Влияние разброса параметров литий-ионных аккумуляторов на работу аккумуляторной батареи

Некоторые сокращения

АКБ	–	Аккумуляторная батарея
AC	–	Alternative current – переменный ток
CC	–	Constant Current – зарядка током постоянной величины
CV	–	Constant Voltage – зарядка напряжением постоянной величины
DC	–	Direct Current – постоянный ток
DOD	–	Depth of Discharge – глубина разрядки
SOC	–	State of Charge – степень заряженности

1. Требования к разбросу параметров аккумуляторов в аккумуляторной батарее

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 (или) разряда. При этом разброс величин емкостей аккумуляторов будет ограничивать величину степени заряженности, до которой может быть заряжена аккумуляторная батарея, что напрямую влияет на доступную к использованию емкость аккумуляторной батареи (далее – АКБ), а разброс величин внутреннего сопротивления влияет на ее разбалансировку.

1.1. Требования к разбросу емкостей аккумуляторов

Как правило, зарядка аккумуляторной батареи происходит в два этапа. На первом этапе поддерживается режим заряда током постоянной величины (CC), при этом величина напряжения на батарее постепенно растет. При достижении напряжения определенной величины, происходит переход в режим заряда постоянным напряжением (CV) при этом ток зарядки постепенно спадает. Схематично этот процесс показан на рисунке 1 и 2. 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 зарядки) величиной 3,7 В.

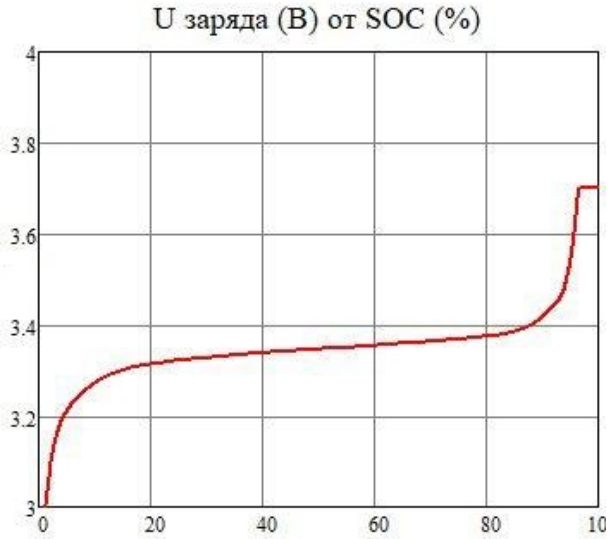

Рисунок 1 – типичная зависимость напряжения при зарядке

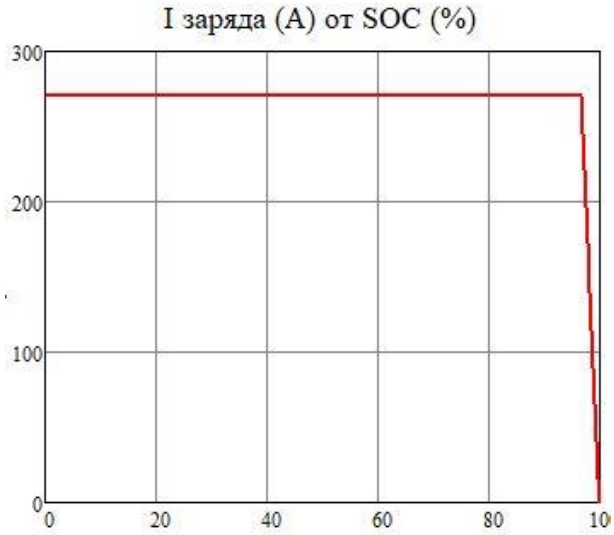

Рисунок 2 – типичная зависимость тока при зарядке

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

Этот вопрос подробно рассматривалась в [1], где моделировалась работа аккумуляторной батареи в режиме зарядки с учетом разброса емкости. Было показано, что в связи с тем, что зарядная характеристика литий-железо-фосфатных аккумуляторов имеет существенно нелинейный характер, при приближении к степени заряженности 100 % происходит нелинейный рост напряжения на аккумуляторе, имеющем наименьшую емкость относительно других аккумуляторов.

Из-за этого невозможно заряжать аккумуляторную батарею напряжением, соответствующим среднему напряжению на единичном аккумуляторе 3,7 В. Типичный график зависимости напряжений на аккумуляторах батареи представлен на рисунке 3. Видно, что зарядка должна быть остановлена при степени заряженности ниже 100 %.

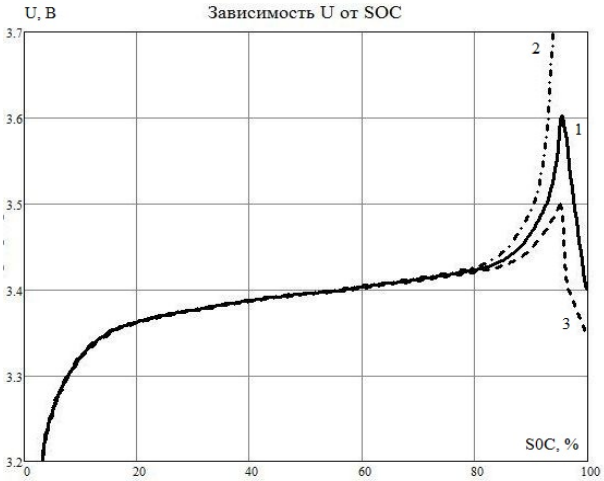

Рисунок 3 – График зависимости разброса напряжений на аккумуляторах батареи, имеющих разную емкость (1 – δC = 0 %, 2 - δ = +2,5 %, 2 - δ = -2,5 %)

На основании сделанных расчетов была дана рекомендация снизить среднюю величину напряжения заряда на аккумуляторе примерно до 3,40 – 3,45 В. При этом увеличивается время зарядки.

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 жизни батареи. На рисунке 4 представлена типичная гистограмма напряжений аккумуляторов батареи, эксплуатирующейся в режиме поддерживающего заряда при степени заряженности, близкой к 100 %. Видно, что напряжение отдельных аккумуляторов достигает 3,48 В, что крайне нежелательно с точки зрения времени жизни аккумулятора.

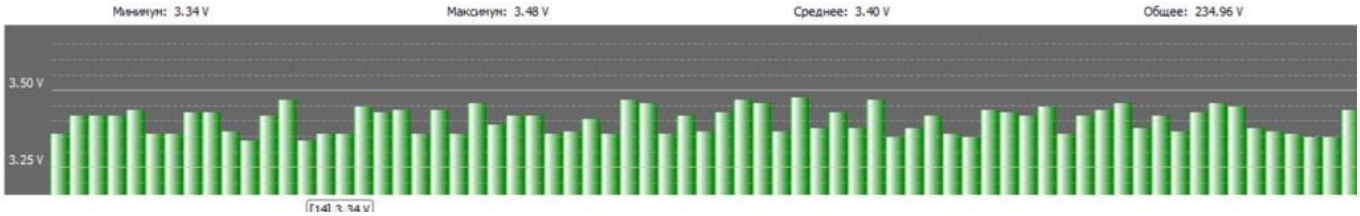

Рисунок 4 – Гистограмма напряжений отдельных аккумуляторов в режиме поддерживающего заряда

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

1.2. Требования к разбросу внутреннего сопротивления аккумуляторов

Разброс величин внутреннего сопротивления аккумуляторов приводит к тому, что и при зарядке, и при разряде внутри разных аккумуляторов рассеивается разное количество энергии, это приводит к росту разброса степени заряженности аккумуляторов в батарее при ее циклиовании. При этом нужно учесть следующее:

a) Негативное влияние данного эффекта нелинейно растет при увеличении токов зарядки (разряда).

$$P_{loss} = R_{int} \cdot I_{ch}^2 \quad (1)$$

здесь:

P_{loss} – мощность потерь;

R_{int} – внутреннее сопротивление

I_{ch} – ток зарядки или разряда;

Анализ показывает, что данный эффект необходимо учитывать при токах зарядки или разряда 1C[1] и выше.

b) Для оценки величины разбалансировки внутренне сопротивление (R_{int}) должно быть измерено на постоянном токе (DC метод). Большинство производителей в своих спецификациях указывают величину внутреннего сопротивления, измеренную на переменном токе (AC метод). Как показывает практика, величина сопротивления, измеренного методом DC, примерно в два раза больше величины сопротивления, измеренного методом AC.

Рассмотрим два аккумулятора внутри аккумуляторной батареи, имеющие разное внутреннее сопротивление. В качестве примера возьмем партию аккумуляторов одного из производителей, произведенных и поставленных для одного из проектов. Минимальное внутреннее сопротивление[2] у одного из аккумуляторов батареи равно 0,40 мОм, максимальное – 0,74 мОм.

Начальные условия для расчета:

---

[1] Здесь ток измеряется в единицах С-рейтинга. 1С соответствует силе тока, при которой полностью заряженный аккумулятор разряжается за один час, соответственно 0,5С или C_2 – за два часа, 2С – за полчаса.

[2] Здесь и далее имеется в виду внутреннее сопротивление, измеренное методом DC.

- Степень заряженности всех аккумуляторов батареи равна 100 % – батарея полностью сбалансирована и заряжена;
- Емкость батареи равна 270 Ач и равна для каждого аккумулятора (аккумуляторы имеют нулевой разброс по емкости).

Рассмотрим процесс разряда батареи током 270 А (1С) до степени заряженности SoC = 0 % (DoD = 100 %) и последующей зарядки током заряда 270 А (1С) до SoC = 100 %.

а) Цикл разряда

При разряде током I, зависимость остаточной энергии от времени определяется следующим выражением:

$$E(t) = E(0) - \frac{1}{E0} \cdot (\int U(t) \cdot I(t) \cdot dt + \int R \cdot I(t)^2 \cdot dt) \qquad (2)$$

Первый интеграл в скобках отвечает, собственно, за процесс разряда и протекающую при этом электрохимическую реакцию, второй интеграл – за потери энергии на внутреннем сопротивлении.

E0 – энергоемкость аккумулятора.

Расчеты удобно вести не во временных координатах, а координатах SoC или DoD. При этом SoC = 100% - DoD.

Учитывая, что внутреннее сопротивление слабо зависит от SoC, а также то, что разряд ведется током постоянной величины I_0, выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$E(DoD) = E(DoD = 0\%) - \frac{1}{E0} \cdot (I_0 \cdot \int U(DoD) \cdot dDoD + R \cdot I_0^2 \cdot \int dDoD) \qquad (3)$$

Здесь энергоемкость определяется в относительных величинах (в % от номинальной энергоемкости), мощность – в Вт, ток в А, сопротивление в Ом, DOD – в %.

На рисунке 5 представлены зависимости напряжения на аккумуляторах, имеющих разное внутреннее сопротивление (красная кривая – R = 0,40 мОм, синяя пунктирная кривая – R = 0,74 мОм).

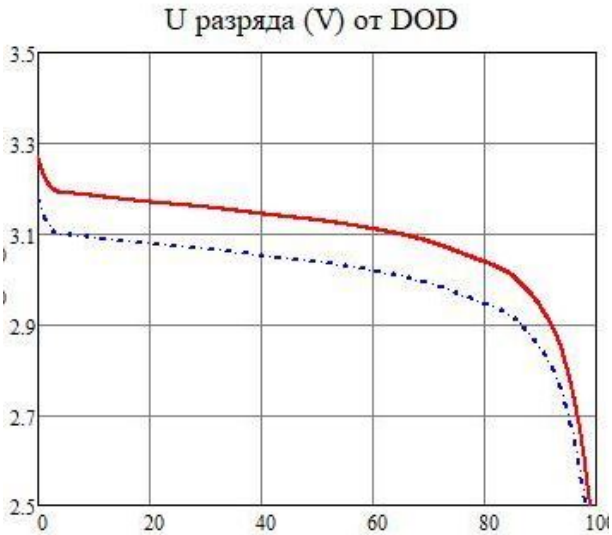

Рисунок 5 – зависимости напряжения на аккумуляторах, имеющих разное внутреннее сопротивление (красная кривая – R = 0,4 мОм, синяя пунктирная кривая – R = 0,74 мОм).

Поскольку ток разряда имеет постоянную величину, потери энергии внутри аккумуляторов при разряде растут линейно. На рисунке 6 показана зависимость потерь энергии при разряде аккумуляторов до DoD = 100 %.

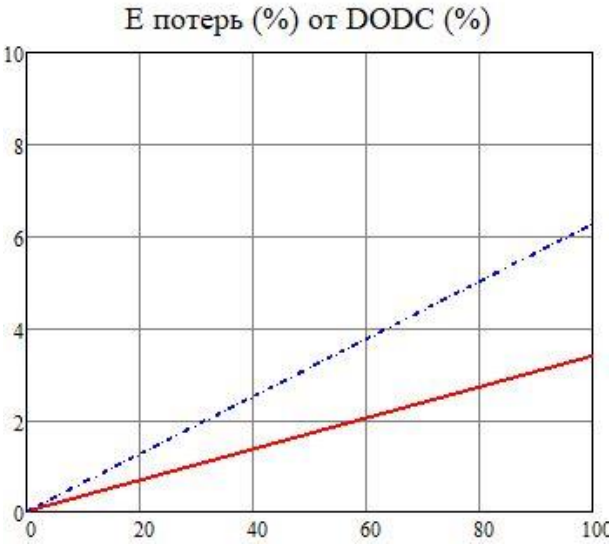

Рисунок 6 – Зависимость потерь энергии при разряде аккумуляторов до DoD = 100 % (красная кривая – R = 0,4 мОм, синяя пунктирная кривая – R = 0,74 мОм).

При этом за цикл разряда один из аккумуляторов отдаст энергии на 6,2 % менее номинальной энергии батареи и в конце цикла разряда появляется разница в степени заряженности у двух аккумуляторов равная 2,88 %.

б) Цикл зарядки

При зарядке будут происходить примерно такие же процессы, при этом нужно учитывать более сложный характер процесса зарядки (зарядка в два этапа – в режиме CC и в режиме CV) – смотри рисунки 1 и 2.

На рисунке 7 показана зависимость потерь энергии при зарядке аккумуляторов до SoC = 100%.

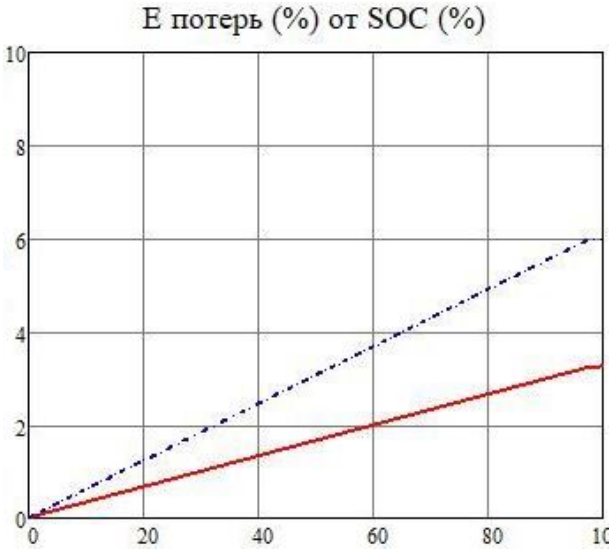

Рисунок 7 – Зависимость потерь энергии при зарядке аккумуляторов до SoC = 100 %. Красная кривая – R = 0,4 мОм, синяя пунктирная кривая – R = 0,74 мОм).

В конце цикла разряда появляется разница в степени заряженности аккумуляторов равная 2,75 %.

Таким образом, в изначально в полностью сбалансированной батарее только за один цикл разряда/заряда появляется разброс степени заряженности, равный 2,88 + 2,75 = 5,63 %. За несколько

циклов разрядки/зарядки батарея будет полностью разбалансирована и должна быть остановлена на балансировку, либо необходимо существенно снижать ток зарядки и разряда. Кроме того, нужно применять систему с высокими балансировочными способностями. Например, предположим, что максимальный ток балансировки составляет 4,5 А, то через один цикл заряда разряда потребуется балансировка в течение 3,4 часа. Стандартный ток балансировки BMS, управляющих качественными аккумуляторными батареями, составляет величину 0,3 – 0,5 А, поэтому такие BMS вообще нельзя применять при указанных разбросах параметров.

Итак, наличие существенного разброса внутренних сопротивлений аккумуляторов батареи приводит к следующим негативным последствиям:

a) Снижение доступной к использованию емкости батареи, причем тем больше, чем больше токи заряда / разряда.

b) Снижение срока службы аккумуляторов в составе батареи, причем

c) Снижение коэффициента готовности батареи (требуется длительная балансировка на каждом цикле).

d) Снижение допустимого тока зарядки и разряда.

e) Необходимость применения более дорогой системы управления батареи с высокими токами балансировки;

f) Снижение КПД батареи в цикле зарядки/разряда.

g) Вероятность аварийного отключения батареи при зарядке/разряде большими токами.

Важно отметить, что негативное влияние разброса параметров батареи линейно растет с ростом этого разброса.

1.3. Краткое резюме к разделу

При эксплуатации аккумуляторной батареи, особенно в циклическом режиме большими токами и при большой глубине циклирования, крайне важно, чтобы разброс таких параметров как емкость аккумулятора и внутреннее сопротивление были минимальны.

Разброс емкостей приводит к следующим негативным последствиям:

a) Снижение доступной для циклирования емкости батареи;

b) Увеличение длительности зарядки батареи;

c) Снижение срока службы батареи;

Разброс внутренних сопротивлений приводит к следующим негативным последствиям:

a) Снижение коэффициента готовности батареи.

b) Снижение допустимого тока зарядки и разряда.

c) Необходимость применения более дорогой системы управления батареи с высокими токами балансировки;

d) Снижение КПД батареи в цикле зарядки/разряда.

e) Вероятность аварийного отключения батареи при зарядке/разряде большими токами.

f)

Важно учесть два факта:

- Для получения достоверной оценки внутреннее сопротивление должно быть измерено DC методом.
- Негативный эффект от влияния разброса внутреннего сопротивления растет пропорционально росту этого разброса.

2. Параметры некоторых аккумуляторов

2.1. Аккумуляторы одного из производителей

Ниже приведены параметры аккумулятора одного из отечественных производителей (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры аккумулятора

Производитель	
Тип	LFP250AH
Емкость номинальная, Ач	250
Напряжение номинальное, В	3,2
Размеры (ДхШхВ), мм	150x105x335
Вес, кг	8,9
Удельная энергоемкость, Втч/кг	89,9

Был проделан анализ разброса параметров партии таких аккумуляторов, поставленных в рамках одного из реализованных проектов (Таблица 2).

Таблица 2 – Разброс параметров аккумуляторов

Производитель		
Год выпуска	2019	
Размер партии, шт.	3990	поставлялась в рамках одного проекта
Емкость номинальная, Ач	250	
Емкость среднее значение, Ач	271,3	Определялась методами статистического анализа на генеральной совокупности партии аккумуляторов
Емкость минимальная, Ач	250,0	
Емкость максимальная, Ач	289,5	
Нормированный разброс[3] $\sigma C/C_{ср}$	0,035	
Сопротивление среднее значение[4], мОм	0,215	
Сопротивление минимальное, мОм	0,102	
Сопротивление максимальное, мОм	0,870	
Нормированный разброс $\sigma R/R_{ср}$	0,250	

2.2. Аккумуляторы производства GBS Energy Co

Ниже приведены параметры одного из типов аккумуляторов производства GBS (Таблица 3).

Таблица 3 – Параметры аккумулятора GBS типа GBS-LFP100AH-C

Производитель	GBS
Тип	GBS-LFP100AH-C
Емкость номинальная, Ач	100
Напряжение номинальное, В	3,2
Размеры (ДхШхВ), мм	126x46x233
Вес, кг	2,3
Удельная энергоемкость, Втч/кг	139,1

[3] Нормированный разброс – отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению величины.
[4] Измеренное методом АС.

Был проделан анализ разброса параметров партии таких аккумуляторов, поставленных в рамках одного из проектов. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Производитель	GBS
Год выпуска	2020
Размер партии, шт.	3942
Емкость номинальная, Ач	100
Емкость среднее значение, Ач	102,0
Емкость минимальная, Ач	100,0
Емкость максимальная, Ач	104,3
Нормированный разброс $\sigma C/C_{ср}$	0,009
Сопротивление среднее значение[5], мОм	0,250
Сопротивление минимальное, мОм	0,218
Сопротивление максимальное, мОм	0,302
Нормированный разброс $\sigma R/R_{ср}$	0,044

2.3. Сравнение разброса параметров аккумуляторов GBS и другого производителя

Ниже приведено сравнение разброса параметров партии аккумуляторов GBS с разбросом параметров партии аккумуляторов другого производителя. Параметры внутреннего разброса емкости и внутреннего сопротивления предоставлены производителями в паспортах на поставку.

Таблица 5 – сравнение разброса параметров аккумуляторов GBS и другого производителя

Производитель	GBS	сравнение	производитель
Емкость номинальная, Ач	100		250
Плотность запасаемой энергии	139,1	> 1,55	89,9
Нормированный разброс емкости $\sigma C/C_{ср}$	0,009	< 3,9	0,035
Нормированный разброс сопротивления $\sigma R/R_{ср}$	0,044	< 5,7	0,250

Видно, что по разбросу емкостей аккумуляторы GBS лучше, чем аккумуляторы другого производителяв 3,9 раз, по разбросу сопротивлению – в 5,7 раз.

На рисунках 8 и 9 представлены гистограммы распределения значений емкостей и внутренних сопротивлений аккумуляторов. Количество аккумуляторов в каждом измеряемом интервале значений разброса параметров нормировано на общее количество аккумуляторов в партии, значения разброса параметров нормировано на среднее значение данного параметра (емкость, сопротивление) в партии. Общее количество аккумуляторов в каждой партии практически одинаково, условия поставки одинаковы.

[5] Измеренное методом АС

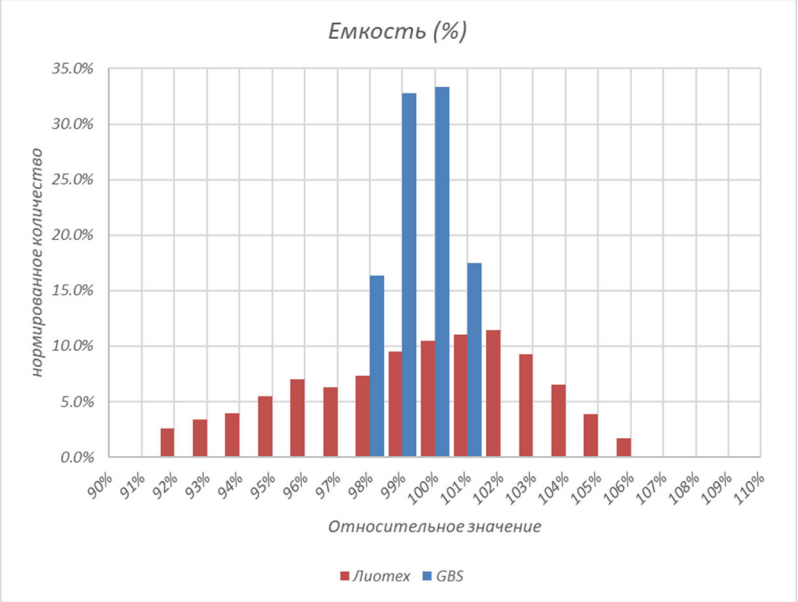

Рисунок 8 – Нормированный разброс значений емкостей сравниваемых аккумуляторов

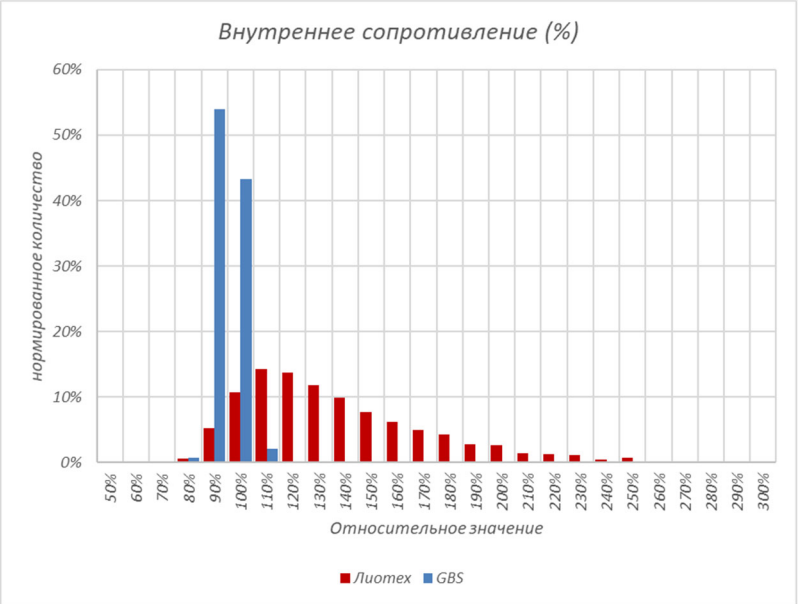

Рисунок 9 – Нормированный разброс значений внутреннего сопротивления сравниваемых аккумуляторов

3. Выводы

а) Разброс параметров аккумуляторов в литий-ионной аккумуляторной батарее 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.

б) Разброс по емкости снижает доступную для циклирования емкость батареи (емкость аккумуляторной батареи будет определяться емкостью самого слабого аккумулятора). Кроме того, самые слабые аккумуляторы будет эксплуатироваться при повышенным напряжением, что приводит к их ускоренной деградации, что было зафиксировано в некоторых проектах. Также увеличивается длительность зарядки батареи.

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

- Снижение коэффициента готовности батареи (увеличение времени балансировки – в это время батарея не может циклироваться);
- Снижение допустимого тока зарядки и разряда;
- Необходимость применения более дорогой системы управления батареи с высокими токами балансировки;
- Снижение КПД батареи в цикле зарядки/разряда;
- Вероятность аварийного отключения батареи при зарядке/разряде большими токами;

г) Увеличение разброса параметров аккумулятора пропорционально увеличивает его негативное влияние;

д) Одним из главных факторов, ограничивающих применение аккумуляторных батарей отечественного производителя является относительно высокий разброс параметров аккумуляторов. В сравнении с параметрами одного из ведущих зарубежных производителей аккумуляторов (GBS Energy Co.) аккумуляторы отечественного производителя имеют больший разброс

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

Литература

1. Ворошилов А.Н., Петров А.Н., Чудинов Е.А. / Литий-железо-фосфатная аккумуляторная батарея. Моделирование режима заряда // Новости электротехники, 2017 – №2, с. 44 – 49