

В настоящее время литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO<sub>4</sub>, LFP) относятся к наиболее востребованным типам ЛИА. Так, применение в системах оперативного постоянного тока (СОПТ) батарей на базе LFP-аккумуляторов может быть целесообразным решением для энергообъектов практически всех классов напряжения.

Алексей Николаевич Ворошилов и Андрей Николаевич Петров уточняют критерии подбора LFP-аккумуляторов в батарею, чтобы снизить разброс их параметров и сделать АКБ максимально эффективной.

## РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

### Влияние на работу аккумуляторной батареи



**Алексей  
Ворошилов,**  
директор  
ООО НТЦ  
«Энергетика»  
г. Новосибирск

**Андрей  
Петров,**  
генеральный  
директор  
ООО НАЗ «РОСток»

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) сегодня являются одним из наиболее перспективных химических источников тока с точки зрения использования их в качестве накопителей электроэнергии.

В связи с постоянным снижением стоимости, ЛИА становятся всё более популярными в различных областях промышленности и энергетики. Например в таких областях, как электро-транспорт и системы накопления энергии для изолированных энергосистем, им практически нет альтернативы, поскольку по многим параметрам ЛИА значительно превосходят традиционные свинцово-кислотные аккумуляторы. За рубежом вполне обыденным явлением стал массовый переход на ЛИА во многих отраслях техники. Так, в Китае оборудование резервного питания базовых станций сотовой связи на вновь вводимых объектах работает практически только от ЛИА.

В некоторых областях энергетики, например в системах оперативного постоянного тока (СОПТ), литий-ионные батареи используются пока незначительно, но и здесь у них есть серьезный потенциал для развития. По мнению авторов, один из основных факторов, ограничивающих использование ЛИА в России, – малая информированность большинства непрофильных специалистов об особенностях их эксплуатации. С этой точки зрения данная статья является продолжением попыток рассмотреть особенности технической эксплуатации ЛИА с целью пропаганды их использования среди представителей инженерного сообщества.

Непосредственным поводом для написания статьи стал цикл совещаний с производителями и потребителями ЛИА. Дело в том, что поскольку ЛИА используются в системах накопления энергоемкостью до единиц МВт·ч, аккумуляторные батареи (АКБ), входящие в состав таких систем, зачастую состоят из сотен последовательно соединенных аккумуляторов. При этом разброс параметров отдельных аккумуляторов существенно влияет на работу АКБ в целом.

Однако в настоящее время еще не выработаны математически обоснованные критерии допустимой величины разброса параметров аккумуляторов, а это очень важный показатель, непосредственно влияющий на работоспособность аккумуляторной батареи.

По-видимому, это связано с тем, что, с одной стороны, традиционные аккумуляторы (свинцово-кислотные, щелочные) в составе батарей ведут себя не совсем так, как литий-ионные, и разброс параметров для них менее критичен. С другой стороны, традиционные аккумуляторы ранее почти не использовались в циклическом режиме, который подразумевает многократные циклы заряда и разряда батареи. А именно в таких режимах влияние разброса параметров отдельных аккумуляторов наиболее заметно.

В статье анализируются свойства литий-железо-фосфатных (LFP) аккумуляторов. В настоящее время именно эти аккумуляторы из всех ЛИА получили наибольшее распространение (исходя из подсчета произведенных в мире ампер-часов).

Это обусловлено рядом причин. Во-первых, LFP-аккумуляторы – единственные ЛИА, абсолютно безопасные с точки зрения способности к возгоранию. Во-вторых, они имеют наилучшее соотношение цены и качества. В-третьих, в связи с тем, что лидеры рынка перешли на производство литий-железо-фосфатных аккумуляторов с добавлением допантов (технология LFP+), это существенно улучшило их энергетические характеристики.

Ранее в работе [1] анализировались общие свойства ЛИА. Аккумулятор был рассмотрен как активный двухполюсник, и на этой основе была разработана математическая модель процесса заряда АКБ, состоящей из аккумуляторов, имеющих разброс параметров. Полученные результаты позволили оптимизировать процесс заряда АКБ и ее работу в режиме поддерживающего заряда таким образом, что для литий-ионных АКБ стал достижим срок службы 15 лет и более (что важно, например, для использования их в составе СОПТ).

Однако последующий анализ показал, что для циклического режима работы батареи данная модель является неполной, так как не учитывает процессы, обусловленные разностью потерь энергии отдельных аккумуляторов при заряде и разряде АКБ большими токами (1С и более<sup>1</sup>). Ниже сделана попытка устранить этот пробел. Полученные результаты позволили уточнить критерии подбора ЛИА в АКБ, предназначенную для работы в циклическом режиме.

#### МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Различные эквивалентные схемы аккумулятора (независимо от типа его электрохимии) обсуждались в ряде работ. Авторы полагают, что наиболее полный обзор публикаций на эту тему представлен в [2, 3, 4].

На рис. 1 представлена эквивалентная схема, которая наиболее адекватно описывает поведение аккумулятора при его заряде/разряде, определенное экспериментально. Таким образом, напряжение на аккумуляторе определяется напряжением разомкнутой цепи, поляризационным потенциалом и падением напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора при протекании через него электрического тока.

При определении внутреннего сопротивления аккумулятора нужно учитывать некоторые нюансы. Еще раз рассмотрим эквивалентную схему, представленную на рис. 1. Как показали измерения, постоянная времени  $\tau_1 = R_1 \cdot C_1$  составляет не более 10–100 мс.

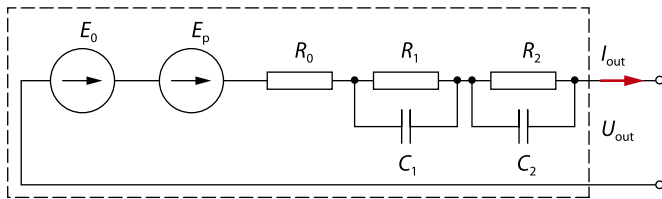
Величины  $R_0$  и  $R_1$  определяют величину внутреннего сопротивления  $R_{int}$ , которую производители традиционных аккумуляторов приводят в спецификациях на свою продукцию<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> 1С соответствует силе тока, при которой полностью заряженный аккумулятор разряжается за один час, соответственно 2С – за 0,5 часа, и т.д.

<sup>2</sup> Использующийся при этом метод измерения обозначают как метод DC – измерение внутреннего сопротивления методом постоянного тока ( $R_{DC}$ ).

## Эквивалентная схема аккумулятора

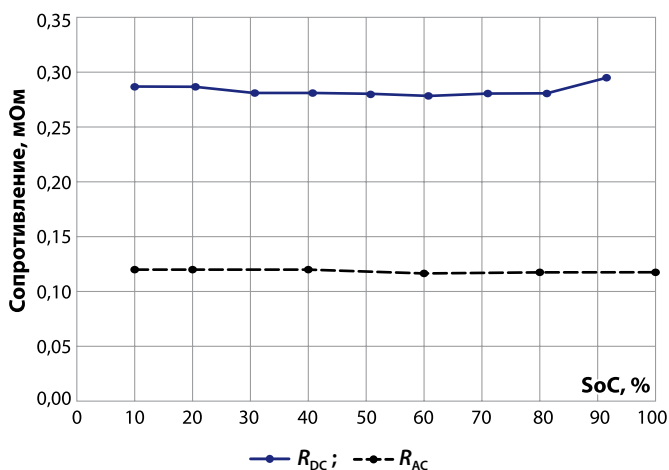
Рис. 1 •



- $E_0$  – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора;  
 $E_p$  – поляризационный потенциал;  
 $R_0$  – суммарное омическое сопротивление контактов, материала электродов и т.п.;  
 $C_1$  – электрическая емкость двойного слоя электрод – электролит;  
 $R_1$  – сопротивление переносу заряда на границе электрод – электролит;  
 $C_2$  – электрическая емкость, определяемая градиентом напряженности электрического поля в веществе электролита при протекании через него электрического тока;  
 $R_2$  – сопротивление, определяемое конечностью значения коэффициента диффузии ионов лития в веществе электролита.

Зависимость внутреннего сопротивления  $R_{int}$  аккумулятора от степени заряженности

Рис. 2 •



$R_{int}$  определяется здесь как отношение глубины провала напряжения на аккумуляторе при подаче на аккумулятор ступенчатого тока [5]. При этом  $R_{int} = R_0 + R_1$ . Значение  $R_{int}$  определяет ток, который способен выдать аккумулятор при внешнем металлическом КЗ на его борнах.

В отличие от этого, производители ЛИА в спецификациях часто приводят величину внутреннего сопротивления, измеренного на частоте 1 кГц<sup>3</sup>. При этом  $R_{int} = R_0$ .

Постоянная времени  $\tau_2 = R_2 \cdot C_2$  составляет десятки минут и определяет время релаксации аккумулятора при снятии или подаче на него нагрузки.

Как показали измерения, внутреннее сопротивление аккумулятора, измеренное любым способом, слабо зависит от степени его заряженности. На рис. 2 представлена типичная зависимость измеренного разными способами внутреннего сопротивления LFP-аккумулятора емкостью 380 А·ч от степени его заряженности (SoC). Для большинства аккумуляторов изменение величины внутреннего сопротивления от SoC не превосходит 10–20% в диапазоне SoC от 10 до 90%.

Нас будет интересовать сопротивление  $R_{int} = R_0 + R_1$ . Поскольку вклад разброса значений внутреннего сопротивления в процесс разбалансировки аккумуляторной батареи будет максимальным при больших токах и малом времени разряда, влиянием сопротивления  $R_2$  можно пренебречь. ▶

<sup>3</sup> Используемый при этом метод измерения обозначают как метод АС – измерение внутреннего сопротивления методом переменного тока ( $R_{AC}$ ).

## Группа компаний «Азимут»



(383) 254-61-59  
 info@ess-azimut.ru  
 www.ess-azimut.ru

## ООО «Азимут»

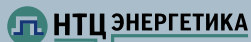
Производство и поставка  
 электротехнического  
 оборудования



+7 (913) 924-10-97  
 info@rostok-naz.ru

## ООО НАЗ «РОСток»

Производство  
 литий-ионных аккумуляторов



+7 (913) 484-63-41  
 info@essntc.ru  
 www.essntc.ru

## ООО НТЦ «Энергетика»

Разработка и продвижение решений  
 с использованием литий-ионных  
 аккумуляторных батарей (ЛИАБ)

ГК «Азимут» реализует проект локализации на территории РФ производства литий-ионных аккумуляторов по технологии LFP+ одного из ведущих мировых производителей.

В рамках проекта сегодня доступна линейка российских аккумуляторов, изготовленных по техусловиям ГК «Азимут» на линиях технологического партнера.

В ближайшем будущем планируется довести объем производства до 10 млн А·ч в год с локализацией в г. Новосибирске.

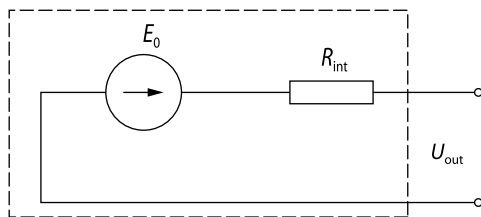


## ПРОДУКТЫ И РЕШЕНИЯ

- **Накопители энергии:**
  - для электротранспорта (троллейбуса с увеличенным автономным ходом);
  - для клининговой техники;
  - для внутризаводского транспорта;
  - для локальных объектов с использованием солнечных панелей.
- **Литий-ионные аккумуляторные батареи (ЛИАБ):**
  - для источников бесперебойного питания;
  - для систем оперативного тока (длительная эксплуатация в режиме поддерживающего заряда, методика выбора параметров);
  - для систем электропитания телекоммуникационного оборудования напряжением 48 В и емкостью до 1600 А·ч.
- **Системы хранения энергии модульного типа** энергоемкостью до 460 кВт·ч.
- **Гибридная солнечная станция** для работы как совместно с сетью, так и автономно.
- **Решения по профильной тематике** согласно техническому заданию заказчика.

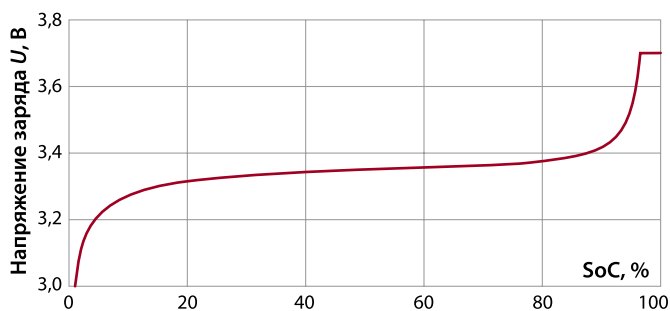


► **Рис. 3** Упрощенная эквивалентная схема аккумулятора

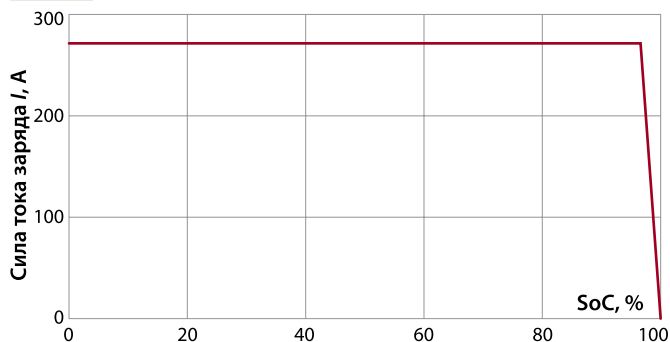


$E_0$  – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора;  
 $R_{int} = R_0 + R_1$  – внутреннее сопротивление.  
 Влиянием поляризационного потенциала в данном случае пренебрегаем.

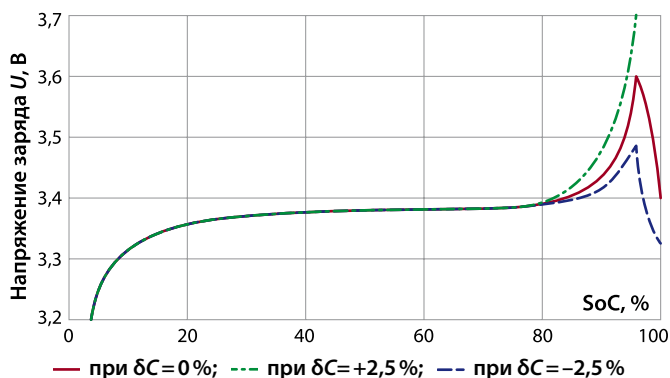
► **Рис. 4** Типичная зависимость напряжения при заряде



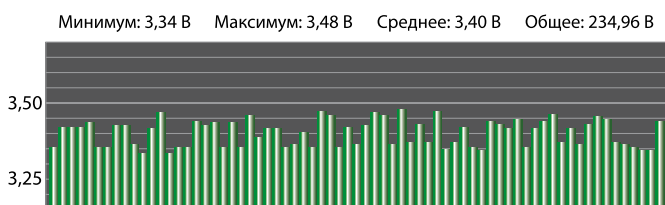
► **Рис. 5** Типичная зависимость тока при заряде



► **Рис. 6** Зависимость напряжения на аккумуляторах с разной емкостью от степени заряда



► **Рис. 7** Напряжение отдельных аккумуляторов в режиме поддерживающего заряда



Между величиной внутреннего сопротивления, измеренной методом DC, и величиной внутреннего сопротивления, измеренной методом AC, существует довольно простая зависимость. Как показали измерения, для большинства литий-железо-фосфатных аккумуляторов можно считать, что  $R_{DC} \approx 2 \div 2,5 \cdot R_{AC}$ , или  $R_0 + R_1 \approx 2 \div 2,5 \cdot R_0$ .

Для анализа влияния разброса величин внутреннего сопротивления на разброс потерь в цикле заряда/разряда в аккумуляторной батарее достаточно использовать упрощенную эквивалентную схему аккумулятора (рис. 3).

### ТРЕБОВАНИЯ К РАЗБРОСУ ПАРАМЕТРОВ АККУМУЛЯТОРОВ В АКБ

Требования к разбросу параметров литий-ионных аккумуляторов в батарее определяются режимом ее работы. Наиболее жесткие требования к разбросу параметров предъявляются в том случае, если батарея работает в циклическом режиме при больших токах заряда и разряда.

При этом разброс значений емкости аккумуляторов будет ограничивать величину степени заряженности, до которой может быть заряжена аккумуляторная батарея, а это напрямую влияет на доступную к использованию емкость АКБ.

Разброс величин внутреннего сопротивления влияет на разбалансировку АКБ и, соответственно, на длительность ее последующей балансировки, поскольку батарее, в которой разные аккумуляторы имеют существенно разную степень заряженности, эксплуатировать нельзя.

### Требования к разбросу значений емкости аккумуляторов

Как правило, процесс заряда аккумуляторной батареи происходит в два этапа. На первом этапе поддерживается режим заряда током постоянной величины (CC – Constant Current), при этом величина напряжения на батарее постепенно растет. При достижении напряжением определенной величины происходит переход в режим заряда постоянным напряжением (CV – Constant Voltage). Ток заряда при этом постепенно спадает.

Схематично этот процесс показан на рис. 4 и 5. Здесь и далее по оси абсцисс отложена степень заряженности (SoC) аккумуляторной батареи. Как правило, для литий-железо-фосфатных аккумуляторов производители рекомендуют ограничивать напряжение перехода в режим CV (напряжение заряда) величиной 3,7 В.

Очевидно, что доступная емкость батареи ограничена минимальной емкостью самого слабого аккумулятора, соответственно эффективность использования АКБ снижается при росте разброса емкостей аккумуляторов в батарее.

Этот вопрос подробно рассматривался в [1], где моделировалась работа АКБ в режиме заряда с учетом разброса емкости. Было показано, что в связи с тем, что зарядная характеристика литий-железо-фосфатных аккумуляторов имеет существенно нелинейный характер, при приближении степени заряженности к 100% происходит нелинейный рост напряжения на аккумуляторе, имеющем наименьшую емкость относительно других аккумуляторов. Из-за этого невозможно заряжать АКБ напряжением, соответствующим среднему напряжению на единичном аккумуляторе 3,7 В.

Типичный график зависимости значений напряжения на аккумуляторах АКБ, имеющих различную емкость (отклонение емкости –  $\delta C$ ), от степени заряда представлен на рис. 6. Видно, что процесс заряда батареи должен быть остановлен при степени заряженности заметно ниже 100%.

На основании сделанных расчетов была дана рекомендация снизить среднюю величину напряжения заряда на аккумуляторе примерно до 3,43–3,45 В и после достижения степени заряженности 100% прекратить дальнейший заряд. При этом несколько увеличивается время заряда.

К сожалению, этим не ограничивается негативное влияние разброса емкостей. При эксплуатации батареи при степени заряженности, близкой к 100%, аккумуляторы, имеющие меньшую емкость, будут находиться под большим напряжением. Было установлено, что длительная эксплуатация при таком напряжении в режиме поддерживающего заряда негативно сказывается на времени службы батареи.

На рис. 7 представлена типичная гистограмма напряжения аккумуляторов батареи, эксплуатирующейся в режиме под-

держивающего заряда при степени заряженности, близкой к 100%. Видно, что напряжение на отдельных аккумуляторах достигает 3,48 В, что крайне нежелательно с точки зрения времени службы аккумулятора.

На основании изложенного можно утверждать, что важно минимизировать разброс емкости аккумуляторов в батарее.

**Требования к разбросу значений внутреннего сопротивления**

Разброс величин внутреннего сопротивления аккумуляторов приводит к тому, что и при заряде, и при разряде внутри разных аккумуляторов рассеивается разное количество энергии, что ведет к росту разброса степени заряженности аккумуляторов в батарее при ее циклировании. При этом нужно учесть, что негативное влияние данного эффекта квадратично растет при увеличении токов заряда (разряда):

$$P_{loss} = R_{int} \cdot I^2, \tag{1}$$

где:  $P_{loss}$  – мощность потерь;  $R_{int}$  – внутреннее сопротивление;  $I$  – ток заряда или разряда.

Анализ показывает, что данный эффект существенен при токах заряда или разряда 0,5С и выше.

Кроме того, необходимо принять во внимание, что для оценки величины разбалансировки нужно использовать значение внутреннего сопротивления, измеренное методом постоянного тока.

**Пример**

Рассмотрим два аккумулятора одной АКБ, имеющих одинаковую емкость, но разное внутреннее сопротивление.

В качестве примера возьмем партию аккумуляторов, выпущенную российским производителем для реализации одного из проектов. Минимальное значение  $R_{DC}$  составляет 0,4 мОм, максимальное – 0,74 мОм.

Примем следующие условия для расчета:

- начальная степень заряженности всех аккумуляторов АКБ равна 100% (батарея полностью сбалансирована и заряжена);
- емкость каждого аккумулятора АКБ равна 270 А·ч (аккумуляторы имеют нулевой разброс значений емкости).

**Проанализируем процесс разряда** батареи током 270 А (1С) до степени заряженности SoC = 0% (глубина разряда DoD = 100%) и последующего заряда током 270 А (1С) до SoC = 100% двух аккумуляторов, имеющих внутреннее сопротивление ( $R_{int}$ ) 0,4 и 0,74 мОм.

При разряде током  $I$  зависимость остаточной энергии в аккумуляторе от времени определяется следующим выражением:

$$E(t) = E_0 - \int U(t) \cdot I(t) \cdot dt - \int R_{int} \cdot I(t)^2 \cdot dt, \tag{2}$$

где  $E_0$  – энергоемкость аккумулятора, Вт·ч;  $U(t)$  – напряжение на аккумуляторе, В;  $I(t)$  – ток разряда аккумулятора, А;  $t$  – время разряда, ч;  $R_{int}$  – внутреннее сопротивление, Ом.

Первый интеграл в правой части определяет энергию, отданную в нагрузку, второй интеграл – тепловые потери энергии на внутреннем сопротивлении. Расчеты удобно вести не во временных, а в относительных координатах SoC или DoD (DoD=100% – SoC).

Учитывая, что разряд ведется током постоянной величины  $I_0$ , а напряжение на аккумуляторе слабо изменяется на протяжении всего цикла разряда, допустимо принять следующее упрощение:

$$\frac{E(t)}{E_0} \approx \text{SoC}.$$

При этом выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$E(\text{DoD}) = 100\% - \frac{1}{E_0} \cdot (I_0 \cdot \int U(\text{DoD}) \cdot d\text{DoD} + R \cdot I_0^2 \cdot \int d\text{DoD}). \tag{3}$$

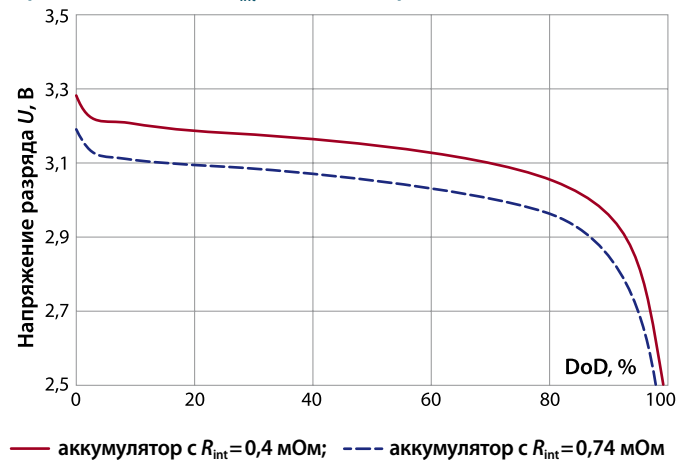
Здесь энергия определяется в % от номинальной энергоемкости, мощность – в Вт, ток в А, сопротивление в Ом, DoD – в %.

На рис. 8 представлена зависимость напряжения на аккумуляторах, имеющих разное внутреннее сопротивление.

Поскольку ток разряда имеет постоянную величину, потери энергии внутри аккумуляторов при разряде растут линейно. На рис. 9 показана зависимость потерь энергии при разряде аккумуляторов до DoD = 100%.

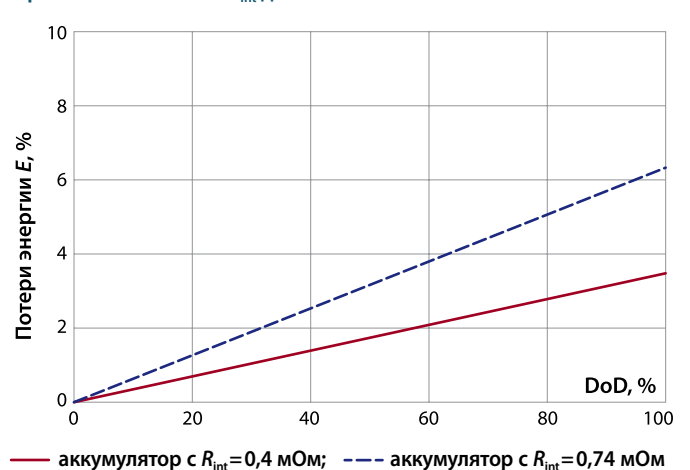
**Зависимость напряжения на аккумуляторах с разным значением  $R_{int}$  от степени заряженности**

**Рис. 8**



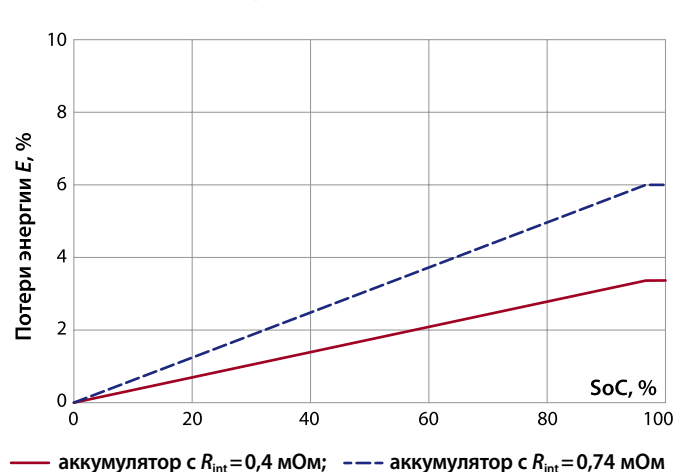
**Потери энергии при разряде аккумуляторов с разным значением  $R_{int}$  до DoD = 100%**

**Рис. 9**



**Потери энергии при заряде аккумуляторов с разным значением  $R_{int}$  до SoC = 100%**

**Рис. 10**



При этом за цикл разряда один из аккумуляторов отдаст энергии на 6,2% меньше номинальной энергии батареи, другой – меньше на 3,3%, и в конце цикла разряда появляется разница в степени заряженности у двух аккумуляторов, равная 2,9%.

**Проанализируем процесс заряда батареи.** В этом случае будут происходить примерно такие же процессы, но нужно учитывать более сложный характер кривой тока: заряд идет в два этапа – сначала в режиме CC, затем в режиме CV. На рис. 10 показана зависимость потерь энергии от времени при заряде аккумуляторов до SoC = 100%.

• **Таблица 1** Параметры аккумуляторов разных производителей

Производитель	1	2
Страна	Россия	Китай
Тип электрохимии	LFP	LFP+
Емкость номинальная, А·ч	250	100
Напряжение номинальное, В	3,2	3,2
Размеры (ДхШхВ), мм	150x105x335	126x46x233
Вес, кг	8,9	2,3
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	89,9	139,1
Величина партии, шт.	3990	3942
Год реализации проекта	2019	2020

• **Таблица 2** Сравнение разброса параметров партий аккумуляторов разных производителей

Производитель	1	Сравнение	2
Емкость номинальная, А·ч	250		100
Емкость (среднее значение), А·ч	271,3		102,0
Нормированный разброс емкости* $\sigma C/C_{cp}$	3,5%	> 3,9	0,9%
Сопротивление среднее**, мОм	0,215		0,250
Нормированный разброс сопротивления $\sigma R/R_{cp}$	25%	> 5,7	4,4%

\* Параметры определялись с помощью встроенных функций Excel, примененных ко всем аккумуляторам партии. В случае нормального распределения 99% величин выборки лежат в диапазоне  $\pm 3\sigma$ . Величина  $\sigma C/C_{cp}$  означает, что 99% аккумуляторов лежат в диапазоне разброса значений емкости  $\pm 10,5\%$ .

\*\* Измеренное методом АС.

• **Рис. 11** Нормированный разброс значений емкости сравниваемых аккумуляторов



• **Рис. 12** Нормированный разброс значений внутреннего сопротивления сравниваемых аккумуляторов



В конце цикла разряда появляется дополнительная разница в степени заряженности аккумуляторов, равная 2,8%.

Таким образом, в изначально полностью сбалансированной батарее только за один цикл заряда/разряда появляется разброс степени заряженности, равный  $2,9 + 2,8 = 5,7\%$ . За несколько циклов заряда/разряда батарея будет полностью разбалансирована и должна быть остановлена на балансировку, либо необходимо будет существенно снижать ток заряда и разряда.

Кроме того, в такой ситуации нужно применять мощную систему балансировки. Например, если максимальный ток балансировки составляет 4,5 А, то через один цикл заряда/разряда потребуется балансировка батареи в течение 3–4 часов.

Учитывая, что стандартный ток балансировки у большинства систем управления батареей (BMS, Battery Management System) составляет 0,3–0,5 А, такие BMS вообще нельзя применять для данной батареи, потому что большую часть времени батарея будет балансироваться.

Итак, наличие большого разброса значений внутреннего сопротивления аккумуляторов батареи приводит к следующим негативным последствиям:

- снижение доступной к использованию емкости батареи, причем тем больше, чем больше токи заряда и разряда;
- снижение допустимого тока заряда и разряда;
- снижение коэффициента готовности батареи (требуется длительная балансировка после каждого цикла);
- необходимость применения более дорогой системы управления батареей (BMS) с высокими токами балансировки и, как следствие, большая потеря энергии на балансировку;
- снижение КПД батареи;
- вероятность аварийного отключения батареи при заряде/разряде большими токами вследствие выхода напряжения на отдельных аккумуляторах за допустимые пределы.

Важно отметить, что негативное влияние разброса параметров литий-ионной батареи прямо пропорционально величине этого разброса.

#### АККУМУЛЯТОРЫ РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ: СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Был проведен анализ разброса параметров двух партий аккумуляторов различных производителей, поставленных в рамках реализации реальных коммерческих проектов производства систем накопления энергии. Первая партия была изготовлена и поставлена российским производителем литий-ионных аккумуляторов в 2019 г., вторая – зарубежным (китайским<sup>4</sup>) производителем в 2020 г.

Номинальные параметры аккумуляторов разных производителей приведены в таблице 1. Для анализа специально были выбраны партии аккумуляторов примерно одинаковой величины с достаточно большой выборкой (по несколько тысяч штук в каждой).

Анализ разброса параметров аккумуляторов представлен в таблице 2. Значения емкости и внутреннего сопротивления были представлены производителями в паспортах на поставку. Внутреннее сопротивление измерялось методом переменного тока.

В связи с тем, что значение внутреннего сопротивления, измеренное методом переменного тока, коррелирует со значением внутреннего сопротивления, измеренного методом постоянного тока, с высокой степенью вероятности можно утверждать, что разброс значений  $R_{int}$  не зависит от метода измерения.

На рис. 11 и 12 представлены гистограммы распределения значений емкости и внутреннего сопротивления сравниваемых аккумуляторов. Количество аккумуляторов в каждом измеряемом интервале значений разброса параметров нормировано относительно общего количества аккумуляторов в партии, значения разброса параметров нормированы относительно среднего значения данного параметра (емкость, сопротивление) в партии.

<sup>4</sup> Именно Китай сегодня является мировым лидером по производству литий-железо-фосфатных аккумуляторов. Китайские производители освоили технологию допирования активного вещества положительного электрода специальными добавками (технология LFP+), что позволило существенно улучшить удельные характеристики аккумулятора.

Общее количество аккумуляторов в каждой партии и условия поставки были практически одинаковы.

Видно, что по разбросу емкости аккумуляторы зарубежного производителя лучше в 3,9 раз, по разбросу сопротивления – в 5,7 раз, то есть значительно превосходят по качеству аккумуляторы отечественного производства.

### ВЫВОДЫ

Разброс параметров литий-ионных аккумуляторов напрямую влияет на качество аккумуляторной батареи. Под качеством здесь понимается интегральная характеристика, характеризующая как потребительские свойства оборудования (доступные технические параметры), так и затраты на его эксплуатацию.

Разброс значений емкости снижает доступную для циклирования емкость АКБ, которая будет определяться емкостью самого слабого аккумулятора. Кроме того, самые слабые аккумуляторы будут эксплуатироваться при повышенном напряжении. Это приводит к их ускоренной деградации, что было зафиксировано в некоторых проектах. К тому же увеличивается длительность заряда АКБ.

Разброс значений внутреннего сопротивления определяет разницу в потерях энергии аккумуляторов в течение цикла заряд/разряд, что в свою очередь ведет к следующим негативным последствиям:

- снижение коэффициента готовности АКБ (увеличение периода балансировки, во время которого батарея не может циклироваться);
- снижение допустимого тока заряда и разряда;
- необходимость применения более дорогой системы управления батареи с высокими токами балансировки, что ведет к дополнительным потерям энергии;
- снижение КПД батареи в цикле заряда/разряда;
- вероятность аварийного отключения батареи при заряде/разряде большими токами из-за выхода напряжения на аккумуляторах за допустимые пределы.

Одним из главных факторов, ограничивающих эффективность литий-ионной аккумуляторной батареи, является разброс параметров аккумуляторов. Увеличение разброса параметров аккумулятора пропорционально увеличивает его негативное влияние.

Продукция российского производителя литий-ионных аккумуляторов по этому показателю проигрывает продукции зарубежного:

- по емкости – в 3,9 раза;
- по внутреннему сопротивлению – в 5,7 раза.

При формировании АКБ крайне важно минимизировать разброс параметров. Для батарей, работающих в циклическом режиме, особенно важно уменьшить разброс значений внутреннего сопротивления.

В качестве целевых параметров можно предложить:

- разброс значений емкости – не более  $\pm 2-3\%$ ;
- разброс значений внутреннего сопротивления – не более  $\pm 15\%$ .

Предложенные критерии позволяют подобрать литий-ионные аккумуляторы с оптимальными параметрами, чтобы сформировать эффективную АКБ для работы в циклическом режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошилов А.Н., Петров А.Н., Чудинов Е.А. Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима заряда // Новости ЭлектроТехники. 2017. № 2(104)–3(105). С. 44–49.
2. Chen M., Rincon-Mora G.A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V performance // IEEE Transaction on Energy Conversion. V. 21, no. 2. June 2006.
3. Albér G. Ohmic Measurements: the History and the Facts. <https://docplayer.net/21270768-Ohmic-measurements-the-history-and-the-facts.html>.
4. Handbook for Stationary Lead-Acid Batteries. Part 1: Basics, Design, Operation Modes and Applications. Ed. 3. Exide Technologies, 2008.
5. ГОСТ Р МЭК 896-1-95 Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытания. Часть 1. Открытые типы. ■



141981, Россия, МО,  
г. Дубна, ул. Школьная, д.10а  
тел./факс: +7 (496) 219-88-00/01  
коммерческая служба:  
тел.: +7 (496) 219-88-48  
e-mail: ks@techno-com.ru

## ГАРАНТИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ



### Системы постоянного тока

- Аппараты управления оперативным током серии АУОТ-М «Дубна» (АУОТ)
- Преобразователи напряжения зарядно-подзарядные серии ПНЗП-М «Дубна» (ПНЗП)
- Щит постоянного тока до 160 А серии ШВСП-М «Дубна» (ЩПТ)
- Щит постоянного тока до 1600 А серии ШВСП-М «Дубна» (ЩПТ)

### Системы переменного тока

- Системы бесперебойного питания серии СБП «Дубна» (СБП)
- Источники бесперебойного питания серии «Синус» (ИБП)

### Отдельные устройства

- Устройства защиты распределительных сетей серии УЗРС 6–10 кВ «Дубна» (УЗРС)
- Устройства стабилизации постоянного напряжения серии УСТП (УСТП)

### Системы в блок-контейнерах

- Устройства гарантированного питания серии УГП «Дубна» (УГП)
- Комбинированные установки резервного электроснабжения серии КУРЭ «Дубна» (КУРЭ)

сертифицировано:

ПАО «ГАЗПРОМ»,  
ПАО «ТРАНСНЕФТЬ»,  
ПАО «НК «РОСНЕФТЬ»,  
ПАО «РОССЕТИ»,  
ГОСТ Р

ЗАО «МПОТК «ТЕХНОКОМПЛЕКТ» осуществляет:

- разработку, производство, обслуживание систем гарантированного энергоснабжения
- научно-исследовательские работы
- опытно-конструкторские работы
- проектно-изыскательские работы
- строительные-монтажные работы
- пусконаладочные работы
- шефмонтажные и шефналадочные работы

