

ОСОБЕННОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ РАЗНЫХ ТИПОВ

ОАО «АК «Ригель»
Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 38,
Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

Исследована возможность параллельного соединения литий-ионных аккумуляторов разных типов для повышения импульсной мощности аккумуляторных батарей на их основе. Проведена оценка тока перетекания и перераспределения токов между параллельно соединенными аккумуляторами. Полученные зависимости экспериментально подтверждены.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, внутреннее сопротивление, ток разряда, импульсная удельная мощность.

Введение

Литий-ионные аккумуляторы получают все более широкое распространение в качестве источников питания различной электронной аппаратуры. Как известно, литий-ионные аккумуляторы, в отличие от аккумуляторов других типов, могут соединяться в параллельные цепи без применения специальных мер. Причиной этого является практическое отсутствие побочных реакций при их заряде/разряде. Параллельное соединение литий-ионных аккумуляторов с успехом используется на протяжении ряда лет в батареях различных типов, в частности в ноутбуках. При этом батарея комплектуется из аккумуляторов одной партии одного производителя, что обеспечивает близкие значения емкости, внутреннего сопротивления и сходный характер зарядно-разрядных кривых.

Целью данной работы является расширение возможностей параллельного соединения литий-ионных аккумуляторов за счет применения аккумуляторов разных типов и оценка допустимых границ отличий этих аккумуляторов по емкости, внутреннему сопротивлению и другим параметрам.

Теоретический анализ

Существует целый ряд применений, требующих от источника тока высокой удельной энергии при длительном разряде, но в то же время способных выдерживать кратковременные разрядные импульсы током, существенно превышающим длительный ток разряда. Примером такого использования аккумуляторных батарей является питание электрических двигателей [1] и др. Серийные литий-ионные аккумуляторы, предназначенные для средних режимов, как правило, рассчитаны на ток разряда до 2-3 С. Кроме того, работа при интенсивных режимах существенно сокращает срок службы этих аккумуляторов [2], а их способность вы-

держивать большие импульсные токи существенно снижается с увеличением срока эксплуатации [3, 4]. Использование для этих целей специализированных короткоразрядных аккумуляторов также не всегда оправдано по причине их более низкой удельной энергии и высокой стоимости.

Одним из возможных способов повышения импульсной удельной мощности батарей на основе литий-ионных аккумуляторов при сохранении высоких удельных характеристик и незначительном повышении стоимости является параллельное соединение средне-разрядных и короткоразрядных литий-ионных аккумуляторов.

При параллельном соединении литий-ионных аккумуляторов разных типов необходимо учитывать, что различные типы аккумуляторов помимо разных внутренних сопротивлений имеют свои зависимости напряжения разомкнутой цепи от степени заряженности из-за различия материалов положительного и отрицательного электродов [5, 6] и свои зарядно-разрядные кривые [6, 7].

Схема параллельного соединения аккумуляторов приведена на рисунке 1а. Сумма омического и поляризационного сопротивлений представляет собой полное сопротивление. Омическое сопротивление складывается из сопротивлений электродов, токопроводов и электролита. Его можно рассчитать по падению напряжения на аккумуляторе сразу после включения заданного тока нагрузки (рисунок 1б) или его отключения. Поляризационное сопротивление связано с замедленной диффузией лития в электродах аккумулятора и зависит от целого ряда факторов: температуры, тока разряда, продолжительности разряда.

¹ Румянцев Александр Михайлович, зам. нач. лаб. ОАО «АК Ригель», e-mail: rumyantsev.amr@gmail.com

² Нараев Вячеслав Николаевич, д-р хим. наук, профессор, зав. каф. технологии электрохимических производств, проректор по развитию и корпоративным связям СПбГТИ(ТУ), e-mail: naraev@lti-gti.ru

³ Агафонов Дмитрий Валентинович, канд. техн. наук, доцент, зам. заведующего каф. по научной работе каф. технологии электрохимических производств СПбГТИ(ТУ), e-mail: phti@lti-gti.ru

⁴ Березин Михаил Юрьевич, нач. НЭК-4 ОАО «АК Ригель»

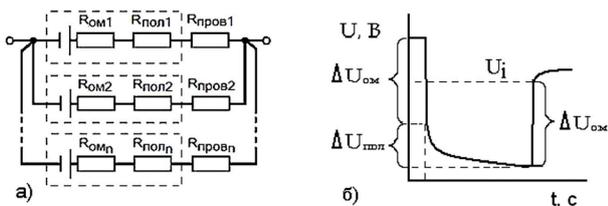


Рисунок 1. Схема параллельного соединения аккумуляторов (а) и измерение внутреннего сопротивления (б) $R_{ом}$ – омическое сопротивление, $R_{пол}$ – поляризационное сопротивление, а $R_{пров}$ – сопротивление соединительных проводов, сварных и паяных соединений.

При параллельном соединении двух литий-ионных аккумуляторов с разным внутренним сопротивлением и близкими кривыми зависимости напряжения разомкнутой цепи (НРЦ) от степени заряженности ток, протекающий, например, через аккумулятор 1 будет определяться формулой:

$$I_1 = \frac{R_{ом2} + R_{пол2} + R_{пров2}}{R_{ом1} + R_{пол1} + R_{пров1} + R_{ом2} + R_{пол2} + R_{пров2}} \cdot I_{общ} \quad (1)$$

В момент включения тока $R_{пол} = 0$ и формула несколько упрощается.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследований использовали короткоразрядный аккумулятор LP853496HC (EEMB, KHP) и среднеразрядные аккумуляторы ЛИГЦ-1,5С (ОАО «АК «Ригель»). Практическая разрядная емкость каждого из аккумуляторов при токе разряда 500 мА составила 2 Ач. Для аккумулятора каждого типа была получена зависимость НРЦ от степени заряженности путем разряда предварительно заряженных аккумуляторов на автоматическом зарядно-разрядном стенде BTS5V/2.2A (Neware, KHP). Разряд проводили ступенчато: разряд током 1 А в течение 6 минут, затем пауза 2 часа, вновь разряд и т.д. до напряжения на аккумуляторе 2,8 В. Омическое и поляризационное сопротивление определяли по падению напряжения в момент включения разрядного тока ($R_{ом}$) и через заданный промежуток времени ($R_{пол}$) (рисунок 16).

Для подтверждения выведенной зависимости была собрана схема, состоящая из одного короткоразрядного аккумулятора LP853496HC и четырех параллельно соединенных среднеразрядных аккумуляторов ЛИГЦ-1,5С. Последовательно с короткоразрядным аккумулятором и группой среднеразрядных аккумуляторов для измерения токов в ходе эксперимента были подключены шунты 75ШС 20А 75 мВ.

Заряд аккумуляторной сборки проводили током 2 А до напряжения 4,2 В и при 4,2 В до снижения тока до 500 мА. Разряд проводили током 10 А в течение одной минуты.

Результаты и обсуждение

Как показали результаты, аккумуляторы, используемые для эксперимента, обладают практически одинаковыми зависимостями НРЦ от степени заряженности (отличия не превышают 10 мВ).

Омическое сопротивление короткоразрядного аккумулятора в 4 раза ниже, чем у среднеразрядного (таблица 1). Поляризационное сопротивление при этом незначительно увеличивается с ростом тока разряда и существенно возрастает с увеличением длительности разряда. Результаты испытания аккумуляторной сбор-

ки на разряд общим током 10 А в течение 1 минуты приведены на рисунке 2.

Таблица 1. Значения внутреннего сопротивления аккумуляторов.

Аккумулятор	LP853496HC	ЛИГЦ-1,5С
Омическое сопротивление, мОм	15	60
Поляризационное сопротивление, мОм	1 А, 1 минута	23
	2 А, 1 минута	24
	1 А, 2 минуты	35
	1 А, 4 минуты	53
	5 А, 1 минута	26

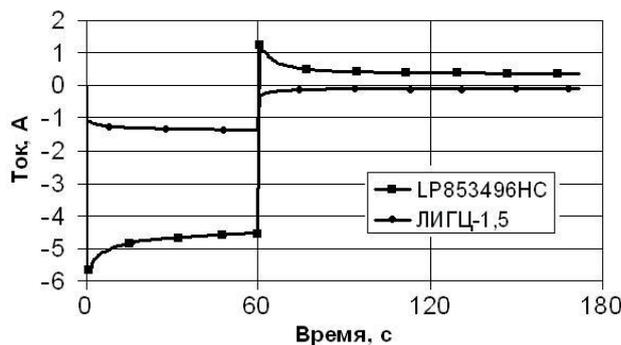


Рисунок 2. Разряд аккумуляторной сборки из аккумулятора LP853496HC и четырех аккумуляторов ЛИГЦ-1,5, соединенных параллельно.

В первоначальный момент времени разрядный ток, протекающий через короткоразрядный аккумулятор, составляет существенную долю общего тока, протекающего через сборку. Постепенно внутреннее сопротивление короткоразрядного аккумулятора возрастает и ток, протекающий через него, снижается. После отключения тока разряда короткоразрядный аккумулятор начинает подзаряжаться от среднеразрядных, так как за время разряда емкость, отданная короткоразрядным аккумулятором, заметно превышает емкость среднеразрядного аккумулятора.

Максимальный ток перетекания можно определить, зная напряжения на каждом аккумуляторе сразу после отключения тока:

$$I_n = \frac{U_2 - U_1}{R_{ом1} + R_{пров1} + R_{ом2} + R_{пров2}} \quad (2)$$

где

$$U_i = U_{нач} - I_i \cdot R_{поли} \quad (3)$$

$U_{нач}$ – напряжение до включения тока разряда (рисунок 16)

После преобразования уравнения (1) получим:

$$I_n = \frac{((R_{ом2} + R_{пол2} + R_{пров2}) \cdot R_{пол1} - (R_{ом1} + R_{пол1} + R_{пров1}) \cdot R_{пол2}) \cdot I_{общ}}{(R_{ом1} + R_{пол1} + R_{пров1} + R_{ом2} + R_{пол2} + R_{пров2}) \cdot (R_{ом1} + R_{пров1} + R_{ом2} + R_{пров2})} \quad (4)$$

Измеренные и рассчитанные значения токов разряда и перетекания приведены в таблице 2. Как показывают результаты, приведенные в таблице 2,

расчетные значения отличаются от экспериментальных менее, чем на 15 %.

Таблица 2. Измеренные и рассчитанные значения начальных и конечных токов разряда и тока перетекания. Общий ток разряда 10 А, продолжительность разряда 1 минута.

Параметр	Значение			
	Короткоразрядный аккумулятор		Среднеразрядный аккумулятор	
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
Начальный ток разряда, А	5,7	5,4	1,1	1,2
Конечный ток разряда, А	4,5	4,0	1,4	1,5
Ток перетекания, А	1,3	1,4	0,32	0,34

Максимальное значение тока перетекания, наблюдающееся сразу после выключения разрядного тока для короткоразрядного аккумулятора не превысило 1,3 А, что составляет 0,65 С. При увеличении длительности разряда ток перетекания также возрастет.

Заключение

Экспериментально доказана возможность параллельного соединения литий-ионных аккумуляторов разных типов для повышения импульсной мощности аккумуляторных батарей на их основе. При заряде токами более 1 С ресурс литий-ионных аккумуляторов заметно снижается [8], поэтому для обеспечения длительного срока службы аккумуляторов при их параллельном соединении необходимо, чтобы ток перетекания не превышал эту величину.

Литература

1. *Smith K., Wang C.* Solid-state diffusion limitations on pulse operation of a lithium ion cell for hybrid electric vehicles. // J. of Power Sources. 2006. V. 161. № 2. P. 628-639.
2. *Ning G., Haran B., Popov B.* Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. // J. of Power Sources. 2003. V. 117. № 1-2. P. 160-169.
3. *Zhang D., Haran B.S., Durairajan A. [et al].* Studies on capacity fade of lithium-ion batteries. // J. of Power Sources. 2000. V. 91. № 2. P. 122 - 129.
4. *Shim J., Striebel K.* Characterization of high-power lithium-ion cells during constant current cycling Part I. Cycle performance and electrochemical diagnostics. // J. of Power Sources. 2003. V. 122. № 2. P. 188-194.
5. *Cousseau J., Siret C., Biensan P., Broussely M.* Recent developments in Li-ion prismatic cells. // J. of Power Sources. 2006. V. 162. № 2. P. 790-796.
6. Handbook of Batteries / Edited by *Linden D., Reddy T.B.* Mc Graw-Hill, 2004. 1195 p.
7. *Nohma T., Kurokawa H., Takahashi M., Nishio K., Saito T.* Electrochemical characteristics of LiNiO₂ and LiCoO₂ as a positive material for lithium secondary batteries. // J. of Power Sources. 1995. V. 54. № 2. P. 522-524.
8. *Choi S., Lim H.* Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂. // J. of Power Sources. 2002. V. 111. № 1. P. 130-136.