовки аккумуляторной батареи к работе, а также величина потерь мощности, определяемая балластными резисторами.

Очевидно, что  $m = f(\Delta U, n)$ , где  $n$  – количество ячеек в многоэлементной ЛИАБ. Определение области выбора количества  $m$  циклов балансировки многоэлементной батареи показано на рис. 4. При использовании в системах энергообеспечения автономных объектов накопителя конкретного типа в большинстве случаев известны предельные величины  $n_1$  и  $n_2$  ( $n_1 > n > n_2$ ), а также  $\Delta U_1$  и  $\Delta U_2$  ( $\Delta U_1 > \Delta U > \Delta U_2$ ). На рис. 4 показаны зависимости  $\delta = f(m, n_1)$ ,  $\delta = f(m, n_2)$ ,  $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U_1)$  и  $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U_2)$  для этих значений. Фиксируя точки пересечения соответствующих графиков  $m_1 = f(\Delta U_2, n_2)$ ,  $m_2 = f(\Delta U_2, n_1)$ ,  $m_3 = f(\Delta U_1, n_1)$ ,  $m_4 = f(\Delta U_1, n_2)$ , определяем область (на рисунке заштрихована) выбора значения циклов балансировки многоэлементной батареи.

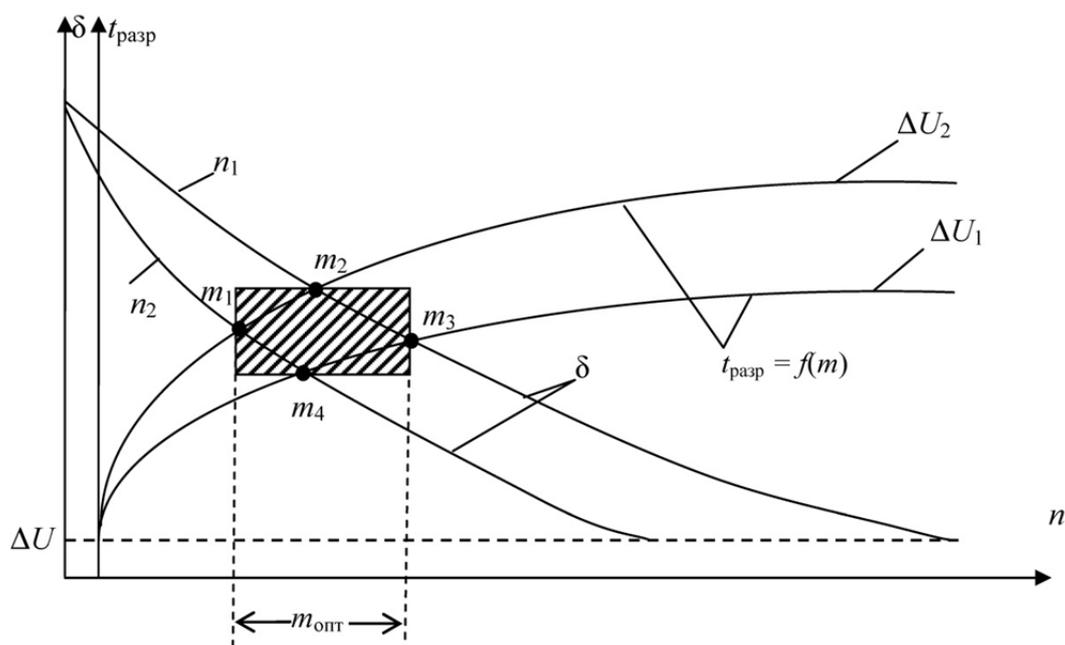


Рис. 4. Определение области выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной батареи

Окончательный выбор значения из диапазона, обозначенного на рис. 4 как  $m_{\text{опт}}$ , осуществляется на базе задаваемых изготовителем величин параметров  $\delta$  и  $t_{\text{разр}}$ , которые могут уточняться в процессе эксплуатации питаемого объекта. На основании последних значений определяется величина  $\Delta U$ , и для конкретного количества  $n$  ячеек в батарее строятся соответствующие зависимости  $\delta = f(m, n)$  и  $t_{\text{разр}} = f(m, \Delta U)$ , в области точки пересечения которых и будет находиться оптимальная величина  $m$ .

Следует отметить, что при решении ряда практических задач, когда на первый план выходят энергетические показатели, зависимость  $\delta$ , определяемая как разность между  $U_{\text{max}}$  и  $U_{\text{min}}$  заряжаемых ячеек накопителя, может быть заменена на зависимость потерь электроэнергии от числа  $m$  балансирующих циклов. В этом случае  $m_{\text{опт}}$  будет компромиссным решением между временем разряда и потерями, связанными с неэффективными циклами заряд/балансировка.

#### Эксперимент и обсуждение результатов

Представленная методика была применена для определения оптимального числа циклов «заряд/балансировка» для накопителя емкостью  $C_{\text{ном}} = 2,5$  Ач на базе 10 соединенных последовательно ячеек INR18650.

Для трех накопителей из 10 последовательно соединенных аккумуляторных ячеек производилась процедура заряда током  $I_3 = 1$  А. Для первого накопителя количество циклов балансировки  $m_1 = 3$ , для второго накопителя  $m_2 = 5$ , для третьего накопителя  $m_3 = 10$ . Время, за-

траченное на зарядный процесс для каждого накопителя:  $t_{зар1} = 3,1$  ч;  $t_{зар2} = 3,2$  ч;  $t_{зар3} = 3,5$  ч. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости напряжений при разряде током  $I_{разр} = 2,5$  А для каждого из накопителей от уровня напряжения  $U_{01} = 3,62$  В;  $U_{02} = 3,71$  В;  $U_{03} = 3,8$  В до  $U_{min} = 2,5$  В.

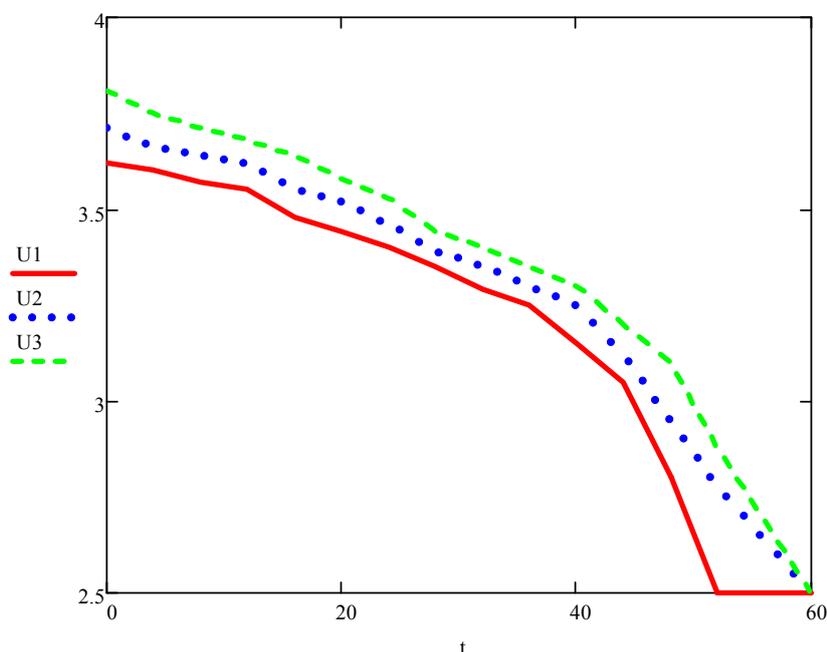


Рис. 5. Разряд многоэлементных батарей током  $I_{разр} = 2,5$  А:  $U_1$  – изменение напряжения от времени для накопителя с числом циклов балансировки  $m = 3$ ,  $U_2$  – при  $n = 5$ ,  $U_3$  – при  $n = 10$ . При этом время разряда для каждого из накопителей составило:  $t_{разр1} = 0,85$  ч;  $t_{разр2} = 0,96$  ч;  $t_{разр3} = 1$  ч. Разрядная емкость каждого из накопителей соответственно:  $C_{p1} = 2,12$  Ач,  $C_{p2} = 2,4$  Ач,  $C_{p3} = C_{ном} = 2,5$  Ач

По результатам эксперимента можно сделать вывод: количество балансировочных циклов оказывает влияние на эксплуатационные характеристики многоэлементной литий-ионной батареи. С увеличением числа балансировочных циклов  $m$  увеличивается уровень минимального напряжения среди всех ячеек и, следовательно, увеличивается время разряда многоэлементной батареи, но при этом увеличивается и время заряда накопителя. Для рассмотренной конфигурации батареи оптимальное число балансировочных циклов  $m = 5$ , так как при таком значении параметров было достигнуто оптимальное соотношение времени разряда и времени заряда накопителя  $t_{разр2}/t_{зар2} = 0,3$  при  $C_{p2} = 2,4$  Ач. Для накопителей 1 и 3:  $t_{разр1}/t_{зар1} = 0,27$  при  $C_{p1} = 2,12$  Ач и  $t_{разр3}/t_{зар3} = 0,28$  при  $C_{p3} = 2,5$  Ач.

### Заключение

Разработан алгоритм заряда батареи, состоящей из  $n$  аккумуляторных ячеек с процессом балансировки, обеспечивающий оптимальное соотношение величины разбаланса, потерь и времени заряда.

Показано, что отсутствие балансировки литий-ионных аккумуляторных батарей, применяемых в системах энергообеспечения автономных объектов, приводит к тенденции постепенного уменьшения их емкости. Напротив, ее использование обеспечивает стабильность времени разряда, улучшая эксплуатационные характеристики батарей.

Разработана методика выбора количества циклов балансировки многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи, основанная на поиске компромисса между увеличением максимального времени ее разряда, с одной стороны, и уменьшения размаха напряжений заряжаемых ячеек, с другой.

Осуществлена экспериментальная проверка предложенной методики, по результатам применения которой реализован эффективный балансировочный цикл для конкретного типа многоэлементной литий-ионной батареи.

*Библиографический список*

1. Global report on renewable energy sources international organization for the support of renewable energy REN21, 2016. – URL: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>. (дата обращения: 02.04.2017).
2. Германович, В. Альтернативные источники энергии и энергосбережение / В. Германович, А. Турилин. – СПб. : Наука и Техника, 2014. – С. 8–10
3. Бурман, А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем : учеб. пособие / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М. : МЭИ, 2012. – 336 с.
4. Wikipedia the free encyclopedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison\\_of\\_battery\\_types](https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_battery_types) (дата обращения: 18.02.2017).
5. Смоленцев, Н. И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н. И. Смоленцев // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2. – С. 176–181.
6. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery / Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, C. Guanquan, J. Sun, C. Chen // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 208. – P. 210–224.
7. Кедринский, И. А. Li-ионные аккумуляторы / И. А. Кедринский, В. Г. Яковлев. – Красноярск : Платина, 2002. – 268 с.
8. Багоцкий, В. С. Химические источники тока / В. С. Багоцкий, А. М. Скундин. – М. : Энергоиздат, 1981. – 360 с.
9. Pistoia, G. Li-Ion Batteries: Advances and Applications / G. Pistoia // Newnes. – Oxford, 2013. – 634 p.
10. Рыкованов, А. С. Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей / А. С. Рыкованов, С. С. Беляев // Компоненты и технологии. – 2014. – № 3. – С. 121–124.
11. Moore, S. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems / S. Moore, P. Schneider // Society of Automotive Engineers. – 2001. – № 1. – P. 9–13.
12. Бажинов, А. В. Система контроля заряда и разряда литий-ионных аккумуляторных батарей / А. В. Бажинов, В. Я. Двандненко, А. М. Дробинин // Вісник СевНТУ. – 2012. – № 134. – С. 52–55.
13. Иншаков, А. П. Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств / А. П. Иншаков, Ю. Б. Федотов, С. С. Десяев, Д. В. Байков // Вестник мордовского университета. – 2016. – Т. 26, № 1. – С. 40–49.
14. Пат. № 2364992 Российская Федерация. Способ сбалансированной зарядки литий-ионной или литий-полимерной батареи / Роже Пелленк. – Заявл. 10.11.2006 ; опубл. 20.08.2009, Бюл. № 23.
15. Пат. № 2411618 Российская Федерация. Способ эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи в автономной системе электропитания искусственного спутника земли / В. В. Коротких, С. Г. Кочура, М. В. Нестеришин. – Заявл. 30.11.2009 ; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4.
16. Пат. № 2496189 Российская Федерация. Способ эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи / В. В. Коротких, М. В. Нестеришин, С. И. Опенько. – Заявл. 10.11.2011 ; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29.
17. Сердечный, Д. В. Накопитель для сети Smart grid на базе литий-ионного аккумулятора / Д. В. Сердечный // ЛОМОНОСОВ-2015 : материалы Междунар. молодежного науч. форума / отв. ред. А. И. Андреев, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. – М. : МАКС Пресс, 2015. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
18. Battery Management Solutions Overview. – URL: <https://www.ti.com/lstds/ti/power-management/battery-management-products-overview.page>. (дата обращения: 02.05.2017).
19. Tarascon, J. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries / J. Tarascon, M. Armand // Nature. – 2001. – № 414. – P. 359–367.

**Сердечный Денис Владимирович**  
 аспирант,  
 кафедра системотехники,  
 Саратовский государственный технический  
 университет имени Ю. А. Гагарина  
 (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)  
 E-mail: serdechnyy.denis@gmail.com

**Serdechnyy Denis Vladimirovich**  
 postgraduate student,  
 sub-department of system engineering,  
 Saratov State Technical University  
 named after Yu. A. Gagarin  
 (77 Politekhnicheskaya street, Saratov, Russia)

**Томашевский Юрий Болеславович**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой системотехники,  
Саратовский государственный технический  
университет имени Ю. А. Гагарина  
(Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)  
E-mail: yurytomash@mail.ru

**Tomashevskiy Yuriy Boleslavovich**

doctor of technical sciences, professor,  
head of sub-department of system engineering,  
Saratov State Technical University  
named after Yu. A. Gagarin  
(77 Politekhnicheskaya street, Saratov, Russia)

---

УДК 621.314

**Сердечный, Д. В.**

**Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей /**  
Д. В. Сердечный, Ю. Б. Томашевский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. –  
№ 3 (21). – С. 115–123. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-16.