

VERSTAT POWER

LiFePO₄ своими руками: практическое руководство

От ячеек в коробке до рабочего резервного питания

Содержание

Об этом руководстве

Важно: ответственность

1. Безопасность

- 1.1 Почему это не похоже на свинцовый аккумулятор
- 1.2 Инструмент
- 1.3 Украшения, одежда, рабочее место
- 1.4 Огонь
- 1.5 Что делать, если

2. Приемка ячеек

- 2.1 Распаковка и визуальный осмотр
- 2.2 Напряжение при получении
- 2.3 Тест емкости: методика
- 2.4 Внутреннее сопротивление
- 2.5 Стяжка (компрессия)

3. Первая зарядка шаг за шагом

- 3.1 Почему именно верхнее балансирование
- 3.2 Подготовка: параллельное соединение
- 3.3 Процедура балансирования
- 3.4 Сборка в последовательную цепь и первый заряд пакета
- 3.5 За чем следить во время первого заряда

4. Балансирование в эксплуатации

- 4.1 Пассивное и активное балансирование
- 4.2 Пороговые настройки балансирования
- 4.3 Как понять, что балансирование работает
- 4.4 Когда повторять ручное верхнее балансирование

5. Настройка BMS

- 5.1 Что BMS делает и чего не делает
- 5.2 Пороговая таблица (типовой профиль 16s, ячейки 280 А·ч)
- 5.3 Расчет токовых порогов
- 5.4 Температурные пороги: самый важный параметр
- 5.5 Порядок настройки и проверки

6. Проводка

- 6.1 Сечение провода
- 6.2 Наконечники и обжим
- 6.3 Моменты затяжки
- 6.4 Соединительные шины
- 6.5 Балансировочные провода

7. Предохранители и коммутация

- 7.1 Расчет номинала
- 7.2 Тип предохранителя: почему это важно именно здесь

- 7.3 Куда что ставить
- 7.4 Предварительный заряд (pre-charge)
- 7.5 Заземление

8. Зима

- 8.1 Что именно делает холод
- 8.2 Самое дешевое решение: разместить пакет в тепле
- 8.3 Утепление
- 8.4 Активный подогрев
- 8.5 Зимний чеклист

9. Типичные ошибки

- Ошибка 1. Сборка без верхнего балансирования
- Ошибка 2. Заряд на морозе
- Ошибка 3. Заряд до 3.65 В на ячейку ежедневно
- Ошибка 4. Предохранитель отсутствует или неправильный
- Ошибка 5. Сорванная резьба или слишком длинный болт
- Ошибка 6. BMS используется как выключатель
- Ошибка 7. Неправильное сечение провода или паяные наконечники
- Ошибка 8. Пакет без стяжки
- Ошибка 9. Ошибка в балансировочном жгуте
- Ошибка 10. Смешивание разных ячеек в одной цепи

10. Чеклист первого запуска

- А. До сборки
- В. Сборка
- С. BMS
- Д. Защита и коммутация
- Е. Первый запуск
- Ф. Записать и сохранить

Приложение А. Формулы расчета системы

Приложение Б. Справочные величины

Об этом руководстве

Вы заказали ячейки LiFePO₄ и BMS. Они приехали. И вот тут начинается самое неприятное: в коробке нет инструкции, а в интернете каждый второй пишет противоположное каждому первому. Одни говорят заряжать до 3.65 В, другие пугают, что это убьет ячейки. Одни собирают без балансировки, другие неделями держат банки на лабораторном блоке питания.

Это руководство написано, чтобы снять эту неопределенность. Оно построено на опыте сотен клиентских сборок: тех, что работают годами, и тех, что сгорели или потеряли половину емкости в первый месяц. Вторая категория научила больше, чем первая, поэтому каждая глава содержит не только "как делать", но и "что произойдет, если сделать иначе" и "как понять, что уже пошло не так".

Для кого это. Для человека, который умеет держать в руках инструмент, понимает, что такое напряжение и ток, но не является профессиональным электриком и не собирал батарей раньше. Вы осторожны, и это правильно: ячейка LiFePO₄ на 280 А·ч это не пальчиковая батарейка, а источник энергии, способный расплавить гаечный ключ за секунду.

Как им пользоваться. Главы 1-3 читайте до того, как возьмете в руки первую ячейку. Главы 4-7 пригодятся во время сборки, держите их под рукой. Глава 8 о зиме, глава 9 о типичных ошибках (прочитайте ее дважды), глава 10 это чеклист на одну страницу: распечатайте его и отмечайте пункты карандашом перед первым запуском.

Единицы и обозначения. Напряжение ячейки всегда обозначается как В/ячейку. Ток в амперах (А), емкость в ампер-часах (А·ч), энергия в ватт-часах (Вт·ч). С-рейт это ток, выраженный в долях емкости: для ячейки 280 А·ч 0.5C = 140 А, 0.2C = 56 А. Момент затяжки в ньютон-метрах (Н·м).

Предупреждение. Работа с крупными аккумуляторами связана с риском ожога, пожара и поражения током. Руководство дает проверенные практикой ориентиры, но ответственность за вашу конкретную сборку несете вы. Всегда сверяйтесь с документацией на ваши ячейки, вашу BMS и ваш инвертор: приведенные здесь значения это типовые диапазоны для распространенного оборудования, а не замена паспорта производителя.

Важно: ответственность

Работа с литиевыми аккумуляторными системами связана с реальным риском: пожар, поражение электрическим током, травма, повреждение имущества.

Это руководство носит информационный характер. Оно отражает методику, проверенную на сотнях клиентскихборок, но каждая сборка остается на ответственности того, кто ее выполняет. Вы собираете и эксплуатируете свою систему на свой страх и риск и самостоятельно отвечаете за проверку выбора компонентов, качество монтажа и соответствие местным электротехническим нормам и правилам. Если на каком-то этапе возникает сомнение, привлечите квалифицированного электрика.

Продавец не знает и не имеет возможности проверить, какие именно компоненты вы используете, как вы их монтируете и в каких условиях работает ваша система. Поэтому вся ответственность за сборку и любые последствия использования информации из гайда лежит исключительно на покупателе.

1. Безопасность

Эта глава коротка намеренно. Она содержит то, что нужно знать до первого прикосновения к ячейкам, и ничего лишнего.

1.1 Почему это не похоже на свинцовый аккумулятор

Главное отличие LiFePO₄ от привычного автомобильного аккумулятора не в химии, а во внутреннем сопротивлении. Ячейка на 280 А·ч имеет внутреннее сопротивление около 0.2-0.3 мОм. Сложите шестнадцать таких последовательно и вы получите пакет на 51.2 В с сопротивлением примерно 4-5 мОм вместе с соединителями.

Посчитайте ток короткого замыкания: 51.2 В разделить на 0.005 Ом это более 10 000 А. В реальности ток будет меньше из-за сопротивления самого замыкателя и контактов, но порядок величины именно такой: тысячи ампер. Свинцовый аккумулятор даст в разы меньше и "просядет" за секунды, LiFePO₄ выдержит такой ток достаточно долго, чтобы металл успел испариться.

Практическое следствие: гаечный ключ, упавший на две клеммы, не "искрит", он взрывается. Расплавленный металл летит в стороны, а не капает вниз. Именно поэтому следующие пункты не являются перестраховкой.

1.2 Инструмент

- **Изолируйте каждый ключ, который будет касаться клемм.** Термоусадка на 2/3 длины ключа, или специализированный диэлектрический инструмент. Одного слоя изоляционной ленты недостаточно: она сдвигается.
- **Работайте одной рукой**, когда это возможно. Вторая рука в кармане или за спиной. Так ток не пойдет через грудную клетку.
- **Одна клемма за раз.** Никогда не держите инструмент так, чтобы он мог одновременно дотянуться до плюса и минуса.
- **Динамометрический ключ обязателен.** Не "на глаз". Причина в главе 6.
- **Мультиметр с разрешением 0.001 В.** Дешевый прибор, показывающий 3.2 В вместо 3.284 В, для этой работы непригоден: все балансирование измеряется в милливольтках.

1.3 Украшения, одежда, рабочее место

Снимите кольцо, часы, браслеты, цепочку. Золотое кольцо на пальце, замкнувшее клеммы, разогревается до температуры плавления ткани быстрее, чем вы успеваете отдернуть руку, и снять его после этого невозможно. Это самая частая тяжелая травма в этой работе, и она полностью устраняется одним действием перед началом.

Одежда из натуральных тканей: хлопок тлеет, синтетика плавится и прилипает к коже. Очки обязательны во время затяжки клемм и любых работ с шинами. Обувь на резиновой подошве.

Рабочий стол: деревянный или накрытый резиновым ковриком. Не металлический. Не держите на столе ничего металлического, кроме того, что сейчас в руках. Самый распространенный сценарий аварии выглядит так: человек кладет ключ на верхнюю плоскость ячеек "на секунду", затем двигает корпус, и ключ падает на клеммы.

1.4 Огонь

LiFePO₄ по сравнению с NMC значительно безопаснее: она не склонна к тепловому разгону при нормальных условиях и не загорается от прокола так, как литий-кобальтовые химические системы. Но при глубоком механическом повреждении, обратном заряде или сильном перегреве ячейка выделяет газ (преимущественно CO и углеводороды), который может воспламениться.

Газ из клапана ядовит. Кроме угарного газа (CO), в нем присутствует фтористый водород (HF), образующийся из электролита и солей лития. Дышать этим дымом нельзя даже несколько вдохов: HF повреждает дыхательные пути, а последствия проявляются с отсрочкой. Поэтому первое действие при выделении газа или дыма это вывести людей из помещения и открыть его снаружи, а не тушить изнутри.

Различайте два разных сценария:

- **Горит что-то рядом с пакетом** (проводка, корпус инвертора, вещи в шкафу), а ячейки целы. Это обычный пожар: обесточить, тушить порошковым огнетушителем ABC.
- **Горит сам пакет** (клапан открылся, ячейка выбрасывает пламя и газ). Огнетушитель такую ячейку не остановит: окислитель она вырабатывает внутри себя. Выводите людей, вызывайте пожарную службу, дайте пакету выгореть. Если это безопасно, охлаждайте водой с расстояния то, что стоит рядом (соседние ячейки, стены, вещи), чтобы огонь не пошел дальше, но не приближайтесь к пакету и не дышите дымом.
- Порошковый огнетушитель класса ABC рядом. Вода на пакет под напряжением не подается.
- Не собирайте и не заряжайте пакет в жилой комнате, где вы спите. Кладовая, коридор, отдельный шкаф с вентиляцией.
- Вентиляция нужна не из-за "выделения водорода" (это история про свинец), а чтобы в случае неисправности газ не накапливался в замкнутом пространстве. Достаточно естественной вентиляции помещения и неплотного (не герметичного) шкафа.
- Инвертор греется сам и требует свободного пространства вокруг радиатора: минимум 10 см с боков, 20 см сверху, вентилятор ничем не перекрыт.

1.5 Что делать, если

Ячейка вздулась. Не заряжать, не разряжать большим током, вынести из помещения, дать остыть. Вздутая ячейка это либо результат перезаряда, либо заводской брак, либо следствие отсутствия стяжки. В пакет она больше не возвращается.

Пахнет резким сладковатым запахом (электролит). Негерметичность. Питание долой, помещение проветрить, ячейку в утилизацию.

Искра при подключении инвертора. Это нормально: у инвертора большие входные конденсаторы, и первое подключение дает короткий бросок тока. Ненормально, когда искра длится: тогда это короткое замыкание. О предварительном заряде конденсаторов (pre-charge) читайте в главе 7.

Вы замкнули клеммы и ничего не сгорело. Проверьте каждый элемент, через который прошел ток: клеммы на предмет подпалин, соединители, BMS. Микросварка в месте контакта разрушает резьбу и покрытие клеммы. Не считайте это "пронесло и хорошо".

2. Приемка ячеек

Самая дорогая ошибка в этом проекте делается не паяльником, а бездействием: ячейки принимают "на веру", собирают пакет, и через месяц выясняется, что одна из шестнадцати имеет 240 А·ч вместо 280. Вернуть ее уже невозможно, а пакет теперь ограничен самой слабой ячейкой навсегда.

Приемка занимает от трех дней до двух недель (в основном это ожидание, а не работа). Это лучшее вложение времени во всем проекте.

2.1 Распаковка и визуальный осмотр

Распаковывайте на полу или низком столе: ячейка 280 А·ч весит 5.4-5.6 кг, 314 А·ч около 6 кг, и чем меньше высота, тем меньше вреда от случайного падения.

Проверяйте каждую ячейку по списку:

Что смотрим	Норма	Тревожно
Корпус	Ровные плоскости, ребра прямые	Выпуклость боков, "бочка"
Изоляционная пленка	Целая, без порезов	Порезы до алюминия, прожоги
Клеммы	Резьба чистая, не сорванная	Забитая резьба, вмятины, окисление
Вентиляционный клапан (сверху)	Ровный, без следов	Вздутый, со следами протекания
Маркировка	Одинаковая партия на всех ячейках	Разные даты, разные наклейки, перебитые QR
Штрих-коды	Последовательные номера	Случайные номера из разных партий

Выпуклость. Положите ячейку на ровную поверхность боком. Новая ячейка должна быть плоской. Легкая выпуклость (до 1 мм) у новых ячеек с высоким SoC допустима, заметная "бочка" нет.

Разные партии. Ячейки из разных партий имеют разное внутреннее сопротивление и разную реальную емкость, даже если на них написано одно число. Это не повод отказываться от них, но это повод измерить каждую (раздел 2.3) и быть готовым к большому разбросу.

Корпус под напряжением. Измерьте напряжение между минусовой клеммой и алюминиевым корпусом (там, где пленка не закрывает). Должно быть близко к нулю или несколько десятых вольта. Значительное напряжение означает, что пленка где-то пробита и корпус контактирует с внутренним элементом. Такой корпус нельзя ставить в металлический ящик без дополнительной изоляции.

2.2 Напряжение при получении

Измерьте каждую ячейку сразу после распаковки и запишите в таблицу. Это ваша базовая точка, к которой вы будете возвращаться всю эксплуатацию.

Нормальные значения для новых ячеек, приехавших со склада:

Состояние	Напряжение на ячейку	Что это означает
Нормальное хранение	3.28-3.32 В	Примерно 50% заряда, склад держит ячейки именно так
Пониженное	3.10-3.28 В	Долгое хранение или саморазряд, еще приемлемо
Низкое	2.90-3.10 В	Подозрение на саморазряд, следите отдельно
Сильно разряженная	2.50-2.90 В	Заряжать отдельно током 0.1С под наблюдением, далее следить за ней
Опасное	2.00-2.50 В	Глубокий разряд, вероятная деградация, восстановление только под наблюдением
Брак	ниже 2.00 В	Не восстанавливать, в утилизацию
Превышенное	выше 3.40 В	Ячейка не с "нового" склада, ее уже использовали

Разброс между ячейками важнее абсолютного значения. Комплект, в котором все шестнадцать ячеек показывают 3.286-3.294 В, это хороший комплект. Комплект, где есть 3.31 В и 3.14 В, потребует более долгого балансирования, и одна из этих ячеек почти наверняка окажется слабой на тесте емкости.

Есть граница, ниже которой ячейку не восстанавливают. Когда напряжение падает ниже примерно 2.0 В, медный токосъемник анода начинает растворяться в электролите, а при следующем заряде медь оседает обратно уже где угодно, в том числе насквозь через сепаратор. Образуются внутренние перемычки, и ячейка может разогреться и открыть клапан именно во время "восстановительного" заряда, когда вы стоите рядом. Поэтому правило жесткое: **ниже 2.0 В ячейку не восстанавливают - это брак, ее утилизируют.** Никаких "попробую, вдруг оживет": цена ошибки здесь не деньги за ячейку.

Ячейку, приехавшую в диапазоне 2.0-2.5 В, оживляют очень малым током (0.02-0.05С, то есть 6-14 А для 280 А·ч) до 3.0 В, и только потом заряжают нормально. Делайте это в пожаробезопасном месте (бетон, металл, вне жилого помещения), под наблюдением и с термометром: ячейка не должна нагреваться более чем на несколько градусов. Если после такого восстановления она нагревается сильнее соседей или быстро теряет напряжение, она в пакет не идет.

2.3 Тест емкости: методика

Это та часть, которую пропускают чаще всего, и именно она окупается. Цель: узнать реальную емкость каждой ячейки и убедиться, что ни одна не является явным аутсайдером.

Что нужно: регулируемый блок питания (лабораторный БП) на 3.65 В и хотя бы 10-20 А, электронная нагрузка или резистивная нагрузка с ваттметром, кулонометр (ваттметр с подсчетом А·ч, например типа серии "энергометр"), термометр.

Процедура для одной ячейки:

- 1. Заряд.** Выставьте на БП 3.65 В и ограничение тока 0.2-0.5С (для 280 А·ч это 56-140 А; на практике большинство сборщиков ограничены возможностями БП и используют 10-20 А, это тоже приемлемо, просто дольше). Заряжайте, пока напряжение не достигнет 3.65 В, а ток не упадет до 0.05С (около 14 А для 280 А·ч) или ниже, и не перестанет падать.

2. **Пауза.** 30-60 минут без нагрузки. Напряжение опустится до примерно 3.40-3.45 В: это нормально, это релаксация.
3. **Разряд с измерением.** Разряжайте током 0.5С (140 А для 280 А·ч) или меньшим, до напряжения 2.50 В на клеммах под нагрузкой. Кулонометр покажет, сколько А·ч вы сняли. Это и есть реальная емкость.
4. **Запись.** Занесите в таблицу: номер ячейки, снятые А·ч, температуру в конце разряда, время.
5. **Возврат в рабочий диапазон.** Сразу зарядите ячейку обратно хотя бы до 3.30 В: оставлять ее на 2.5 В надолго вредно.

Как читать результат. Здоровая ячейка с маркировкой 280 А·ч должна выдать 275-290 А·ч (производители часто дают небольшой запас). 260-275 А·ч это приемлемо, но это уже нижняя граница. Менее 250 А·ч это основание для рекламации.

Ключевой критерий это разброс, а не абсолют. Если все шестнадцать ячеек выдали 281-287 А·ч, у вас отличный комплект. Если пятнадцать выдали около 285, а одна 258, эта одна будет определять емкость всего пакета: последовательно соединенные ячейки всегда ограничены самой слабой. Заменяйте ее, а не надейтесь, что "разойдется".

Упрощенный вариант, когда нет оборудования для полного теста: зарядите все ячейки в параллели до 3.65 В (см. главу 3), затем соберите пакет и сделайте один полный цикл разряда через инвертор с кулонометром. Вы не узнаете емкость каждой ячейки отдельно, но увидите, какая из них первой просядет до нижнего порога под нагрузкой. Это и есть слабое звено.

2.4 Внутреннее сопротивление

Внутреннее сопротивление (IR) это второй показатель здоровья ячейки, и он выявляет проблемы, которые тест емкости пропускает.

Ориентировочные значения для новых ячеек:

Емкость ячейки	Типовой IR	Настораживает
100-105 А·ч	0.5-0.8 мОм	более 1.2 мОм
280 А·ч	0.20-0.35 мОм	более 0.5 мОм
304-314 А·ч	0.18-0.30 мОм	более 0.45 мОм

Значения в таблице приведены для стандартного измерения **на переменном токе 1 кГц (AC-IR)**: именно так их дают производители и именно так измеряет специальный тестер. Если тестера нет, есть практический метод постоянным током (DC-IR): подайте на ячейку известную нагрузку (например 50 А), измерьте напряжение без нагрузки и под нагрузкой через 10 секунд. Сопротивление = разница напряжений разделить на ток. Просадка на 0.015 В при токе 50 А означает 0.3 мОм - и то, что это число попадает в диапазон AC-таблицы выше, чистое совпадение: сравнивать их все равно нельзя.

Эти два числа нельзя сравнивать между собой. DC-метод включает не только омическую составляющую, но и поляризацию электродов, поэтому он показывает в 2-4 раза больше паспортного значения 1 кГц. Ячейка, у которой тестер показал бы 0.25 мОм, под нагрузкой даст 0.6-1.0 мОм, и это не дефект. Поэтому: **результат DC-измерения сравнивают только между ячейками одного комплекта**, измеренными тем же методом, тем же током и при той же температуре. Сверять его с диапазонами таблицы выше нельзя, иначе вы "забракуете" здоровый комплект.

Что с этим делать. Ячейка с IR вдвое выше соседей греется вдвое сильнее под тем же током и будет просаживаться первой под нагрузкой. Даже если ее емкость нормальная, в высокотокковом пакете она станет слабым звеном. Для резервного питания с умеренными токами (до 0.3C) небольшой разброс IR не критичен.

Важно: измеряйте IR при одинаковой температуре всех ячеек и при схожем SoC. Холодная ячейка показывает более высокое сопротивление, это не дефект.

2.5 Стяжка (компрессия)

Призматические ячейки LiFePO4 рассчитаны на работу в стянутом состоянии. Во время заряда они расширяются, во время разряда сжимаются, и без внешнего ограничения это "дыхание" постепенно разрушает внутреннюю структуру: слои электродов расслаиваются, емкость падает быстрее, чем должна.

- Две жесткие торцевые пластины (сталь 3-5 мм, фанера 12-15 мм, или алюминиевый профиль) и 4 шпильки M6-M8 по углам.
- Между ячейками тонкие прокладки (1-2 мм вспененный материал или стеклотекстолит), чтобы они не терлись боками друг о друга и имели немного места для расширения.
- Целевое усилие около 300 кгс на пакет, то есть ориентировочно 12 psi по площади боковой грани. Практический ориентир без динамометра: стянуть так, чтобы ячейки больше не двигались рукой, но без видимой деформации пленки и без "прогибания" торцевых пластин.
- Не используйте соединительные шины как элемент, удерживающий пакет. Шина проводит ток, а не стягивает конструкцию.

Ячейка, работавшая без стяжки год, обычно уже имеет легкую "бочку" и на 5-15% меньшую емкость. Это необратимо.

3. Первая зарядка шаг за шагом

Эта глава о самой важной процедуре всей сборки: верхнем балансировании (top balancing). Ее делают один раз, до сборки пакета в последовательную цепь, и от нее зависит, будет ли ваш пакет отдавать паспортную емкость, или 70% от нее.

3.1 Почему именно верхнее балансирование

Ячейки, соединенные последовательно, получают одинаковый ток, но заполняются по-разному, потому что имеют немного разную емкость. Представьте шестнадцать ведер, соединенных одним шлангом: наливается одинаково, но одно ведро меньше и переполнится первым.

BMS остановит заряд, как только **любая** ячейка достигнет порога перезаряда (3.65 В). Если на момент старта ячейки были заполнены по-разному, самая полная упрется в потолок, когда остальные еще далеки от полного заряда, и пакет "закончится" на 80% или даже на 60%.

Верхнее балансирование выравнивает ячейки именно в верхней точке: все одновременно приходят к 3.65 В. Нижние точки при этом разойдутся (более слабая ячейка разрядится первой), и это правильный компромисс: лучше недобрать внизу, где напряжение падает полого, чем вверху, где кривая резко идет вверх и BMS реагирует мгновенно.

Балансирование "по низу" (bottom balancing) применяют в специфических сценариях без BMS. Для домашнего резерва с BMS правильный ответ это верхнее балансирование.

3.2 Подготовка: параллельное соединение

Ячейки балансируют в **параллели**: все плюсы вместе, все минусы вместе. Так они автоматически приходят к одинаковому напряжению, а внешний блок питания заполняет их до одинакового уровня.

Осторожно с разницей напряжений. Если одна ячейка на 3.32 В, а другая на 3.10 В, при соединении между ними потечет большой ток: разница 0.22 В при суммарном сопротивлении 0.5 мОм это более 400 А. Это опасно и вредно для обеих.

Правильная последовательность:

1. Отсортируйте ячейки по напряжению.
2. Сначала соедините в параллель те, что отличаются не более чем на 0.05 В. Они выравниваются за минуты.
3. Ячейки, выпадающие из ряда, подтяните отдельно блоком питания (заряд) или небольшой нагрузкой (разряд) до уровня остальных, и только потом добавляйте в параллель.
4. Альтернатива: подключайте каждую следующую ячейку через провод меньшего сечения (например 2.5 мм²) или через резистор на несколько ом на первые минуты, чтобы ток выравнивания был ограниченным, и только потом переходите на нормальную шину.

Шины для параллели. Ток в параллельном соединении во время заряда распределяется между ячейками, но через крайние ячейки проходит весь ток БП. Провод 16 мм² выдерживает до 80 А и этого более чем достаточно для типового БП на 20-60 А. Клеммы затягивайте нормальным моментом (глава 6): плохо затянутая клемма на параллели это не только нагрев, но и искаженный результат балансирования.

Схема подключения БП. Плюс блока питания на крайнюю ячейку с одного конца, минус на крайнюю ячейку с противоположного конца. Так ток заряда проходит через всю цепь равномернее, чем если цеплять оба провода к одной ячейке.

3.3 Процедура балансирования

1. **Выставьте на БП напряжение 3.65 В** и ограничение тока на уровне, который он тянет (0.2С или меньше суммарно: типично 20-50 А на всю параллель). Ставить 3.70 В "чтобы быстрее" нельзя: ни одна ячейка не должна видеть более 3.65 В.
2. **Подключите и оставьте.** Сначала БП работает в режиме ограничения тока, напряжение постепенно растет. Это основная фаза (bulk).
3. **Наблюдайте переход в фазу насыщения (absorb).** Когда напряжение на параллели достигнет 3.65 В, БП перейдет в режим стабилизации напряжения, а ток начнет падать. С этого момента начинается самая долгая часть.
4. **Ждите, пока ток упадет до 2-4 А на всю параллель** и перестанет падать. На практике он сходит почти до нуля. Здесь не работает привычный для одной ячейки критерий завершения заряда 0.02-0.05С: для параллели из шестнадцати ячеек по 280 А·ч (суммарно 4480 А·ч) он дал бы от девяноста до более двухсот ампер и остановил бы процесс задолго до выравнивания. Ориентир на балансировании абсолютный, в амперах: единицы ампер на всю сборку.
5. **Держите еще 6-12 часов после того, как ток перестал падать.** Именно в это время дозаполняются последние проценты, и именно здесь выравниваются ячейки. Общее время процедуры: 12-48 часов в зависимости от начального состояния и мощности БП. Это нормально. Сокращать этот этап нет смысла, он и есть вся суть работы.
6. **Проверка.** Отключите БП, подождите 2 часа, разъедините параллель и измерьте каждую ячейку отдельно. Разброс после корректного балансирования должен быть в пределах 0.005-0.010 В.

Признак проблемы: одна ячейка после отключения падает до 3.35 В, тогда как другие держат 3.45 В. Это саморазряд или дефект. Отметьте ее и проверьте отдельно: зарядите до 3.65 В, оставьте на 72 часа без нагрузки и сравните, насколько она просела относительно соседей.

3.4 Сборка в последовательную цепь и первый заряд пакета

1. **Разъедините параллель.** Ячейки теперь все на одинаковом напряжении примерно 3.40-3.45 В в покое.
2. **Соберите последовательную цепь** согласно вашей конфигурации (4s = 12.8 В, 8s = 25.6 В, 16s = 51.2 В), соблюдая моменты затяжки из главы 6.
3. **Перед подключением BMS убедитесь в полярности.** Измерьте общее напряжение пакета: для 16s оно должно быть около $16 \times 3.42 = 54.7$ В. Если число меньше ожидаемого на удвоенное напряжение одной ячейки, где-то ячейка стоит наоборот. Обратно подключенная ячейка уничтожит и себя, и BMS.
4. **Подключайте балансирующие провода BMS строго по порядку**, от минуса пакета (B-) к плюсу, по одному. Это самое частое место ошибки с фатальными последствиями: перепутанные балансирующие провода сжигают входные цепи BMS.
5. **Проверьте показания BMS** до подключения нагрузки: все ячейки должны быть на одном напряжении, суммарное напряжение совпадать с измеренным мультиметром, температурные датчики показывать комнатную температуру.

Первый заряд пакета зарядным устройством. Выставьте на зарядном конечное напряжение из расчета 3.50-3.55 В на ячейку (не 3.65). Для 16s это 56.0-56.8 В, для 8s 28.0-28.4 В, для 4s 14.0-14.2 В.

Конфигурация	Номинал	Заряд (3.50 В/ячейку)	Заряд (3.55 В/ячейку)	Абсолютный предел (3.65 В/ячейку)
4s	12.8 В	14.0 В	14.2 В	14.6 В
8s	25.6 В	28.0 В	28.4 В	29.2 В
16s	51.2 В	56.0 В	56.8 В	58.4 В

Почему 3.50-3.55 В, а не 3.65 В. Верхний участок кривой LiFePO₄ очень крутой: между 3.45 В и 3.65 В содержится менее 3% емкости, зато именно там ячейка стареет быстрее всего и именно там BMS постоянно срабатывает на перезаряд. Заряжая до 3.50-3.55 В на ячейку, вы теряете несколько процентов емкости и выигрываете значительное продление ресурса и спокойную работу без постоянных отключений. На самом деле потеря еще меньше, чем кажется: заряд, завершающийся на 3.55 В с выдержкой до падения тока, набирает примерно 99% реальной емкости ячейки. Разница между "до 3.55 В" и "до 3.65 В" это не десятки процентов автономности, а один-два процента.

3.65 В нужны во время балансирования (чтобы гарантированно упереться в потолок на всех ячейках одновременно) и как аварийный предел BMS. В повседневной эксплуатации там делать нечего.

Ток заряда. Держитесь диапазона 0.2-0.5C. Для 280 А·ч это 56-140 А. Меньше можно всегда, это лишь медленнее. Больше 0.5C сокращает ресурс и перегружает BMS.

3.5 За чем следить во время первого заряда

Первый заряд собранного пакета проведите рядом, не оставляя его без присмотра. Смотрите на:

- **Разброс напряжений ячеек (delta).** В начале заряда 0.005-0.015 В это норма. Если в конце заряда delta растет до 0.05 В и более, балансирование было недостаточным или есть слабая ячейка.
- **Самую высокую ячейку.** Она не должна достигать 3.65 В раньше остальных. Если достигает, остановите заряд и повторите верхнее балансирование.
- **Температуру.** Ячейки во время заряда 0.2-0.5C нагреваются на 3-8 градусов выше комнатной. Локальный нагрев одной ячейки или клеммы означает плохой контакт или проблемную ячейку.
- **Температуру клемм и соединителей.** Рукой (тыльной стороной ладони, осторожно). Теплая клемма это недотянутая клемма или недостаточное сечение.
- **Ток.** Он должен соответствовать выставленному на зарядном. Если ток меньше ожидаемого, где-то высокое сопротивление в цепи.

В конце заряда BMS должна показать все ячейки в пределах 3.50-3.55 В с разбросом до 0.010 В, а SoC около 100%. Если это так, самая тяжелая часть позади.

4. Балансирование в эксплуатации

Верхнее балансирование (глава 3) делается один раз, руками, до сборки. Далее за равенством ячеек следит BMS. Эта глава о том, как именно она это делает и почему во многих сборках балансирование "не работает".

4.1 Пассивное и активное балансирование

Пассивное балансирование это резистор и транзистор на каждой ячейке. Когда ячейка выше остальных, BMS включает резистор и сливает излишек в тепло. Ток балансирования типично 30-200 мА, в более мощных платах до 300 мА.

Последствия:

- Балансировать можно только "вниз": лишнюю энергию отводят от самой высокой ячейки, подтянуть самую низкую невозможно.
- Поэтому пассивное балансирование имеет смысл **только во время заряда**, когда пакет подходит к верхней точке и разница становится заметной. Балансировать в покое или во время разряда это просто напрасная трата энергии.
- Скорость очень низкая. Ток 100 мА для выравнивания разницы в 5 А·ч требует 50 часов чистого времени балансирования, а балансирование работает лишь несколько минут в конце каждого заряда. Отсюда главный вывод: **пассивное балансирование не исправляет плохой старт**, оно только удерживает уже выровненный пакет.

Активное балансирование перекачивает заряд из более высокой ячейки в более низкую через конденсатор или трансформатор, с КПД 80-90%. Ток в бытовых платах 0.6 А, 1 А, 2 А, в более мощных до 5 А. Это на порядок быстрее и работает в обе стороны.

Платы JK BMS популярных серий имеют встроенный активный балансир (отсюда и популярность). Но даже активный балансир на 2 А не заменяет верхнего балансирования: чтобы выровнять ячейки, разошедшиеся на 20 А·ч, ему понадобится 10-12 часов непрерывной работы (20 А·ч при токе 2 А), а работает он, как правило, лишь в определенном диапазоне напряжений и лишь несколько минут в конце заряда.

4.2 Пороговые настройки балансирования

Три параметра определяют, когда балансир включается.

Напряжение старта балансирования (balance trigger voltage). Балансир включается только когда напряжение самой высокой ячейки превысило этот порог. Типовое значение **3.40 В**, разумный диапазон 3.38-3.45 В.

Почему именно там: ниже 3.40 В кривая LiFePO₄ практически плоская, и разница в напряжении не соответствует разнице в заряде. Ячейка на 3.28 В и ячейка на 3.30 В могут иметь одинаковый SoC, и балансир, включенный на таком участке, будет "исправлять" выдуманный дисбаланс, делая реальный. Выше 3.40 В кривая уже растет, и напряжение становится надежным показателем заполненности.

Разница напряжений для старта (balance delta / trigger difference). Минимальный разброс между самой высокой и самой низкой ячейкой, при котором имеет смысл что-то делать. Типовое значение **0.010 В (10 мВ)**, разумный диапазон 5-30 мВ.

Слишком малая (3 мВ) заставляет балансир работать постоянно и греть плату на шуме измерения. Слишком большая (50 мВ) означает, что дисбаланс успеет стать заметным, прежде чем начнется работа.

Ток балансирования (balance current). Для активных плат JK это 0.6-2 А в зависимости от модели; часто регулируемый. Ставьте максимум, который позволяет плата, но следите за температурой балансира: он греется, и это нормально, пока нагрев умеренный.

Балансирование только во время заряда. Большинство плат имеют отдельный переключатель, который позволяет балансировать только когда идет зарядный ток. Для пассивных балансиров это правильное значение (включено). Для активного балансира допускается балансирование всегда, и оно даже полезно, поскольку активный балансир не тратит энергию в тепло, а перекладывает ее в соседнюю ячейку. **Проверьте инструкцию вашей BMS:** у разных серий этот параметр называется по-разному и ведет себя по-разному.

4.3 Как понять, что балансирование работает

Смотрите на delta (разницу между максимальной и минимальной ячейкой) в трех точках цикла:

Точка цикла	Здоровый пакет	Требует внимания
Покой, середина SoC	0.002-0.010 В	более 0.020 В
Конец заряда	0.005-0.020 В	более 0.050 В
Конец разряда	0.010-0.040 В	более 0.100 В

Delta в конце разряда всегда больше, чем в конце заряда: внизу кривая тоже крутая, и более слабая ячейка проваливается быстрее. Это нормально и само по себе не является диагнозом.

Delta растет с циклами (была 0.010 В, стала 0.030 В через три месяца): это либо естественный расход, который балансир не успевает закрывать, либо одна ячейка имеет повышенный саморазряд. Наблюдайте, какая именно ячейка "убегает". Если это всегда одна и та же и всегда вниз, это саморазряд.

Delta резко скакнула за один цикл: проверяйте не ячейку, а контакт. Плохая клемма или окисленный соединитель создает падение напряжения, которое BMS видит как просадку ячейки.

4.4 Когда повторять ручное верхнее балансирование

Планово раз в год или по таким признакам:

- Delta в конце заряда стабильно превышает 0.050 В.
- BMS отключает заряд по превышению на одной ячейке, когда SoC еще меньше 95%.
- Пакет отдает заметно меньше А-ч, чем год назад, при том что ячейки сами по себе здоровы.

Процедура та же, что в главе 3: разъединить последовательную цепь, соединить в параллель, зарядить до 3.65 В, выдержать. Это несколько часов работы раз в год, и они возвращают пакету паспортную емкость.

5. Настройка BMS

BMS это не "умное устройство, которое все сделает само". Это набор порогов, и по умолчанию они выставлены производителем усредненными или даже просто некорректными для вашей конфигурации. Эта глава о том, что именно нужно выставить и почему.

Значения ниже приведены как типовые диапазоны для распространенных плат серии JK. **Проверьте инструкцию вашей BMS:** названия параметров и даже их логика отличаются между сериями и прошивками.

5.1 Что BMS делает и чего не делает

Делает: следит за напряжением каждой ячейки, за общим током, за температурой; размыкает силовые ключи при выходе за пределы; балансирует ячейки; считает SoC.

Не делает: не является выключателем на каждый день (глава 9, ошибка б), не заменяет предохранитель (размыкание MOSFET это не гальваническая изоляция, и при коротком они могут пробиться в замкнутое состояние), не спасает от ошибок монтажа, не компенсирует отсутствие верхнего балансирования.

5.2 Пороговая таблица (типовой профиль 16s, ячейки 280 А·ч)

Параметр	Типовое значение	Разумный диапазон	Комментарий
Перезаряд ячейки (Cell OVP)	3.65 В	3.60-3.65 В	Абсолютный предел, не рабочая точка
Снятие перезаряда (OVP release)	3.55 В	3.45-3.55 В	Гистерезис, чтобы не "щелкало"
Задержка OVP	1-2 с	1-5 с	
Переразряд ячейки (Cell UVP)	2.80 В	2.70-2.90 В	Ниже 2.5 В ячейка деградирует
Снятие переразряда (UVP release)	3.00 В	2.95-3.10 В	
Задержка UVP	2-5 с	2-10 с	Более долгая задержка терпит пусковые токи
Перезаряд пакета	58.4 В (16s)	3.65 x N	Дублирует ячейковый порог
Переразряд пакета	44.8 В (16s)	2.80 x N	
Ток заряда, ограничение (Charge OCP)	100 А	1.2 x макс. ток зарядного	И не выше 0.5С емкости пакета и не выше номинала платы
Задержка Charge OCP	5-10 с		
Ток разряда, ограничение (Discharge OCP)	150-200 А	по расчету, раздел 5.3	

Параметр	Типовое значение	Разумный диапазон	Комментарий
Задержка Discharge OCP	5-10 с	3-30 с	Должна пережить пуск инвертора
Вторая ступень разряда (OCP2)	250-300 A	1.5-2 x OCP1	Задержка 0.1-1 с
Короткое замыкание (SCP)	заводское		Срабатывает за микросекунды
Заряд, верхний предел температуры	50-55 C	45-55 C	
Заряд, нижний предел температуры	5 C	3-5 C, абсолютный минимум 0 C	Критично, раздел 5.4
Снятие низкотемпературной блокировки	10 C	8-12 C	
Разряд, нижний предел температуры	-20 C	-20...-10 C	
Разряд, верхний предел температуры	60 C	55-65 C	
Температура MOSFET, отсечка	80-90 C		Заводское, не поднимать
Балансирование, напряжение старта	3.40 В	3.38-3.45 В	Глава 4
Балансирование, разница для старта	0.010 В	0.005-0.030 В	
Ток балансирования	0.6-2 А	по модели платы	
Напряжение ячейки для SoC 100%	3.55 В	3.50-3.60 В	Должно совпадать с профилем зарядного
Напряжение ячейки для SoC 0%	2.80 В	2.75-2.90 В	Должно совпадать с UVP
Емкость пакета (Capacity)	280 А·ч	реальная по тесту	От нее считается SoC

Для 8s и 4s пакетные пороги пересчитываются умножением на количество ячеек; ячейковые пороги не меняются.

5.3 Расчет токовых порогов

Токовые пороги выводятся из мощности нагрузки, а не берутся "из головы".

Шаг 1. Длительная мощность (contW). Сумма мощностей всего, что работает одновременно: $\text{contW} = \text{сумма}(\text{мощность}_i \times \text{количество}_i)$.

Шаг 2. Пиковая мощность (peakW). Наибольший одиночный пусковой ток сверх длительной мощности: $\text{peakW} = \text{contW} + \max(\text{пусковая_i} - \text{номинальная_i})$. Холодильник с номиналом 150 Вт и пуском 900 Вт добавляет к длительной мощности 750 Вт, а не 900.

Шаг 3. Ток BMS. $\text{ток BMS} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$, где V это номинальное напряжение пакета (12.8, 25.6 или 51.2 В), а 1.25 это обязательный запас 25%.

Пример: пакет 25.6 В, contW 800 Вт, наибольший пусковой прирост 750 Вт, следовательно $\text{peakW} = 1550$ Вт.
 $1550 / 25.6 \times 1.25 = 75.7$ А. Берем BMS на 100 А.

Почему именно 1.25. Запас 25% покрывает: падение напряжения пакета под нагрузкой (при 20% SoC пакет 25.6 В работает ближе к 24 В, и ток растет), погрешность измерения BMS, а также отклонение реальных пусковых токов от паспортных. Без этого запаса BMS будет отключаться на каждом пуске компрессора.

Честная поправка о КПД. Формула считает ток от мощности нагрузки, а реальный ток из пакета больше: инвертор берет на себя потери, и при КПД 0.88 он тянет примерно на 14% больше, чем отдает ($W / 0.88 / V$). Запас 1.25 эту разницу не заменяет, он добавляется сверху: пока инвертор работает не на полную, паспортная мощность обычно заметно выше реальной нагрузки, и именно на этом держится упрощенный расчет $\text{peakW} / V \times 1.25$. Но если вы планируете длительно нагружать инвертор на полную паспортную мощность, сначала посчитайте реальный ток с учетом КПД: $I = W / 0.88 / V$, а затем, как и всегда, примените тот же запас 25% - провод и предохранитель выбирайте от $I \times 1.25$, а не от I напрямую. Для инвертора 3000 Вт на 25.6 В: $I = 3000 / 0.88 / 25.6 = 133$ А, с запасом 1.25 это 166 А, следовательно предохранитель 200 А и провод 50 мм² - вместо 150 А и 35 мм², которые дал бы расчет по номинальному току без поправки на КПД.

Задержка важнее порога. Пуск двигателя длится 0.1-2 секунды. Если порог с запасом 1.25 все равно превышает на пуске, правильное решение это увеличить задержку срабатывания первой ступени до 5-10 секунд и положиться на вторую ступень (OCP2) с более короткой задержкой для реальных аварий. Не поднимайте порог выше номинала самой платы.

5.4 Температурные пороги: самый важный параметр

Заряд при температуре ячеек ниже 0 С запрещен. Это не рекомендация и не "желательно". Во время заряда на морозе литий не входит в структуру анода, а оседает на ее поверхности металлическими дендритами (литиевое покрытие, plating). Последствия:

- Емкость теряется необратимо, несколько процентов за каждый эпизод.
- Внутреннее сопротивление растет.
- Дендриты со временем могут проколоть сепаратор и вызвать внутреннее короткое замыкание.
- **Внешних признаков нет.** Ячейка выглядит нормально, напряжение нормальное, и человек узнает о проблеме через полгода, когда пакет держит вдвое меньше.

Поэтому настройте так:

1. **Температурный датчик должен быть на ячейке**, а не на плате BMS и не в воздухе. Далее важно, на какой именно ячейке, поскольку две защиты смотрят в разные стороны.

Низкотемпературная блокировка заряда должна ориентироваться на самую холодную ячейку. Блокировка срабатывает на том, что видит датчик, а осаждение лития происходит в той ячейке, которая реально холодная. Если датчик стоит на центральной (самой теплой) ячейке, он покажет +6 С тогда, когда крайняя

ячейка у стенки ящика имеет 0 C, и BMS разрешит заряд, который эту крайнюю ячейку разрушит. Поэтому **основной датчик заряда ставят на крайнюю ячейку со стороны внешней стенки или дна** (откуда идет холод) - в самой холодной точке пакета.

Верхняя температурная отсечка, наоборот, ориентируется на самую горячую ячейку, а это центральная: она окружена соседями, греется от них и медленнее всего отдает тепло. Второй датчик ставят на боковую грань центральной ячейки, и именно он отвечает за отсечку по перегреву при заряде и разряде.

Если плата имеет только один вход датчика, ставьте его на крайнюю холодную ячейку: зимой ошибка в сторону холода стоит дороже, а перегрев в бытовом резерве с умеренными токами случается значительно реже.

2. **Нижняя граница заряда 5 C**, снятие блокировки при 10 C. Абсолютный физический минимум это 0 C, но порог ставят с запасом: датчик имеет собственную погрешность (типовой NTC это $\pm 1-2$ C), а между точкой измерения и самой холодной областью ячейки всегда есть градиент в несколько градусов. Промежуток в 5 градусов между блокировкой и снятием нужен еще и для того, чтобы система не включалась и не выключалась на границе.
3. **Не полагайтесь на зарядное устройство.** Большинство зарядных не знают температуру пакета. Защита должна быть в BMS.
4. **Разряд на морозе разрешен** до -20 C, но емкость при -10 C падает примерно на 20-30%, и это нормально: она вернется после прогрева.

5.5 Порядок настройки и проверки

1. Подключите BMS к приложению (Bluetooth) или ПК до подключения силовых проводов.
 2. Выставьте количество ячеек (S count) и химию (LiFePO4/LFP). Ошибка здесь делает все остальное бессмысленным.
 3. Выставьте емкость пакета по результатам теста из главы 2 (например, не 280, а измеренные 275 А·ч).
 4. Введите ячейковые пороги из таблицы 5.2.
 5. Введите токовые пороги по расчету 5.3.
 6. Введите температурные пороги по 5.4.
 7. Введите параметры балансирования по главе 4.
 8. **Проверьте реальным срабатыванием.** Временно опустите порог переразряда до значения чуть выше текущего напряжения ячейки и убедитесь, что BMS действительно отключает нагрузку. Затем верните рабочее значение. Защита, которую никогда не проверяли, это предположение, а не защита.
 9. Сохраните настройки и **запишите их на бумаге** или сделайте снимок экрана. После замены платы или сброса вы будете благодарны себе.
-

6. Проводка

Большинство сборок, которые сгорели, сгорели не из-за ячеек, а из-за соединений. Ячейка распределяет тепло по всему корпусу; плохая клемма концентрирует его в точке размером с монету.

6.1 Сечение провода

Таблица ниже это рабочие значения для медного многожильного провода в пределах короткой трассы (до 2-3 метров) внутри корпуса или шкафа, при температуре окружения до 40 C. Они консервативны намеренно: в резервном питании запас стоит дешевле ремонта.

Сечение, мм ²	Длительный ток	Типовое применение (расчет $\text{peakW} / V \times 1.25$)
6	30 A	Мелкие потребители, ветки до 30 A, зарядное устройство до 30 A
10	50 A	Линии 12/24 В средней мощности, ветка с предохранителем 40 A
16	80 A	600 Вт на 12 В, 1200 Вт на 24 В, 2400 Вт на 51.2 В (во всех трех случаях около 59 A, предохранитель 60 A)
25	100 A	1000 Вт на 12 В, 2000 Вт на 24 В, 4000 Вт на 51.2 В (около 98 A, предохранитель 100 A)
35	150 A	1500 Вт на 12 В, 3000 Вт на 24 В, 6000 Вт на 51.2 В (около 147 A, предохранитель 150 A)
50	200 A	2000 Вт на 12 В, 4000 Вт на 24 В (около 195 A, предохранитель 200 A)

Как выбрать. Порядок такой:

1. Рассчитайте ток так же, как для BMS: $\text{ток} = \text{peakW} / V \times 1.25$.
2. Округлите его **вверх** до ближайшего номинала предохранителя из ряда 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 A (раздел 7.1). Эта лестница рассчитана на главные и инверторные цепи; мелкие ответвления до 30 A (например линия 12 В для мелких потребителей) защищайте автомобильными плоскими предохранителями номиналом 5-30 A, подобранными по тому же правилу: ток $\times 1.25$, округление вверх в пределах диапазона плоских предохранителей, но никогда не выше допустимого тока самого провода.
3. Возьмите строку таблицы, чей длительный ток не меньше номинала предохранителя, а не расчетного числа.

Третий шаг легко пропустить, и именно здесь возникает самая опасная ошибка. Расчет дал 73 A, вы взяли 16 мм² (80 A) и поставили ближайший предохранитель из ряда, а он 100 A. Теперь провод выдерживает 80 A, а защита сработает на 100 A: перегорать будет трасса, а не предохранитель. Провод всегда считают от номинала предохранителя.

Пример: инвертор 3000 Вт на пакете 51.2 В. $3000 / 51.2 \times 1.25 = 73 \text{ A}$, ближайший предохранитель вверх 100 A, следовательно провод 25 мм² (100 A). Тот же инвертор на пакете 25.6 В дает $3000 / 25.6 \times 1.25 = 146 \text{ A}$, предохранитель 150 A, провод 35 мм². Вот почему более высокое напряжение пакета так заметно удешевляет проводку.

Поправка на КПД инвертора. Расчет выше исходит из мощности нагрузки и предполагает, что паспортная мощность инвертора это пик, а не постоянный режим. Если инвертор будет работать длительно на полную паспортную мощность, сначала посчитайте реальный ток с учетом его КПД: $W / 0.88 / V$, а затем, как и всегда, примените запас 1.25 и уже по этому числу выберите сечение из таблицы выше (раздел 5.3).

Две поправки.

- **Длина.** При трассе более 3 метров считайте не только нагрев, но и падение напряжения. Ориентир: падение на всей трассе туда и обратно не должно превышать 2-3% номинала (для 12.8 В это 0.3 В, для 51.2 В это 1.2 В). При длинных трассах берите следующее сечение.
- **Пучок и температура.** Несколько силовых проводов в одной гофре или в замкнутом горячем боксе греют друг друга. Снижайте допустимый ток на 20-30% или берите следующее сечение.

Только медь, только многожильный, только с качественной изоляцией. Алюминий в бытовой сборке не используйте: он течет под давлением клеммы, и затянутое вчера соединение завтра слабое. Изоляция должна быть маркирована на температуру 90 С или выше; сварочный кабель (класса КП) с тонкими жилами хорошо гнется и подходит отлично. Не используйте автомобильный "аудио" кабель неизвестного сечения с медным покрытием на алюминии (ССА): фактическое сечение меди там в разы меньше заявленного.

6.2 Наконечники и обжим

Паять силовые соединения нельзя. Три причины: припой втягивается в жилу капилляром и делает ее жесткой, создавая точку излома; при аварийном нагреве припой плавится первым и соединение разваливается именно тогда, когда это меньше всего нужно; сопротивление паяного соединения нестабильно.

Правильно: обжим гидравлическим прессом с шестигранной матрицей. Не "кувалдой и зубилом", не пассатижами.

Последовательность:

1. Зачистите изоляцию ровно на глубину гильзы наконечника, не больше. Оголенная медь за пределами наконечника окисляется.
2. Не скручивайте жилу пальцами, не лудите ее.
3. Подберите наконечник по сечению (маркировка 25-8 означает 25 мм² под болт М8) и матрицу по сечению.
4. Обожмите в два приема по длине гильзы, поворачивая наконечник на 90 градусов между нажатиями, если матрица это предусматривает.
5. Проверка: потяните с усилием. Наконечник не должен двигаться вообще. Провод, проворачивающийся в гильзе, это брак.
6. Термоусадка с клеевым слоем на 20-25 мм на переход изоляция/наконечник. Это не косметика: она фиксирует переход и не дает влаге попасть в жилу.
7. Цветовая маркировка: красная усадка на плюс, черная или синяя на минус. Через год вы не будете помнить.

6.3 Моменты затяжки

Клеммы призматических ячеек LiFePO₄ изготовлены из алюминия (плюс) и меди или стали (минус). Алюминиевая резьба срывается легко и безвозвратно.

Резьба клеммы	Момент	Примечание
M6	4-6 Н·м	Типово для ячеек 100-105 А·ч
M8	8-12 Н·м	Типово для ячеек 280-314 А·ч

Всегда сверяйтесь с паспортом ваших ячеек: конкретный производитель может указать более узкий диапазон, и его значение важнее этого.

Правила, которые спасают клеммы:

- **Динамометрический ключ обязателен.** Рука человека без опыта дает на M8 от 3 до 25 Н·м, и второй вариант срывает резьбу.
- **Проверьте длину болта.** Болт, длиннее глубины резьбы в клемме, упирается в дно и дает обманчивое ощущение затяжки, тогда как шина на самом деле прижата слабо. Хуже: в некоторых ячейках слишком длинный болт достает до внутреннего элемента. Правило: резьбовая часть болта входит в клемму на 6-8 мм и не глубже.
- **Порядок шайб:** шина, затем плоская шайба, затем гровер (пружинная), затем болт. Гровер непосредственно на шину продавливают ее и портит контакт.
- **Не используйте зубчатые (стопорные) шайбы** на алюминиевой клемме: они прорезают покрытие и в месте пореза начинается окисление.
- **Никакой смазки с графитом.** Тонкий слой специальной токопроводящей пасты для алюминиевых контактов допустим, обычная смазка создает изолирующую пленку.
- **Протяжка после первого цикла.** Через неделю работы (несколько циклов заряд/разряд и несколько тепловых расширений) пройдитесь динамометрическим ключом еще раз. Далее раз в полгода.

6.4 Соединительные шины

- **Сечение шины должно соответствовать току пакета,** по той же таблице 6.1. Медная шина 20x3 мм имеет площадь 60 мм² и с большим запасом покрывает 200 А. Тонкие декоративные шины из комплекта дешевых ячеек часто рассчитаны на 100-150 А, и в мощной сборке они будут самой горячей точкой.
- **Гибкие плетеные шины лучше жестких,** когда ячейки могут немного двигаться: ячейка "дышит" во время цикла, и жесткая шина передает эту нагрузку на клемму.
- **Шина не держит пакет.** Механику держат стягивающие пластины, шина лишь проводит ток.
- **Медь с покрытием (луженая или никелированная).** Голая медь на алюминиевой клемме образует гальваническую пару и окисляется в месте контакта, постепенно увеличивая сопротивление.
- **Контактные поверхности перед сборкой** протрите спиртом, а не наждаком: царапины уменьшают площадь реального контакта.

6.5 Балансировочные провода

- Сечение 0.5-1.0 мм², отдельный жгут, нигде не проходит рядом с силовой трассой.
- **Каждый балансировочный провод имеет собственный предохранитель** на 1-2 А (предохранители в держателях или самовосстанавливающиеся PPTC). Это стандартная практика, которую часто пропускают: если балансировочный провод перетрется о корпус и замкнет на соседний потенциал, без предохранителя горит BMS, а иногда и жгут.

- Подключайте строго по порядку от В- вверх. Проверьте мультиметром напряжение между соседними контактами разъема перед вставлением: должно быть напряжение одной ячейки (около 3.3 В), а не удвоенное и не ноль.
 - Разъем фиксируйте так, чтобы он не вибрировал и не выскакивал. Пропала одна из линий балансирования, и BMS видит ячейку как нулевую или как удвоенную, с соответствующими срабатываниями.
-

7. Предохранители и коммутация

BMS это электроника, и она может отказать. Предохранитель это физика, и он сработает даже тогда, когда не работает ничего другого. Пакет без главного предохранителя не является завершённой установкой, сколько бы умных функций ни имела его BMS.

7.1 Расчет номинала

Тот же множитель, что для BMS и для провода:

номинал предохранителя $\geq \text{peakW} / V \times 1.25$, далее округление **вверх** до ближайшего стандартного номинала.

Стандартный ряд, из которого выбирают: **40, 60, 100, 125, 150, 200, 250 А**.

Примеры:

Пакет	Инвертор	Расчет	Предохранитель	Минимальный провод
12.8 В	600 Вт	$600 / 12.8 \times 1.25 = 58.6 \text{ А}$	60 А	16 мм ²
12.8 В	1000 Вт	$1000 / 12.8 \times 1.25 = 97.7 \text{ А}$	100 А	25 мм ²
25.6 В	1500 Вт	$1500 / 25.6 \times 1.25 = 73.2 \text{ А}$	100 А	25 мм ²
25.6 В	2000 Вт	$2000 / 25.6 \times 1.25 = 97.7 \text{ А}$	100 А	25 мм ²
25.6 В	3000 Вт	$3000 / 25.6 \times 1.25 = 146.5 \text{ А}$	150 А	35 мм ²
51.2 В	3000 Вт	$3000 / 51.2 \times 1.25 = 73.2 \text{ А}$	100 А	25 мм ²
51.2 В	5000 Вт	$5000 / 51.2 \times 1.25 = 122.1 \text{ А}$	125 А	35 мм ²

Обратите внимание на колонку провода: она считается не от расчетного тока, а от **номинала предохранителя после округления вверх**. Поэтому 73.2 А дают не 16 мм², а 25 мм²: предохранитель в этом месте уже 100 А.

Три элемента, один ток. Провод, BMS и предохранитель считаются по одной формуле с одним и тем же запасом 1.25. Логика защиты работает только если предохранитель срабатывает раньше, чем провод успевает перегреться. Поэтому предохранитель никогда не должен быть мощнее допустимого тока провода, к которому он подключен: иначе горит не предохранитель, а трасса.

Проверьте по таблице 6.1: предохранитель на 150 А требует провода не менее 35 мм². Если у вас 25 мм² (100 А), либо меняйте провод, либо ставьте предохранитель на 100 А.

7.2 Тип предохранителя: почему это важно именно здесь

Ключевая характеристика для литиевого пакета это **отключающая способность** (interrupt rating): максимальный ток, который предохранитель способен разорвать, не превратившись в дугу. Помните расчет из главы 1: пакет может отдать более 10 000 А в короткое замыкание. Предохранитель с отключающей способностью 2000 А в такой ситуации не спасает, а превращается в источник плазменной дуги внутри корпуса.

Тип	Отключающая способность (DC)	Пригодность
Class T	до 20 000 А (при 125 VDC)	Лучший выбор для LiFePO4, единственный рекомендованный для 51.2 В
MRBF (на клемму)	10 000 А при 14 VDC, около 5 000 А при 32 В, около 2 000 А при 58 В	Только для систем 12 и 24 В, до 300 А
ANL / MIDI	2 000-6 000 А	Приемлемо только для малых пакетов 12 В
Автомобильные "ножевые"	1 000-2 000 А	Не для главной защиты
Бытовой автомат AC	не нормируется для DC	Не использовать на DC

Отключающая способность зависит от напряжения, и на MRBF это решающе. Паспортные 10 000 А этот предохранитель имеет при 14 VDC. Уже при 32 В он разрывает около 5 000 А, а при 58 В (то есть в системе 51.2 В на верхней точке заряда) около 2 000 А. Пакет 16s способен отдать более 10 000 А, следовательно в системе 51.2 В MRBF оказывается в той же категории, что и ANL: он не разорвет аварийный ток, а превратится в дугу. Поэтому правило простое:

- **12 В и 24 В:** MRBF допустим (удобен, ставится прямо на клемму), Class T лучше.
- **51.2 В:** только **Class T**. Никаких MRBF, ANL или ножевых как главного предохранителя.

Автоматические выключатели переменного тока на постоянном токе не работают как защита. Постоянный ток не имеет перехода через ноль, поэтому дуга в контактах не гаснет сама. Автомат, рассчитанный на 230 В AC, на 51.2 В DC может не разорвать цепь вообще, оставшись в состоянии горячей дуги. Если нужен автомат-выключатель, берите тот, что явно маркирован для DC с указанным напряжением (например "48 VDC" или "125 VDC") и нужной отключающей способностью.

Напряжение предохранителя должно быть не ниже напряжения пакета. Предохранитель, маркированный 32 VDC, в системе 51.2 В непригоден, даже если его номинал в амперах кажется правильным.

7.3 Куда что ставить

Порядок от пакета к нагрузке:

[+] пакета → главный предохранитель → главный выключатель → шина распределения → потребители
 [-] пакета → BMS (В-) → шина минуса → потребители

- **Главный предохранитель** ставится на плюсовом проводе как можно ближе к клемме пакета, в пределах 15-20 см. Участок провода до предохранителя не защищен ничем, поэтому он должен быть минимальным и механически защищенным (гофра, изолированный держатель).
- **Главный выключатель** ставится после предохранителя. Это ваш способ обесточить систему для обслуживания. Он должен быть рассчитан на DC и на полный ток системы.
- **Отдельный предохранитель на каждую ветку** после шины распределения, рассчитанный по току именно этой ветки. Инвертор, зарядное устройство и линия 12 В для мелких потребителей это три разные ветки с тремя разными номиналами.

- **Зарядное устройство имеет собственный предохранитель** согласно своему току, а не току инвертора.
- **BMS в минусовой цепи** (типовая схема для большинства плат): силовые ключи размыкают минус, поэтому весь минусовой ток проходит через B- BMS. Не подключайте ни одного потребителя к минусу пакета в обход BMS: он будет работать без защиты, и BMS не будет видеть его тока.

7.4 Предварительный заряд (pre-charge)

Входные конденсаторы инвертора при подключении разряжены, и в первый момент они ведут себя как короткое замыкание. Бросок тока достигает сотен ампер за миллисекунды. Последствия: сильная искра, подгорание контактов выключателя, сваривание контактов, а иногда и срабатывание BMS по короткому.

Решение простое: перед замыканием главного выключателя подайте питание через резистор.

- Резистор 50-100 Ом мощностью 5-10 Вт, последовательно, на 2-5 секунд. Конденсаторы заряжаются, искры при основном подключении нет. Номинал подбирается так, чтобы постоянная времени $R \times C$ уложилась в эти 2-5 секунд: для типовой входной емкости инвертора 10-20 мФ резистор 50 Ом дает 0.5-1 с на одну постоянную времени, то есть полный заряд за 2-5 с. Меньшее сопротивление (10 Ом) пропускает слишком большой бросок и само становится источником искры, большее (более 200 Ом) заряжает конденсаторы так долго, что человек не дожидется и замкнет выключатель преждевременно.
- Реализация: отдельная кнопка с резистором параллельно главному выключателю, или просто касание проводом с резистором перед замыканием выключателя.
- Готовые выключатели с функцией pre-charge тоже существуют и удобны.
- Признак, что pre-charge нужен: заметная яркая искра со щелчком при каждом подключении инвертора. Признак проблемы, а не отсутствия pre-charge: искра, которая не прекращается. Это короткое замыкание, и его нужно искать, а не гасить резистором.

7.5 Заземление

- Металлический корпус шкафа или ящика заземляется на защитное заземление дома.
- Минус пакета **не соединяется** с корпусом и с заземлением, если инвертор не требует этого прямо в своей документации. Плавающий DC-контур безопаснее в бытовой установке: единичный пробой на корпус не создает тока.
- Заземление инвертора выполняется строго по его инструкции: у гибридных инверторов с функцией переключения сети схема соединения нейтрали и земли имеет значение для правильной работы защиты.
- Не используйте водопроводные трубы или арматуру как заземление.

8. Зима

Украинская зима это и главная причина, почему этот пакет собирается, и главная угроза для него. Эта глава о том, как пережить ее без потери емкости.

8.1 Что именно делает холод

Заряд ниже 0 С разрушает ячейку. Механизм описан в разделе 5.4: литий оседает металлическим слоем на аноде вместо того, чтобы входить в его структуру. Ущерб накапливается, он необратим и незаметен снаружи. Это единственное абсолютное "нельзя" во всей зимней эксплуатации. Ноль это физическая граница, а порог в BMS ставят выше, на 5 С со снятием при 10 С: датчик имеет погрешность, а внутри ящика всегда есть градиент в несколько градусов.

Разряд на морозе разрешен и безопасен, но:

Температура ячеек	Доступная емкость	Заряд
+25 С	100%	Разрешен
+10 С	примерно 95%	Разрешен
0 С	примерно 85%	Запрещен
-10 С	примерно 70-80%	Запрещен
-20 С	примерно 60-70%	Запрещен

Потеря емкости на холоде временная: после прогрева она возвращается полностью. Не воспринимайте зимнее снижение времени автономности как деградацию пакета.

Внутреннее сопротивление на морозе растет примерно вдвое при -10 С против +25 С. Практическое следствие: под нагрузкой напряжение просаживается сильнее, и BMS может сработать по переразряду раньше, чем ожидалось. Это еще одна причина не ставить порог UVP слишком высоким.

8.2 Самое дешевое решение: разместить пакет в тепле

Прежде чем покупать нагреватели, рассмотрите простое: пакет 51.2 В на 280 А·ч это примерно 100 кг и объем порядка 40-60 литров. Это шкаф в коридоре, в кладовой, под лестницей, в отапливаемом подвале.

- Помещение с температурой +10 С и выше снимает всю зимнюю проблематику полностью.
- Неотапливаемый, но утепленный балкон с общей стеной к квартире обычно держит 0...+5 С даже в сильный мороз, и этого уже достаточно, если есть небольшой подогрев.
- Гараж, уличный шкаф, неутепленный сарай это сценарии, где нужен активный подогрев.

Пакет сам по себе выделяет тепло во время работы (потери на внутреннем сопротивлении), а большая тепловая масса меняет температуру медленно: 100 кг ячеек остывают на несколько градусов за сутки, а не за час. Это работает на вас.

8.3 Утепление

Утепление дешевле и надежнее нагрева: оно не потребляет энергии и не может выйти из строя.

- Экструдированный пенополистирол (XPS) 20-30 мм по всем стенкам ящика, включая дно и крышку. Дно самое важное: холод идет снизу, от бетона.
- Пакет не ставится на бетон непосредственно. Деревянный поддон или слой XPS под ящиком.
- Утепление должно быть с зазором для BMS и особенно для инвертора: инвертор греется и требует свободного воздуха, его не утепляют вместе с пакетом.
- Не делайте конструкцию герметичной. Утепленная, но вентилируемая, это правильное сочетание.

8.4 Активный подогрев

Когда пакет вынужден стоять на морозе:

Оборудование. Силиконовые нагревательные коврики на 12 В или 24 В, мощность 20-50 Вт на коврик. На пакет 16s обычно достаточно 2-4 ковриков общей мощностью 60-150 Вт.

Размещение. Коврики под пакетом и на боковых гранях крайних ячеек, не сверху (тепло и так идет вверх). Через тонкий слой теплопроводного материала, не непосредственно на пленку ячейки, чтобы не было локального перегрева.

Управление. Термостат с датчиком на ячейке: включать при +5 С, выключать при +12 С. Так пакет выходит немного выше порога снятия блокировки заряда (10 С, раздел 5.4) и заряд действительно стартует. Такой гистерезис не дает системе щелкать каждую минуту. Многие BMS имеют выход управления нагревом; если у вашей он есть, это самый удобный вариант, поскольку BMS уже знает температуру ячеек.

Логика питания нагрева это главная тонкость. Греть пакет от самого пакета зимой означает разряжать его, чтобы позволить себе заряжаться. Правильная схема:

1. Есть сеть: нагрев питается от сети (через блок питания), пакет заряжается после прогрева выше 10 С.
2. Нет сети: нагрев либо выключен, либо питается от пакета в минимальном режиме (лишь чтобы удерживать температуру выше -10 С для разряда). Заряжать все равно не от чего, поэтому поддерживать +10 С нет смысла.
3. Аварийный нижний порог: если SoC пакета упал ниже 20-30%, нагрев выключается полностью. Лучше холодный пакет, чем разряженный в ноль.

Посчитайте, почему именно третий пункт важен. Нагрев на 100 Вт, работающий сутки без сети, съедает $100 \times 24 = 2400 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$. Пакет 51.2 В на 280 А·ч содержит $51.2 \times 280 = 14\,336 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$, следовательно подогрев забирает около 17% всего запаса за сутки, ничего не питая. Двое-три суток блэкаута в мороз, и пакет разряжен в ноль самым лишь обогревом. Поэтому зимой без сети нагрев либо выключен, либо удерживает минимум, нужный для разряда, а не комфортные +10 С.

Порядок действий при возврате сети после зимнего блэкаута. Сначала прогрев, потом заряд. Если BMS настроена правильно (раздел 5.4), она сделает это сама: будет блокировать заряд, пока ячейки не достигнут 10 С. Если вы пропустили эту настройку, сделайте ее сейчас, до первого мороза.

8.5 Зимний чеклист

- Температурные датчики BMS физически на ячейках, показания проверены.

- Нижняя граница заряда 5 С выставлена и проверена, снятие блокировки при 10 С.
 - Утепление установлено, дно изолировано от бетона.
 - Нагрев (если есть) проверен на реальном срабатывании термостата.
 - Питание нагрева не зависит от пакета, когда есть сеть.
 - Клеммы протянуты динамометрическим ключом (перепады температуры ослабляют соединение).
 - Пакет заряжен до 100% перед сезоном, delta проверена.
-

9. Типичные ошибки

Десять сценариев, которые повторяются от сборки к сборке. Для каждого: что делают, как это проявляется и что делать вместо этого.

Ошибка 1. Сборка без верхнего балансирования

Что делают. Получают ячейки с напряжением 3.29-3.31 В, считают "они и так одинаковые", собирают последовательно и заряжают.

Симптом. Пакет заряжается до 60-85% и BMS обрывает заряд по перезаряду одной ячейки. Эта ячейка на 3.65 В, а самая низкая еще на 3.30 В. Автономность значительно меньше расчетной.

Почему. Разница 0.02 В на плоском участке кривой это до 10% емкости. "Одинаковое напряжение" не означает "одинаковый заряд". Пассивное балансирование (100 мА) не способно закрыть такой разрыв в разумное время.

Что делать. Разобрать последовательную цепь, сделать верхнее балансирование по главе 3. Один раз, и проблема исчезает на годы.

Ошибка 2. Заряд на морозе

Что делают. Ставят пакет в гараж или на балкон, не настроив нижний температурный порог заряда в BMS.

Симптом. Нет никакого. Первые недели все работает. Через один-два сезона пакет держит заметно меньше, внутреннее сопротивление выросло, напряжение под нагрузкой просаживается сильнее.

Почему. Литиевое покрытие (plating) на аноде. Необратимо, накапливается с каждым эпизодом.

Что делать. Выставить нижнюю границу заряда 5 С (снятие при 10 С) в BMS **до** первого мороза. Датчик на крайней, самой холодной ячейке, не в воздухе и не на центральной. Это десять минут работы, которые спасают пакет.

Ошибка 3. Заряд до 3.65 В на ячейку ежедневно

Что делают. Выставляют на зарядном 58.4 В для 16s, "чтобы заряжалось полностью".

Симптом. BMS отключает заряд в конце каждого цикла, иногда по нескольку раз. Delta между ячейками растет с месяцами. Емкость падает быстрее, чем должна.

Почему. Между 3.45 и 3.65 В содержится менее 3% емкости, зато именно там ячейка стареет быстрее всего. Постоянная работа на верхней границе это худший режим для ресурса.

Что делать. Выставить 3.50-3.55 В на ячейку (56.0-56.8 В для 16s). Потеря нескольких процентов емкости, выигрыш в ресурсе и спокойная работа без отключений.

Ошибка 4. Предохранитель отсутствует или неправильный

Что делают. Полагаются на BMS ("она же защищает от короткого") или ставят автомобильный ножевой предохранитель или бытовой автомат АС.

Симптом. До аварии никакого. Во время аварии: MOSFET BMS пробиваются в замкнутое состояние и не размыкаются, либо предохранитель не гасит дугу, и вместо срабатывания имеем устойчивое горение.

Почему. Пакет способен отдать более 10 000 А. Защита должна иметь соответствующую отключающую способность, и она должна быть физической, а не электронной.

Что делать. Главный предохранитель на плюсе, в пределах 15-20 см от клеммы пакета, номинал по расчету 1.25 с округлением вверх по ряду 40/60/100/125/150/200/250 А. Тип по напряжению системы: для 12 и 24 В подходит MRBF (или Class T), **для 51.2 В только Class T**. Отключающая способность MRBF падает с напряжением: 10 000 А при 14 В, около 2 000 А при 58 В, то есть в системе 16s он уже не держит ток короткого замыкания пакета. Проверьте также, что провод выдерживает номинал предохранителя, а не только расчетный ток.

Ошибка 5. Сорванная резьба или слишком длинный болт

Что делают. Затягивают клеммы "от души" без динамометрического ключа, или берут болты из старых запасов, не проверив длину.

Симптом. Сорванной резьбы: клемма больше не держит момент, соединение греется, ячейка фактически непригодна для нормального монтажа. Длинного болта: шина кажется затянутой, но контакт слабый, клемма греется под нагрузкой; в тяжелом случае болт достает до внутреннего элемента.

Почему. Резьба в алюминиевой клемме не прощает превышения момента. Болт, упершийся в дно, дает тот же "щелчок" динамометрического ключа, что и правильно затянутый.

Что делать. Динамометрический ключ, M6 = 4-6 Н·м, M8 = 8-12 Н·м, сверка с паспортом ячейки. Резьбовая часть болта входит в клемму на 6-8 мм. Вкрутите болт в клемму без шины и убедитесь, что он не достигает дна.

Ошибка 6. BMS используется как выключатель

Что делают. Выключают систему через приложение BMS, отключая заряд или разряд, вместо физического выключателя.

Симптом. MOSFET деградируют от коммутации под нагрузкой, со временем растет сопротивление и нагрев ключей. В худшем случае ключ сваривается в замкнутом состоянии, и BMS теряет способность защищать.

Почему. Силовые ключи BMS рассчитаны на аварийное отключение (редкое), а не на ежедневную коммутацию. Защитный элемент не должен быть органом управления.

Что делать. Главный выключатель DC на нужный ток после предохранителя. BMS отключает только в аварии.

Ошибка 7. Неправильное сечение провода или паяные наконечники

Что делают. Ставят 16 мм² там, где нужно 35 мм², или паяют наконечники вместо обжима. Часто это кабель CCA (медь на алюминии) с завышенным заявленным сечением.

Симптом. Провод и наконечники заметно теплые или горячие под нагрузкой, запах нагретой изоляции, потемневшая изоляция у наконечника, падение напряжения под нагрузкой больше ожидаемого.

Почему. Тепловыделение пропорционально квадрату тока, поэтому "чуть более тонкий провод" на пиковой нагрузке греется совсем не "чуть" сильнее. Паяное соединение разваливается именно при перегреве.

Что делать. Расчет $\text{peakW} / V \times 1.25$, таблица сечений 6.1, гидравлический обжим шестигранной матрицей, только медь. После первого нагруженного цикла проверьте рукой все соединения: ни одно не должно быть теплее других.

Ошибка 8. Пакет без стяжки

Что делают. Ставят ячейки в ящик, иногда просто стягивают пластиковой лентой, считая стягивающие пластины "необязательным тюнингом".

Симптом. Через несколько месяцев ячейки заметно выпуклые. Емкость падает быстрее, чем предусматривает паспортный ресурс. Стянуть уже вздутые ячейки обратно невозможно.

Почему. Ячейка расширяется и сжимается каждый цикл. Без внешнего ограничения слои электродов постепенно расслаиваются, и контакт внутри ухудшается.

Что делать. Две жесткие торцевые пластины, 4 шпильки, ориентировочно 300 кгс усилия, прокладки между ячейками. Делается во время сборки и больше не упоминается.

Ошибка 9. Ошибка в балансировочном жгуте

Что делают. Подключают балансировочный разъем, не проверив порядок проводов мультиметром, или подключают его к пакету, уже находящемуся под нагрузкой, или оставляют жгут без предохранителей.

Симптом. В лучшем случае BMS показывает невозможные значения (ячейка 0 В, ячейка 6.6 В) и не работает. В худшем входные цепи BMS выгорают сразу, иногда с дымом.

Почему. Балансировочные входы рассчитаны на разницу в одну ячейку. Перепутанные провода подают удвоенное или обратное напряжение непосредственно на измерительные цепи.

Что делать. Подключать строго по порядку от В-вверх, перед вставлением разъема проверить мультиметром напряжение между соседними контактами (должно быть около 3.3 В на каждой паре), поставить предохранители 1-2 А на каждой линии, зафиксировать жгут отдельно от силовой трассы.

Ошибка 10. Смешивание разных ячеек в одной цепи

Что делают. Докупают две ячейки взамен поврежденных, берут другую партию или другого производителя, ставят в ту же последовательную цепь. Или добавляют новую ячейку в пакет, отработавший два года.

Симптом. Пакет никогда не балансируется стабильно: delta растет от цикла к циклу, одна и та же ячейка постоянно "убегает" вверх или вниз. Емкость определяется самой слабой ячейкой.

Почему. Разная реальная емкость и разное внутреннее сопротивление означают разную скорость заполнения. Балансир тратится на постоянное выравнивание вместо поддержания.

Что делать. В одной последовательной цепи используйте ячейки одной партии и близкого возраста. Если приходится смешивать, обязательно сделайте тест емкости (глава 2) и подбирайте так, чтобы разброс емкостей был в пределах 3-5%. Старую ячейку в новый пакет не ставят.

10. Чеклист первого запуска

Распечатайте эту страницу. Отмечайте пункты карандашом. Не переходите к следующему блоку, пока текущий не закрыт полностью.

А. До сборки

- ☐ Все ячейки визуально проверены: без выпуклости, пленка целая, резьба чистая
- ☐ Напряжение каждой ячейки измерено и записано; ниже 2.0 В в пакет не идет
- ☐ Разброс напряжений при получении не превышает 0.10 В
- ☐ Емкость проверена (полный тест или упрощенный вариант); разброс в пределах 3-5%
- ☐ Верхнее балансирование выполнено: параллель, 3.65 В, выдержка до падения тока и еще 6-12 часов
- ☐ После балансирования разброс напряжений в пределах 0.005-0.010 В
- ☐ Стягивающие пластины и шпильки готовы, прокладки между ячейками на месте

В. Сборка

- ☐ Украшения сняты, инструмент изолирован, очки надеты, огнетушитель рядом
- ☐ Полярность каждой ячейки проверена перед установкой шины
- ☐ Общее напряжение пакета совпадает с расчетным (количество ячеек x 3.42 В)
- ☐ Длина болтов проверена: 6-8 мм в резьбе, дна не достигает
- ☐ Все клеммы затянуты динамометрическим ключом: М6 = 4-6 Н·м, М8 = 8-12 Н·м
- ☐ Порядок шайб правильный: шина, плоская шайба, гровер, болт
- ☐ Сечение провода по таблице не меньше номинала предохранителя
- ☐ Наконечники обжаты гидравлическим прессом, тест на вытягивание пройден
- ☐ Термоусадка установлена, цветовая маркировка на месте

С. BMS

- ☐ Количество ячеек (S) и химия (LFP) выставлены правильно
- ☐ Емкость пакета введена по результату теста
- ☐ Пороги ячейки: OVP 3.65 В / release 3.55 В, UVP 2.80 В / release 3.00 В
- ☐ Токовые пороги рассчитаны по $peakW / V \times 1.25$, задержки достаточны для пуска инвертора
- ☐ Нижняя граница заряда 5 С выставлена, снятие при 10 С
- ☐ Верхняя граница заряда 50-55 С, разряда 60 С; нижняя граница разряда -20 С
- ☐ Балансирование: старт 3.40 В, разница 0.010 В
- ☐ Температурные датчики физически закреплены на ячейках

- ☐ Балансировочный жгут проверен мультиметром попарно перед подключением
- ☐ Предохранители 1-2 А на балансировочных линиях установлены
- ☐ Настройки сохранены и записаны (снимок экрана или лист)

Д. Защита и коммутация

- ☐ Главный предохранитель на плюсе, не далее 20 см от клеммы (для 51.2 В только Class T)
- ☐ Номинал предохранителя по расчету, округлен вверх по ряду 40/60/100/125/150/200/250 А
- ☐ Номинал предохранителя не превышает допустимый ток провода
- ☐ Главный выключатель DC установлен после предохранителя
- ☐ Отдельные предохранители на каждую ветку (инвертор, зарядное, линия малых потребителей)
- ☐ Схема предварительного заряда (pre-charge) предусмотрена
- ☐ Корпус заземлен, минус пакета не соединен с корпусом
- ☐ Ни один потребитель не подключен к минусу пакета в обход BMS

Е. Первый запуск

- ☐ Мультиметром проверена полярность на входе инвертора до подключения
- ☐ Инвертор подключен через pre-charge, искры при замыкании выключателя нет
- ☐ BMS показывает все ячейки, суммарное напряжение и нулевой ток
- ☐ Конечное напряжение зарядного выставлено на 3.50-3.55 В на ячейку (не 3.65)
- ☐ Ток заряда в пределах 0.2-0.5С
- ☐ Первый заряд проведен под наблюдением, от начала до конца
- ☐ В конце заряда delta не превышает 0.020 В
- ☐ Все клеммы, наконечники и шины проверены на нагрев под нагрузкой
- ☐ Проведен один полный цикл разряда с контролем: ни одна ячейка не проваливается раньше других
- ☐ Через неделю работы все клеммы протянуты повторно динамометрическим ключом

Ф. Записать и сохранить

- ☐ Таблица ячеек: номер, напряжение при получении, измеренная емкость, внутреннее сопротивление
- ☐ Снимок настроек BMS
- ☐ Схема соединений с номиналами предохранителей и сечениями провода
- ☐ Дата ввода в эксплуатацию

Приложение А. Формулы расчета системы

Эти формулы использует калькулятор на сайте. Они приведены здесь, чтобы вы могли проверить результат вручную.

1. Длительная мощность.

$$\text{contW} = \text{сумма (мощность_i} \times \text{количество_i)}$$

Сложите номинальную мощность всего, что работает одновременно.

2. Пиковая мощность.

$$\text{peakW} = \text{contW} + \text{max(пусковая_i} - \text{номинальная_i)}$$

Берется наибольший одиночный пусковой прирост, а не сумма всех пусковых токов: два двигателя практически никогда не стартуют в одну миллисекунду.

3. Требуемая энергия.

$$\text{requiredWh} = \text{contW} \times \text{часы} / 0.8 / 0.88$$

- **0.8 (DoD, глубина разряда).** Пакет не разряжают в ноль: 80% это компромисс между доступной энергией и ресурсом.
- **0.88 (КПД инвертора).** Типовой КПД качественного инвертора с чистой синусоидой на среднем нагрузке. Потери идут в тепло.

Пример: 500 Вт в течение 8 часов это $500 \times 8 / 0.8 / 0.88 = 5682 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

4. Выбор напряжения пакета.

Пробуем по порядку: 12.8 В (только если contW не превышает 600 Вт), затем 25.6 В (contW до 1500 Вт), затем 51.2 В. Принимается первый вариант, при котором $Ah = \text{requiredWh} / V$ не превышает 314 А·ч (самая распространенная крупная ячейка). Если не подошел ни один, берем 51.2 В и параллельные линейки:

$$\text{количество линеек} = \text{округление вверх} (Ah / 314)$$

Для примера выше: 5682 Вт·ч при 500 Вт длительной мощности. 12.8 В подходит по мощности, но $5682 / 12.8 = 444 \text{ А} \cdot \text{ч}$, это больше 314. Берем 25.6 В: $5682 / 25.6 = 222 \text{ А} \cdot \text{ч}$. Подходит, следовательно 8s с ячейками 280 А·ч.

5. Ток BMS.

$$\text{ток BMS} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$$

6. Мощность инвертора.

$$\text{мощность инвертора} \geq \text{max(contW} \times 1.3, \text{peakW)}$$

Инвертор должен и держать длительную нагрузку с запасом 30%, и переваривать пик.

7. Провод и предохранитель.

$$\text{ток} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$$

Предохранитель округляется вверх по ряду 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 А, и **провод выбирается уже по номиналу предохранителя**, а не по расчетному току: по таблице 6.1 (30 А / 6 мм², 50 А / 10 мм², 80 А / 16 мм², 100 А / 25 мм², 150 А / 35 мм², 200 А / 50 мм²) берут сечение, чей длительный ток не меньше номинала предохранителя.

Если инвертор будет работать длительно на полную паспортную мощность, сначала считают реальный ток с учетом КПД: $W / 0.88 / V$, а затем, как и в шаге 5, умножают его на запас 1.25 и лишь после этого выбирают провод и предохранитель (раздел 5.3).

Приложение Б. Справочные величины

Величина	Значение
Номинальное напряжение ячейки LiFePO ₄	3.2 В
Максимальное напряжение заряда	3.65 В
Рекомендованная рабочая верхняя граница	3.50-3.55 В
Напряжение в покое при 100% SoC	примерно 3.40-3.45 В
Напряжение в покое при 50% SoC	3.28-3.32 В
Рекомендованная нижняя граница	2.80 В
Абсолютный минимум	2.50 В
Граница, ниже которой ячейку не восстанавливают	2.00 В
Напряжение хранения (примерно 50% SoC)	3.28-3.32 В
4s пакет	12.8 В номинал
8s пакет	25.6 В номинал
16s пакет	51.2 В номинал
Рекомендованный ток заряда	0.2-0.5C
Ток завершения заряда (taper), одна ячейка	0.02-0.05C
Ток завершения при балансировании в параллели	2-4 А на всю сборку
Температура заряда	+5...+50 С (физическая граница 0 С)
Температура разряда	-20...+60 С
Температура хранения	-20...+45 С
Ресурс при 80% DoD	примерно 3000-6000 циклов
КПД инвертора для расчета	0.88
Рабочая глубина разряда (DoD)	0.8
Запас для BMS, провода, предохранителя	1.25

VERSTAT Power. Это руководство предоставляется как справочный материал. Всегда сверяйтесь с документацией на ваше конкретное оборудование.