

VERSTAT POWER

LiFePO₄ своїми руками: практичний посібник

Від комірок у коробці до робочого резервного живлення

Версія 1.0 | VERSTAT Power

Зміст

Про цей посібник

Важливо: відповідальність

1. Безпека

- 1.1 Чому це не схоже на свинцевий акумулятор
- 1.2 Інструмент
- 1.3 Прикраси, одяг, робоче місце
- 1.4 Вогонь
- 1.5 Що робити, якщо

2. Приймання комірок

- 2.1 Розпакування й візуальний огляд
- 2.2 Напруга при отриманні
- 2.3 Тест ємності: методика
- 2.4 Внутрішній опір
- 2.5 Стягування (компресія)

3. Перша зарядка крок за кроком

- 3.1 Чому саме верхнє балансування
- 3.2 Підготовка: паралельне з'єднання
- 3.3 Процедура балансування
- 3.4 Складання в послідовне коло й перший заряд пакета
- 3.5 За чим стежити під час першого заряду

4. Балансування в експлуатації

- 4.1 Пасивне й активне балансування
- 4.2 Порогові налаштування балансування
- 4.3 Як зрозуміти, що балансування працює
- 4.4 Коли повторювати ручне верхнє балансування

5. Налаштування BMS

- 5.1 Що BMS робить і чого не робить
- 5.2 Порогова таблиця (типовий профіль 16s, комірки 280 А·год)
- 5.3 Розрахунок струмових порогів
- 5.4 Температурні пороги: найважливіший параметр
- 5.5 Порядок налаштування й перевірки

6. Проводка

- 6.1 Переріз проводу
- 6.2 Наконечники й обтиснення
- 6.3 Моменти затягування
- 6.4 З'єднувальні шини
- 6.5 Балансувальні дроти

7. Запобіжники та комутація

- 7.1 Розрахунок номіналу
- 7.2 Тип запобіжника: чому це важливо саме тут

- 7.3 Де що ставити
- 7.4 Попередній заряд (pre-charge)
- 7.5 Заземлення

8. Зима

- 8.1 Що саме робить холод
- 8.2 Найдешевше рішення: розмістити пакет у теплі
- 8.3 Утеплення
- 8.4 Активний підігрів
- 8.5 Зимовий чеклист

9. Типові помилки

- Помилка 1. Збірка без верхнього балансування
- Помилка 2. Заряд на морозі
- Помилка 3. Заряд до 3.65 В на комірку щодня
- Помилка 4. Запобіжник відсутній або неправильний
- Помилка 5. Зірвана різьба або надто довгий болт
- Помилка 6. BMS використовується як вимикач
- Помилка 7. Неправильний переріз проводу або паяні наконечники
- Помилка 8. Пакет без стягування
- Помилка 9. Помилка в балансувальному джгуті
- Помилка 10. Змішування різних комірок в одному колі

10. Чеклист першого запуску

- A. До складання
- B. Складання
- C. BMS
- D. Захист і комутація
- E. Перший запуск
- F. Записати й зберегти

Додаток А. Формули розрахунку системи

Додаток Б. Довідкові величини

Про цей посібник

Ви замовили комірки LiFePO₄ і BMS. Вони приїхали. І ось тут починається найнеприємніше: у коробці немає інструкції, а в інтернеті кожен другий пише протилежне до кожного першого. Одні кажуть заряджати до 3.65 В, інші лякають, що це вб'є комірки. Одні збирають без балансування, інші тижнями тримають банки на лабораторному блоці живлення.

Цей посібник написаний, щоб зняти цю невизначеність. Він побудований на досвіді сотень збірок: тих, що працюють роками, і тих, що згоріли або втратили половину ємності на першому місяці. Друга категорія навчила більше, ніж перша, тому кожна глава містить не лише "як робити", а й "що станеться, якщо зробити інакше" і "як зрозуміти, що вже пішло не так".

Для кого це. Для людини, яка вміє тримати в руках інструмент, розуміє, що таке напруга і струм, але не є професійним електриком і не збирала батарей раніше. Ви обережні, і це правильно: комірка LiFePO₄ на 280 А·год це не пальчикова батарейка, а джерело енергії, здатне розплавити гайковий ключ за секунду.

Як ним користуватися. Глави 1-3 читайте до того, як візьмете в руки першу комірку. Глави 4-7 стануть у пригоді під час збірки, тримайте їх під рукою. Глава 8 про зиму, глава 9 про типові помилки (прочитайте її двічі), глава 10 це чеклист на одну сторінку: роздрукуйте його і відмічайте пункти олівцем перед першим запуском.

Одиниці й позначення. Напруга комірки завжди позначається як В/комірку. Струм у амперах (А), ємність у ампер-годинах (А·год), енергія у ват-годинах (В·год). С-рейт це струм, виражений у частках ємності: для комірки 280 А·год 0.5С = 140 А, 0.2С = 56 А. Момент затягування у ньютон-метрах (Н·м).

Застереження. Робота з великими акумуляторами пов'язана з ризиком опіку, пожежі й ураження струмом. Посібник дає перевірені практикою орієнтири, але відповідальність за вашу конкретну збірку несе ви. Завжди звіряйтеся з документацією на ваші комірки, вашу BMS і ваш інвертор: наведені тут значення це типові діапазони для поширеного обладнання, а не заміна паспорту виробника.

Важливо: відповідальність

Робота з літійовими акумуляторними системами пов'язана з реальним ризиком: пожежа, ураження електричним струмом, травма, пошкодження майна.

Цей посібник має інформаційний характер. Він відображає методику, перевірену на сотнях клієнтських збірок, але кожна збірка залишається на відповідальності того, хто її виконує. Ви збираєте й експлуатуєте свою систему на власний ризик і самостійно відповідаєте за перевірку вибору компонентів, якість монтажу та відповідність місцевим електротехнічним нормам і правилам. Якщо на будь-якому кроці виникає сумнів, залучіть кваліфікованого електрика.

Продавець не знає і не має можливості перевірити, які саме компоненти ви використовуєте, як ви їх монтуєте та в яких умовах працює ваша система. Тому вся відповідальність за збірку та будь-які наслідки використання інформації з гайда лежить виключно на покупцеві.

1. Безпека

Ця глава коротка навмисно. Вона містить те, що треба знати до першого дотику до комірок, і нічого зайвого.

1.1 Чому це не схоже на свинцевий акумулятор

Головна відмінність LiFePO₄ від звичного автомобільного акумулятора не в хімії, а у внутрішньому опорі. Комірка на 280 А·год має внутрішній опір близько 0.2-0.3 мОм. Складіть шістнадцять таких послідовно і ви отримаєте пакет на 51.2 В з опором приблизно 4-5 мОм разом із з'єднувачами.

Порахуйте струм короткого замикання: 51.2 В поділити на 0.005 Ом це понад 10 000 А. У реальності струм буде меншим через опір самого замикача й контактів, але порядок величини саме такий: тисячі ампер. Свинцевий акумулятор дасть у рази менше і "просяде" за секунди, LiFePO₄ витримає такий струм досить довго, щоб метал встиг випаруватися.

Практичний наслідок: гайковий ключ, що впав через дві клема, не "іскрить", він вибухає. Розплавлений метал летить у сторони, а не капає вниз. Саме тому наступні пункти не є перестраховкою.

1.2 Інструмент

- **Ізолюйте кожен ключ, який торкатиметься клем.** Термоусадка на 2/3 довжини ключа, або спеціалізований діелектричний інструмент. Одного шару ізоляційної стрічки недостатньо: вона зсувається.
- **Працюйте однією рукою,** коли це можливо. Друга рука в кишені або за спиною. Так струм не піде через грудну клітку.
- **Одна клема за раз.** Ніколи не тримайте інструмент так, щоб він міг одночасно дотягнутися до плюса й мінуса.
- **Динамометричний ключ обов'язковий.** Не "на око". Причина в главі 6.
- **Мультиметр із роздільною здатністю 0.001 В.** Дешевий прилад, що показує 3.2 В замість 3.284 В, для цієї роботи непридатний: усе балансування вимірюється в мілівольтах.

1.3 Прикраси, одяг, робоче місце

Зніміть обручку, годинник, браслети, ланцюжок. Золота обручка на пальці, що замкнула клема, розігрівається до температури плавлення тканини швидше, ніж встигаєте відсмикнути руку, і зняти її після цього неможливо. Це найчастіша тяжка травма у цій роботі, і вона повністю усувається однією дією перед початком.

Одяг з натуральних тканин: бавовна тліє, синтетика плавиться і прилипає до шкіри. Окуляри обов'язкові під час затягування клем і будь-яких робіт із шинами. Взуття на гумовій підшві.

Робочий стіл: дерев'яний або накритий гумовим килимком. Не металевий. Не тримайте на столі нічого металевого, крім того, що зараз у руках. Найпоширеніший сценарій аварії виглядає так: людина кладе ключ на верхню площину комірок "на секунду", потім рухає корпус, і ключ падає на клема.

1.4 Вогонь

LiFePO₄ у порівнянні з NMC значно безпечніша: вона не схильна до теплового розгону за нормальних умов і не горить від проколу так, як літій-кобальтові хімічні системи. Але за глибокого механічного пошкодження, зворотного заряду або сильного перегріву комірка виділяє газ (переважно CO і вуглеводні), який може займатися.

Газ із клапана отруйний. Крім чадного газу (CO), у ньому присутній фтористий водень (HF), що утворюється з електроліту й солей літію. Дихати цим димом не можна навіть кілька вдихів: HF пошкоджує дихальні шляхи, а наслідки проявляються з відстрочкою. Тому перша дія при виділенні газу або диму це вивести людей із приміщення й відчинити його зовні, а не гасити зсередини.

Розрізняйте два різні сценарії:

- **Горить щось поруч із пакетом** (проводка, корпус інвертора, речі в шафі), а комірки цілі. Це звичайна пожежа: знеструмити, гасити порошковим вогнегасником ABC.
- **Горить сам пакет** (клапан відкрився, комірка викидає полум'я й газ). Вогнегасник таку комірку не зупинить: окисник вона виробляє всередині себе. Виводьте людей, викликайте пожежну службу, дайте пакету вигоріти. Якщо це безпечно, охолоджуйте водою з відстані те, що стоїть поруч (сусідні комірки, стіни, речі), щоб вогонь не пішов далі, але не наближайтеся до пакета й не дихайте димом.
- Порошковий вогнегасник класу ABC поруч. Вода на пакет під напругою не подається.
- Не збирайте й не заряджайте пакет у житловій кімнаті, де ви спите. Комора, коридор, окрема шафа з вентиляцією.
- Вентиляція потрібна не через "виділення водню" (це історія про свинець), а щоб у разі несправності газ не накопичувався в замкненому просторі. Достатньо природної вентиляції приміщення й нещільної (не герметичної) шафи.
- Інвертор гріється сам і потребує вільного простору навколо радіатора: мінімум 10 см з боків, 20 см зверху, вентилятор нічим не перекритий.

1.5 Що робити, якщо

Комірка здулася. Не заряджати, не розряджати великим струмом, винести з приміщення, дати охолонути. Здута комірка це або результат перезаряду, або заводський брак, або наслідок відсутності стягування. У пакет вона більше не повертається.

Пахне різким солодкуватим запахом (електроліт). Негерметичність. Живлення геть, приміщення провітрити, комірку в утилізацію.

Іскра під час підключення інвертора. Це нормально: у інвертора великі вхідні конденсатори, і перше підключення дає короткий кидок струму. Ненормально, коли іскра триває: тоді це коротке замикання. Про попередній заряд конденсаторів (pre-charge) читайте у главі 7.

Ви замкнули клеми й нічого не згоріло. Перевірте кожен пройдений струмом елемент: клеми на предмет підпалін, з'єднувачі, BMS. Мікрозварювання в місці контакту руйнує різьбу й покриття клеми. Не вважайте це "пронесло і добре".

2. Приймання комірок

Найдорожча помилка у цьому проєкті робиться не паяльником, а бездіяльністю: комірки приймають "на віру", збирають пакет, і через місяць з'ясується, що одна з шістнадцяти має 240 А·год замість 280. Повернути її вже неможливо, а пакет тепер обмежений найслабшою коміркою назавжди.

Приймання займає від трьох днів до двох тижнів (переважно це очікування, а не робота). Це найкраще вкладення часу в усьому проєкті.

2.1 Розпакування й візуальний огляд

Розпакуйте на підлозі або низькому столі: комірка 280 А·год важить 5.4-5.6 кг, 314 А·год близько 6 кг, і чим менша висота, тим менше шкоди від випадкового падіння.

Перевіряйте кожну комірку за списком:

Що дивимось	Норма	Тривожно
Корпус	Рівні площини, ребра прямі	Опуклість боків, "бочка"
Ізоляційна плівка	Ціла, без порізів	Порізи до алюмінію, пропалини
Клеми	Різьба чиста, не зірвана	Забита різьба, вм'ятини, окислення
Вентиляційний клапан (зверху)	Рівний, без слідів	Здутий, зі слідами витікання
Маркування	Однакова партія на всіх комірках	Різні дати, різні наклейки, перебиті QR
Штрих-коди	Послідовні номери	Випадкові номери з різних партій

Опуклість. Покладіть комірку на рівну поверхню боком. Нова комірка має бути плоскою. Легка опуклість (до 1 мм) у нових комірках із високим SoC припустима, помітна "бочка" ні.

Різні партії. Комірки з різних партій мають різний внутрішній опір і різну реальну ємність, навіть якщо на них написано одне число. Це не привід відмовлятися від них, але це привід виміряти кожну (розділ 2.3) і бути готовим до більшого розкиду.

Корпус під напругою. Виміряйте напругу між мінусовою клемою й алюмінієвим корпусом (там, де плівка не закриває). Має бути близько нуля або кілька десятих вольт. Значна напруга означає, що плівка десь пробита і корпус контактує з внутрішнім елементом. Такий корпус не можна ставити в металевий ящик без додаткової ізоляції.

2.2 Напруга при отриманні

Виміряйте кожну комірку одразу після розпакування й запишіть у таблицю. Це ваша базова точка, до якої ви повертатиметеся весь час експлуатації.

Нормальні значення для нових комірок, що приїхали зі складу:

Стан	Напруга на комірку	Що це означає
Нормальне зберігання	3.28-3.32 В	Приблизно 50% заряду, склад тримає комірки саме так
Знижене	3.10-3.28 В	Довге зберігання або саморозряд, ще прийнятно
Низьке	2.90-3.10 В	Підозра на саморозряд, стежте окремо
Сильно розряджена	2.50-2.90 В	Заряджати окремо струмом 0.1С під наглядом, далі стежити за нею
Небезпечне	2.00-2.50 В	Глибокий розряд, ймовірна деградація, відновлення лише під наглядом
Брак	нижче 2.00 В	Не відновлювати, в утилізацію
Перевищене	вище 3.40 В	Комірка не з "нового" складу, її вже використовували

Розкид між комірками важливіший за абсолютне значення. Комплект, у якому всі шістнадцять комірок показують 3.286-3.294 В, це добрий комплект. Комплект, де є 3.31 В і 3.14 В, вимагатиме довшого балансування, і одна з цих комірок майже напевно виявиться слабкою на тесті ємності.

Є межа, нижче якої комірку не відновлюють. Коли напруга падає нижче приблизно 2.0 В, мідний струмознімач анода починає розчинятися в електроліті, а при наступному заряді мідь осідає назад уже де завгодно, зокрема наскрізь через сепаратор. Утворюються внутрішні перемички, і комірка може розігрітися й відкрити клапан саме під час "відновлювального" заряду, коли ви стоїте поруч. Тому правило жорстке: **нижче 2.0 В комірку не відновлюють - це брак, її утилізують.** Ніяких "спробую, раптом оживе": ціна помилки тут не гроші за комірку.

Комірку, що приїхала в діапазоні 2.0-2.5 В, оживляють дуже малим струмом (0.02-0.05С, тобто 6-14 А для 280 А·год) до 3.0 В, і лише потім заряджають нормально. Робіть це в пожежобезпечному місці (бетон, метал, поза житловим приміщенням), під наглядом і з термометром: комірка не має нагріватися більше ніж на кілька градусів. Якщо після такого відновлення вона нагрівається сильніше за сусідів або швидко втрачає напругу, вона у пакет не йде.

2.3 Тест ємності: методика

Це та частина, яку пропускають частіше за все, і саме вона окупається. Мета: дізнатися реальну ємність кожної комірки й переконатися, що жодна не є явним аутсайдером.

Що потрібно: регульований блок живлення (лабораторний БЖ) на 3.65 В і хоча б 10-20 А, електронне навантаження або резистивне навантаження з ваттметром, кулонометр (ватметр із підрахунком А·год, наприклад типу серії "енергометр"), термометр.

Процедура для однієї комірки:

- 1. Заряд.** Виставте на БЖ 3.65 В і обмеження струму 0.2-0.5С (для 280 А·год це 56-140 А; на практиці більшість збирачів обмежені можливостями БЖ і використовують 10-20 А, це теж прийнятно, просто довше). Заряджайте, доки напруга не досягне 3.65 В, а струм не впаде до 0.05С (близько 14 А для 280 А·год) або нижче, і не перестане падати.
- 2. Пауза.** 30-60 хвилин без навантаження. Напруга опуститься до приблизно 3.40-3.45 В: це нормально, це релаксація.

3. **Розряд із вимірюванням.** Розряджайте струмом 0.5C (140 А для 280 А·год) або меншим, до напруги 2.50 В на клеммах під навантаженням. Кулонометр покаже, скільки А·год ви зняли. Це і є реальна ємність.
4. **Запис.** Занесіть у таблицю: номер комірки, зняті А·год, температуру наприкінці розряду, час.
5. **Повернення в робочий діапазон.** Одразу зарядіть комірку назад хоча б до 3.30 В: залишати її на 2.5 В надовго шкідливо.

Як читати результат. Здорова комірка з маркуванням 280 А·год має видати 275-290 А·год (виробники часто дають невеликий запас). 260-275 А·год це прийнятно, але це вже нижня межа. Менше 250 А·год це підстава для реклаमाції.

Ключовий критерій це розкид, а не абсолют. Якщо всі шістнадцять комірок видали 281-287 А·год, ви маєте чудовий комплект. Якщо п'ятнадцять видали близько 285, а одна 258, ця одна визначатиме ємність усього пакета: послідовно з'єднані комірки завжди обмежені найслабшою. Замінюйте її, а не сподівайтесь, що "розійдеться".

Спрощений варіант, коли немає обладнання для повного тесту: зарядіть усі комірки в паралель до 3.65 В (див. главу 3), потім зберіть пакет і зробіть один повний цикл розряду через інвертор із кулонометром. Ви не дізнаєтеся ємність кожної комірки окремо, але побачите, яка з них першою просідає до нижнього порогу під навантаженням. Це і є слабка ланка.

2.4 Внутрішній опір

Внутрішній опір (IR) це другий показник здоров'я комірки, і він виявляє проблеми, які тест ємності пропускає.

Орієнтовні значення для нових комірок:

Ємність комірки	Типовий IR	Насторожує
100-105 А·год	0.5-0.8 мОм	понад 1.2 мОм
280 А·год	0.20-0.35 мОм	понад 0.5 мОм
304-314 А·год	0.18-0.30 мОм	понад 0.45 мОм

Значення в таблиці наведені для стандартного вимірювання **на змінному струмі 1 кГц (AC-IR)**: саме так їх дають виробники й саме так міряє спеціальний тестер. Якщо тестера немає, є практичний метод постійним струмом (DC-IR): подайте на комірку відоме навантаження (наприклад 50 А), виміряйте напругу без навантаження й під навантаженням через 10 секунд. Опір = різниця напруг поділити на струм. Просідання на 0.015 В за струму 50 А означає 0.3 мОм - і те, що це число потрапляє в діапазон AC-таблиці вище, чистий збіг: порівнювати їх усе одно не можна.

Ці два числа не можна порівнювати між собою. DC-метод включає не лише омичну складову, а й поляризацію електродів, тому він показує у 2-4 рази більше за паспортне значення 1 кГц. Комірка, у якій тестер показав би 0.25 мОм, під навантаженням дасть 0.6-1.0 мОм, і це не дефект. Тому: **результат DC-виміру порівнюють тільки між комірками одного комплекту**, виміряними тим самим методом, тим самим струмом і при тій самій температурі. Звіряти його з діапазонами таблиці вище не можна, інакше ви "забракуєте" здоровий комплект.

Що з цим робити. Комірка з IR удвічі вищим за сусідів гріється удвічі сильніше під тим самим струмом і просідатиме першою під навантаженням. Навіть якщо її ємність нормальна, у високострумівому пакеті вона стане слабкою ланкою. Для резервного живлення з помірними струмами (до 0.3C) невеликий розкид IR не критичний.

Важливо: міряйте IR при однаковій температурі всіх комірок і при схожому SoC. Холодна комірка показує вищий опір, це не дефект.

2.5 Стягування (компресія)

Призматичні комірки LiFePO₄ розраховані на роботу в стягнутому стані. Під час заряду вони розширюються, під час розряду стискаються, і без зовнішнього обмеження це "дихання" поступово руйнує внутрішню структуру: шари електродів розшаровуються, ємність падає швидше, ніж повинна.

- Дві жорсткі торцеві пластини (сталь 3-5 мм, фанера 12-15 мм, або алюмінієвий профіль) і 4 шпильки M6-M8 по кутах.
- Між комірками тонкі прокладки (1-2 мм спінений матеріал або склотекстоліт), щоб вони не терлися боками одна об одну і мали трохи місця для розширення.
- Цільове зусилля близько 300 кгс на пакет, тобто орієнтовно 12 psi по площі бічної грані. Практичний орієнтир без динамометра: стягнути так, щоб комірки більше не рухалися рукою, але без видимої деформації плівки й без "прогинання" торцевих пластин.
- Не використовуйте з'єднувальні шини як елемент, що тримає пакет. Шина проводить струм, а не стягує конструкцію.

Комірка, що працювала без стягування рік, зазвичай уже має легку "бочку" й на 5-15% меншу ємність. Це незворотно.

3. Перша зарядка крок за кроком

Ця глава про найважливішу процедуру всієї збірки: верхнє балансування (top balancing). Її роблять один раз, до складання пакета в послідовне коло, і від неї залежить, чи буде ваш пакет віддавати паспортну ємність, чи 70% від неї.

3.1 Чому саме верхнє балансування

Комірки, з'єднані послідовно, отримують однаковий струм, але заповнюються по-різному, бо мають трохи різну ємність. Уявіть шістнадцять відер, з'єднаних одним шлангом: наливається однаково, але одне відро менше й переповниться першим.

BMS зупинить заряд, щойно **будь-яка** комірка досягне порогу перезаряду (3.65 В). Якщо на момент старту комірки були заповнені по-різному, найповніша впреться в стелю, коли решта ще далеко від повного заряду, і пакет "закінчиться" на 80% або й на 60%.

Верхнє балансування вирівнює комірки саме у верхній точці: усі одночасно приходять до 3.65 В. Нижні точки при цьому розійдуться (слабша комірка розрядиться першою), і це правильний компроміс: краще недобрати внизу, де напруга падає полого, ніж угорі, де крива різко йде вгору і BMS реагує миттєво.

Балансування "по низу" (bottom balancing) застосовують у специфічних сценаріях без BMS. Для домашнього резерву з BMS правильна відповідь це верхнє балансування.

3.2 Підготовка: паралельне з'єднання

Комірки балансують у **паралелі**: усі плюси разом, усі мінуси разом. Так вони автоматично приходять до однакової напруги, а зовнішній блок живлення заповнює їх до однакового рівня.

Обережно з різницею напруг. Якщо одна комірка на 3.32 В, а інша на 3.10 В, при з'єднанні між ними потече великий струм: різниця 0.22 В на сумарному опорі 0.5 мОм це понад 400 А. Це небезпечно й шкідливо для обох.

Правильна послідовність:

1. Відсортуйте комірки за напругою.
2. Спочатку з'єднайте в паралель ті, що відрізняються не більше ніж на 0.05 В. Вони вирівнюються за хвилини.
3. Комірки, що випадають, підтягніть окремо блоком живлення (заряд) або невеликим навантаженням (розряд) до рівня решти, і лише потім додавайте до паралелі.
4. Альтернатива: підключайте кожну наступну комірку через провід меншого перерізу (наприклад 2.5 мм²) або через резистор на кілька ом на перші хвилини, щоб струм вирівнювання був обмеженим, і тільки потім переходьте на нормальну шину.

Шини для паралелі. Струм у паралельному з'єднанні під час заряду розподіляється між комірками, але через крайні комірки проходить увесь струм БЖ. Провід 16 мм² витримує до 80 А і цього більш ніж достатньо для типового БЖ на 20-60 А. Клеми затягуйте нормальним моментом (глава 6): погано затягнута клема на паралелі це не тільки нагрів, а й спотворений результат балансування.

Схема підключення БЖ. Плюс блока живлення на крайню комірку з одного кінця, мінус на крайню комірку з протилежного кінця. Так струм заряду проходить через увесь ланцюг рівномірніше, ніж якщо чіпляти обидва дроти до однієї комірки.

3.3 Процедура балансування

1. **Виставте на БЖ напругу 3.65 В** і обмеження струму на рівні, який він тягне (0.2C або менше за сумою: типово 20-50 А на всю паралель). Ставити 3.70 В "щоб швидше" не можна: жодна комірка не має бачити більше 3.65 В.
2. **Підключіть і залиште.** Спочатку БЖ працює в режимі обмеження струму, напруга поступово зростає. Це основна фаза (bulk).
3. **Спостерігайте перехід у фазу насичення (absorb).** Коли напруга на паралелі досягне 3.65 В, БЖ перейде в режим стабілізації напруги, а струм почне падати. З цього моменту починається найдовша частина.
4. **Чекайте, доки струм впаде до 2-4 А на всю паралель** і перестане падати. На практиці він сходить майже до нуля. Тут не працює звичний для однієї комірки критерій завершення заряду 0.02-0.05C: для паралелі з шістнадцяти комірок по 280 А·год (сумарно 4480 А·год) він дав би від дев'яноста до понад двохсот ампер і зупинив би процес задовго до вирівнювання. Орієнтир на балансуванні абсолютний, у амперах: одиниці ампер на всю збірку.
5. **Тримайте ще 6-12 годин після того, як струм перестав падати.** Саме в цей час дозаповнюються останні відсотки, і саме тут вирівнюються комірки. Загальний час процедури: 12-48 годин залежно від початкового стану й потужності БЖ. Це нормально. Скорочувати цей етап немає сенсу, він і є вся суть роботи.
6. **Перевірка.** Від'єднайте БЖ, зачекайте 2 години, роз'єднайте паралель і виміряйте кожну комірку окремо. Розкид після коректного балансування має бути в межах 0.005-0.010 В.

Ознака проблеми: одна комірка після відключення падає до 3.35 В, тоді як інші тримають 3.45 В. Це саморозряд або дефект. Позначте її й перевірте окремо: зарядіть до 3.65 В, залиште на 72 години без навантаження й порівняйте, наскільки вона просіла проти сусідів.

3.4 Складання в послідовне коло й перший заряд пакета

1. **Роз'єднайте паралель.** Комірки тепер усі на однаковій напрузі приблизно 3.40-3.45 В у спокої.
2. **Зберіть послідовне коло** відповідно до вашої конфігурації (4s = 12.8 В, 8s = 25.6 В, 16s = 51.2 В), дотримуючись моментів затягування з глави 6.
3. **Перед підключенням BMS переконайтеся в полярності.** Виміряйте загальну напругу пакета: для 16s вона має бути близько $16 \times 3.42 = 54.7$ В. Якщо число менше очікуваного на подвоєну напругу однієї комірки, десь комірка стоїть навпаки. Зворотно підключена комірка знищить і себе, і BMS.
4. **Підключайте балансувальні дроти BMS строго за порядком**, від мінуса пакета (В-) до плюса, по одному. Це найпоширеніше місце помилки з фатальними наслідками: переплутані балансувальні дроти спалюють вхідні кола BMS.
5. **Перевірте показання BMS** до підключення навантаження: усі комірки мають бути на одній напрузі, сумарна напруга збігатися з виміряною мультиметром, температурні датчики показувати кімнатну температуру.

Перший заряд пакета зарядним пристроєм. Виставте на зарядному кінцеву напругу з розрахунку 3.50-3.55 В на комірку (не 3.65). Для 16s це 56.0-56.8 В, для 8s 28.0-28.4 В, для 4s 14.0-14.2 В.

Конфігурація	Номинал	Заряд (3.50 В/ комірку)	Заряд (3.55 В/ комірку)	Абсолютна межа (3.65 В/ комірку)
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

Чому 3.50-3.55 В, а не 3.65 В. Верхня ділянка кривої LiFePO₄ дуже крута: між 3.45 В і 3.65 В міститься менше 3% ємності, зате саме там комірка старіє найшвидше і саме там BMS постійно спрацьовує на перезаряд. Заряджаючи до 3.50-3.55 В на комірку, ви втрачаєте кілька відсотків ємності й виграєте значне подовження ресурсу та спокійну роботу без постійних відключень. Насправді втрата ще менша, ніж здається: заряд, який завершується на 3.55 В із витримкою до падіння струму, набирає приблизно 99% реальної ємності комірки. Різниця між "до 3.55 В" і "до 3.65 В" це не десятки відсотків автономності, а один-два відсотки.

3.65 В потрібні під час балансування (щоб гарантовано впертися в стелю на всіх комірках одночасно) і як аварійна межа BMS. У щоденній експлуатації там робити нічого.

Струм заряду. Тримайтеся діапазону 0.2-0.5С. Для 280 А·год це 56-140 А. Менше можна завжди, це лише повільніше. Більше за 0.5С скорочує ресурс і перевантажує BMS.

3.5 За чим стежити під час першого заряду

Перший заряд зібраного пакета проведіть поруч, не залишаючи його без нагляду. Дивіться на:

- **Розкид напруг комірок (delta).** На початку заряду 0.005-0.015 В це норма. Якщо в кінці заряду delta зростає до 0.05 В і більше, балансування було недостатнім або є слабка комірка.
- **Найвищу комірку.** Вона не має досягати 3.65 В раніше за решту. Якщо досягає, зупиніть заряд і повторіть верхнє балансування.
- **Температуру.** Комірки під час заряду 0.2-0.5С нагріваються на 3-8 градусів вище кімнатної. Локальний нагрів однієї комірки або клеми означає поганий контакт або проблемну комірку.
- **Температуру клем і з'єднувачів.** Рукою (тильним боком долоні, обережно). Тепла клема це недотягнута клема або недостатній переріз.
- **Струм.** Він має відповідати виставленому на зарядному. Якщо струм менший за очікуваний,десь високий опір у ланцюзі.

Наприкінці заряду BMS має показати всі комірки в межах 3.50-3.55 В із розкидом до 0.010 В, а SoC близько 100%. Якщо це так, найважча частина позаду.

4. Балансування в експлуатації

Верхнє балансування (глава 3) робиться один раз, руками, до збірки. Далі за рівністю комірок стежить BMS. Ця глава про те, як саме вона це робить і чому у багатьох збірках балансування "не працює".

4.1 Пасивне й активне балансування

Пасивне балансування це резистор і транзистор на кожній комірці. Коли комірка вища за решту, BMS вмикає резистор і зливає надлишок у тепло. Струм балансування типово 30-200 мА, у потужніших платах до 300 мА.

Наслідки:

- Балансувати можна лише "вниз": зайву енергію відводять від найвищої комірки, підтягнути найнижчу неможливо.
- Тому пасивне балансування має сенс **лише під час заряду**, коли пакет підходить до верхньої точки й різниця стає видимою. Балансувати в спокої або під час розряду це просто марна витрата енергії.
- Швидкість дуже низька. Струм 100 мА для вирівнювання 5 А-год різниці потребує 50 годин чистого часу балансування, а балансування працює лише кілька хвилин наприкінці кожного заряду. Звідси головний висновок: **пасивне балансування не виправляє поганий старт**, воно тільки утримує вже вирівняний пакет.

Активне балансування перекачує заряд із вищої комірки в нижчу через конденсатор або трансформатор, із ККД 80-90%. Струм у побутових платах 0.6 А, 1 А, 2 А, у потужніших до 5 А. Це на порядок швидше і працює в обидва боки.

Плати JK BMS популярних серій мають вбудований активний балансер (звідси й популярність). Але навіть активний балансер на 2 А не замінює верхнього балансування: щоб вирівняти комірки, що розійшлися на 20 А-год, йому знадобиться 10-12 годин безперервної роботи (20 А-год при струмі 2 А), а працює він, як правило, лише у визначеному діапазоні напруг і лише кілька хвилин наприкінці заряду.

4.2 Порогові налаштування балансування

Три параметри визначають, коли балансер вмикається.

Напруга старту балансування (balance trigger voltage). Балансер вмикається тільки коли напруга найвищої комірки перевищила цей поріг. Типове значення **3.40 В**, розумний діапазон 3.38-3.45 В.

Чому саме там: нижче 3.40 В крива LiFePO4 практично плоска, і різниця в напрузі не відповідає різниці в заряді. Комірка на 3.28 В і комірка на 3.30 В можуть мати однаковий SoC, і балансер, увімкнений на такій ділянці, буде "виправляти" вигаданий дисбаланс, роблячи реальний. Вище 3.40 В крива вже росте, і напруга стає надійним показником заповненості.

Різниця напруг для старту (balance delta / trigger difference). Мінімальний розкид між найвищою і найнижчою коміркою, за якого має сенс щось робити. Типове значення **0.010 В (10 мВ)**, розумний діапазон 5-30 мВ.

Занадто мала (3 мВ) змушує балансер працювати постійно і гріти плату на шумі вимірювання. Занадто велика (50 мВ) означає, що дисбаланс встигне стати помітним, перш ніж почнеться робота.

Струм балансування (balance current). Для активних плат JK це 0.6-2 А залежно від моделі; часто регульований. Ставте максимум, який дозволяє плата, але стежте за температурою балансира: він гріється, і це нормально, доки нагрів помірний.

Балансування лише під час заряду. Більшість плат мають окремий перемикач, який дозволяє балансувати тільки коли йде зарядний струм. Для пасивних балансирів це правильне значення (увімкнено). Для активного балансира допускається балансування завжди, і воно навіть корисне, бо активний балансир не витрачає енергію в тепло, а перекладає її в сусідню комірку. **Перевірте інструкцію вашої BMS:** у різних серій цей параметр називається по-різному і поводить себе неоднаково.

4.3 Як зрозуміти, що балансування працює

Дивіться на delta (різницю між максимальною і мінімальною коміркою) у трьох точках циклу:

Точка циклу	Здоровий пакет	Потребує уваги
Спокій, середина SoC	0.002-0.010 В	понад 0.020 В
Кінець заряду	0.005-0.020 В	понад 0.050 В
Кінець розряду	0.010-0.040 В	понад 0.100 В

Delta наприкінці розряду завжди більша, ніж наприкінці заряду: унизу крива теж крута, і слабша комірка провалюється швидше. Це нормально й саме по собі не є діагнозом.

Delta зростає з циклами (було 0.010 В, стало 0.030 В через три місяці): це або природний розхід, який балансир не встигає закрити, або одна комірка має підвищений саморозряд. Спостерігайте, яка саме комірка "тікає". Якщо це завжди одна й та сама і завжди вниз, це саморозряд.

Delta стрибнула різко за один цикл: перевіряйте не комірку, а контакт. Погана клема або окислений з'єднувач створює падіння напруги, яке BMS бачить як просідання комірки.

4.4 Коли повторювати ручне верхнє балансування

Планово раз на рік або за такими ознаками:

- Delta наприкінці заряду стабільно перевищує 0.050 В.
- BMS відключає заряд за перевищенням на одній комірці, коли SoC ще менший за 95%.
- Пакет віддає помітно менше А-год, ніж рік тому, при тому, що комірки самі по собі здорові.

Процедура та сама, що в главі 3: роз'єднати послідовне коло, з'єднати в паралель, зарядити до 3.65 В, витримати. Це кілька годин роботи раз на рік, і вони повертають пакету паспортну ємність.

5. Налаштування BMS

BMS це не "розумний пристрій, який усе зробить сам". Це набір порогів, і за замовчуванням вони виставлені виробником усередненими або й просто некоректними для вашої конфігурації. Ця глава про те, що саме треба виставити й чому.

Значення нижче наведені як типові діапазони для поширених плат серії JK. **Перевірте інструкцію вашої BMS:** назви параметрів і навіть їхня логіка відрізняються між серіями й прошивками.

5.1 Що BMS робить і чого не робить

Робить: стежить за напругою кожної комірки, за загальним струмом, за температурою; розмикає силові ключі при виході за межі; балансує комірки; рахує SoC.

Не робить: не є вимикачем на кожен день (глава 9, помилка 6), не замінює запобіжник (розмикання MOSFET це не гальванічна ізоляція, і при короткому вони можуть пробитися в замкнутий стан), не рятує від помилок монтажу, не компенсує відсутність верхнього балансування.

5.2 Порогова таблиця (типовий профіль 16s, комірки 280 А·год)

Параметр	Типове значення	Розумний діапазон	Коментар
Перезаряд комірки (Cell OVP)	3.65 В	3.60-3.65 В	Абсолютна межа, не робоча точка
Зняття перезаряду (OVP release)	3.55 В	3.45-3.55 В	Гістерезис, щоб не "цокало"
Затримка OVP	1-2 с	1-5 с	
Перерозряд комірки (Cell UVP)	2.80 В	2.70-2.90 В	Нижче 2.5 В комірка деградує
Зняття перерозряду (UVP release)	3.00 В	2.95-3.10 В	
Затримка UVP	2-5 с	2-10 с	Довша затримка терпить пускові струми
Перезаряд пакета	58.4 В (16s)	3.65 x N	Дублює комірковий поріг
Перерозряд пакета	44.8 В (16s)	2.80 x N	
Струм заряду, обмеження (Charge OCP)	100 А	1.2 x макс. струму зарядного	І не вище 0.5С ємності пакета й не вище номіналу плати
Затримка Charge OCP	5-10 с		
Струм розряду, обмеження (Discharge OCP)	150-200 А	за розрахунком, розділ 5.3	
Затримка Discharge OCP	5-10 с	3-30 с	Має пережити пуск інвертора

Параметр	Типове значення	Розумний діапазон	Коментар
Друга ступінь розряду (OCP2)	250-300 А	1.5-2 x OCP1	Затримка 0.1-1 с
Короткого замикання (SCP)	заводське		Спрацьовує за мікросекунди
Заряд, верхня межа температури	50-55 C	45-55 C	
Заряд, нижня межа температури	5 C	3-5 C, абсолютний мінімум 0 C	Критично, розділ 5.4
Зняття низькотемпературного блокування	10 C	8-12 C	
Розряд, нижня межа температури	-20 C	-20...-10 C	
Розряд, верхня межа температури	60 C	55-65 C	
Температура MOSFET, відсічка	80-90 C		Заводське, не піднімати
Балансування, напруга старту	3.40 В	3.38-3.45 В	Глава 4
Балансування, різниця для старту	0.010 В	0.005-0.030 В	
Струм балансування	0.6-2 А	за моделлю плати	
Напруга комірки для SoC 100%	3.55 В	3.50-3.60 В	Має збігатися з профілем зарядного
Напруга комірки для SoC 0%	2.80 В	2.75-2.90 В	Має збігатися з UVP
Ємність пакета (Capacity)	280 А·год	реальна за тестом	Від неї рахується SoC

Для 8s і 4s пакетні пороги перераховуються множенням на кількість комірок; коміркові пороги не змінюються.

5.3 Розрахунок струмових порогів

Струмові пороги виводяться з потужності навантаження, а не беруться "з голови".

Крок 1. Тривала потужність (contW). Сума потужностей усього, що працює одночасно: $\text{contW} = \text{сума}(\text{потужність}_i \times \text{кількість}_i)$.

Крок 2. Пікова потужність (peakW). Найбільший одиночний пусковий струм поверх тривалої потужності: $\text{peakW} = \text{contW} + \max(\text{пускова}_i - \text{номінальна}_i)$. Холодильник із номіналом 150 Вт і пуском 900 Вт додає до тривалої потужності 750 Вт, а не 900.

Крок 3. Струм BMS. $\text{струм BMS} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$, де V це номінальна напруга пакета (12.8, 25.6 або 51.2 В), а 1.25 це обов'язковий запас 25%.

Приклад: пакет 25.6 В, contW 800 Вт, найбільший пусковий приріст 750 Вт, отже $peakW = 1550$ Вт. $1550 / 25.6 \times 1.25 = 75.7$ А. Беремо BMS на 100 А.

Чому саме 1.25. Запас 25% покриває: падіння напруги пакета під навантаженням (за 20% SoC пакет 25.6 В працює ближче до 24 В, і струм зростає), похибку вимірювання BMS, а також відхилення реальних пускових струмів від паспортних. Без цього запасу BMS відключатиметься на кожному пуску компресора.

Чесна поправка про ККД. Формула рахує струм від потужності навантаження, а реальний струм із пакета більший: інвертор бере на себе втрати, і при ККД 0.88 він тягне приблизно на 14% більше, ніж віддає ($W / 0.88 / V$). Запас 1.25 цю різницю не замінює, він додається зверху: доки інвертор працює не на повну, паспортна потужність зазвичай помітно вища за реальне навантаження, і саме на цьому тримається спрощений розрахунок $peakW / V \times 1.25$. Але якщо ви плануєте тривало вантажити інвертор на повну паспортну потужність, спочатку порахуйте реальний струм з урахуванням ККД: $I = W / 0.88 / V$, а тоді, як і завжди, застосуйте той самий запас 25% - провід і запобіжник обирайте від $I \times 1.25$, а не від I напряму. Для інвертора 3000 Вт на 25.6 В: $I = 3000 / 0.88 / 25.6 = 133$ А, із запасом 1.25 це 166 А, отже запобіжник 200 А і провід 50 мм² - замість 150 А і 35 мм², які дав би розрахунок за номінальним струмом без поправки на ККД.

Затримка важливіша за поріг. Пуск двигуна триває 0.1-2 секунди. Якщо поріг із запасом 1.25 усе одно перевищується на пуску, правильне рішення це збільшити затримку спрацьовування першої ступені до 5-10 секунд і покластися на другу ступінь (OCP2) із коротшою затримкою для реальних аварій. Не піднімайте поріг вище номіналу самої плати.

5.4 Температурні пороги: найважливіший параметр

Заряд при температурі комірок нижче 0 C заборонений. Це не рекомендація й не "бажано". Під час заряду на морозі літій не входить у структуру анода, а осідає на її поверхні металевими дендритами (літієве покриття, plating). Наслідки:

- Ємність втрачається незворотно, кілька відсотків за кожен епізод.
- Внутрішній опір росте.
- Дендрити можуть з часом проколоти сепаратор і викликати внутрішнє коротке замикання.
- **Зовнішніх ознак немає.** Комірка виглядає нормально, напруга нормальна, і людина дізнається про проблему через півроку, коли пакет тримає вдвічі менше.

Тому налаштуйте так:

1. **Температурний датчик має бути на комірці**, а не на платі BMS і не в повітрі. Далі важливо, на якій саме комірці, бо два захисти дивляться в різні боки.

Низькотемпературне блокування заряду має орієнтуватися на найхолоднішу комірку. Блокування спрацьовує на тому, що бачить датчик, а осідання літію відбувається в тій комірці, яка реально холодна. Якщо датчик стоїть на центральній (найтеплішій) комірці, він покаже +6 C тоді, коли крайня комірка біля стінки ящика має 0 C, і BMS дозволить заряд, який цю крайню комірку зруйнує. Тому **основний датчик заряду ставлять на крайню комірку з боку зовнішньої стінки або дна** (звідки йде холод) - у найхолоднішій точці пакета.

Верхня температурна відсічка, навпаки, орієнтується на найгарячішу комірку, а це центральна: вона оточена сусідами, гріється від них і найповільніше віддає тепло. Другий датчик ставлять на бічну грань центральної комірки, і саме він відповідає за відсічку по перегріву при заряді й розряді.

Якщо плата має лише один вхід датчика, ставте його на крайню холодну комірку: узимку помилка в бік холоду коштує дорожче, а перегрів у побутовому резерві з помірними струмами трапляється значно рідше.

2. **Нижня межа заряду 5 С**, зняття блокування при 10 С. Абсолютний фізичний мінімум це 0 С, але поріг ставлять із запасом: датчик має власну похибку (типовий NTC це $\pm 1-2$ С), а між точкою вимірювання й найхолоднішою ділянкою комірки завжди є градієнт у кілька градусів. Проміжок 5 градусів між блокуванням і зняттям потрібен ще й для того, щоб система не вмикалася й не вимикалася на межі.
3. **Не покладайтеся на зарядний пристрій**. Більшість зарядних не знають температури пакета. Захист має бути в BMS.
4. **Розряд на морозі дозволений** до -20 С, але ємність при -10 С падає приблизно на 20-30%, і це нормально: вона повернеться після прогріву.

5.5 Порядок налаштування й перевірки

1. Підключіть BMS до застосунку (Bluetooth) або ПК до підключення силових дротів.
 2. Виставте кількість комірок (S count) і хімію (LiFePO4/LFP). Помилка тут робить усе інше безглуздим.
 3. Виставте ємність пакета за результатами тесту з глави 2 (наприклад, не 280, а виміряні 275 А·год).
 4. Введіть коміркові пороги з таблиці 5.2.
 5. Введіть струмові пороги за розрахунком 5.3.
 6. Введіть температурні пороги за 5.4.
 7. Введіть параметри балансування за главою 4.
 8. **Перевірте реальним спрацюванням**. Тимчасово опустіть поріг перерозряду до значення трохи вище поточної напруги комірки й переконайтеся, що BMS дійсно відключає навантаження. Потім поверніть робоче значення. Захист, який ніколи не перевіряли, це припущення, а не захист.
 9. Збережіть налаштування й **запишіть їх на папері** або зробіть знімок екрана. Після заміни плати або скидання ви будете вдячні собі.
-

6. Проводка

Більшість збірок, що згоріли, згоріли не через комірки, а через з'єднання. Комірка розподіляє тепло по всьому корпусу; погана клема концентрує його в точці розміром із монету.

6.1 Переріз проводу

Таблиця нижче це робочі значення для мідного багатожильного проводу в межах короткої траси (до 2-3 метрів) усередині корпусу або шафи, за температури довкілля до 40 С. Вони консервативні навмисно: у резервному живленні запас коштує дешевше за ремонт.

Переріз, мм ²	Тривалий струм	Типове застосування (розрахунок $\text{peakW} / V \times 1.25$)
6	30 А	Дрібні споживачі, гілки до 30 А, зарядний пристрій до 30 А
10	50 А	Лінії 12/24 В середньої потужності, гілка з запобіжником 40 А
16	80 А	600 Вт на 12 В, 1200 Вт на 24 В, 2400 Вт на 51.2 В (у всіх трьох випадках близько 59 А, запобіжник 60 А)
25	100 А	1000 Вт на 12 В, 2000 Вт на 24 В, 4000 Вт на 51.2 В (близько 98 А, запобіжник 100 А)
35	150 А	1500 Вт на 12 В, 3000 Вт на 24 В, 6000 Вт на 51.2 В (близько 147 А, запобіжник 150 А)
50	200 А	2000 Вт на 12 В, 4000 Вт на 24 В (близько 195 А, запобіжник 200 А)

Як вибрати. Порядок такий:

1. Розрахуйте струм так само, як для BMS: $\text{струм} = \text{peakW} / V \times 1.25$.
2. Округліть його **вгору** до найближчого номіналу запобіжника з ряду 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 А (розділ 7.1). Ця драбина розрахована на головні й інверторні кола; дрібні відгалуження до 30 А (наприклад лінія 12 В для дрібних споживачів) захищайте автомобільними плоскими запобіжниками номіналом 5-30 А, підібраними за тим самим правилом: струм $\times 1.25$, округлення вгору в межах діапазону плоских запобіжників, але ніколи не вище за допустимий струм самого проводу.
3. Візьміть рядок таблиці, чий тривалий струм не менший за номінал запобіжника, а не за розрахункове число.

Третій крок легко пропустити, і саме тут виникає найнебезпечніша помилка. Розрахунок дав 73 А, ви взяли 16 мм² (80 А) і поставили найближчий запобіжник із ряду, а він 100 А. Тепер провід витримує 80 А, а захист спрацює на 100 А: перегорятиме траса, а не запобіжник. Провід завжди рахують від номіналу запобіжника.

Приклад: інвертор 3000 Вт на пакеті 51.2 В. $3000 / 51.2 \times 1.25 = 73$ А, найближчий запобіжник угору 100 А, отже провід 25 мм² (100 А). Той самий інвертор на пакеті 25.6 В дає $3000 / 25.6 \times 1.25 = 146$ А, запобіжник 150 А, провід 35 мм². Ось чому вищий вольтаж пакета так помітно здешевлює проводку.

Поправка на ККД інвертора. Розрахунок вище виходить із потужності навантаження й припускає, що паспортна потужність інвертора це пік, а не постійний режим. Якщо інвертор працюватиме тривало на повну паспортну потужність, спочатку порахуйте реальний струм з урахуванням його ККД: $W / 0.88 / V$, а тоді, як і завжди,

застосуйте запас 1.25 і вже за цим числом виберіть переріз із таблиці вище (розділ 5.3).

Дві поправки.

- **Довжина.** За траси понад 3 метри рахуйте не лише нагрів, а й падіння напруги. Орієнтир: падіння на всій трасі туди й назад не має перевищувати 2-3% номіналу (для 12.8 В це 0.3 В, для 51.2 В це 1.2 В). За довгих трас беріть наступний переріз.
- **Пучок і температура.** Кілька силових дротів у одній гофрі або в замкнутому гарячому боксі гріють один одного. Знижуйте допустимий струм на 20-30% або беріть наступний переріз.

Тільки мідь, тільки багатожильний, тільки з якісною ізоляцією. Алюміній у побутовій збірці не використовуйте: він тече під тиском клеми, і затягнуте вчора з'єднання завтра слабке. Ізоляція має бути маркована на температуру 90 С або вище; зварювальний кабель (класу КГ) з тонкими жилами добре гнеться й підходить чудово. Не використовуйте автомобільний "аудіо" кабель невідомого перерізу з мідним покриттям на алюмінії (ССА): фактичний переріз міді там у рази менший за заявлений.

6.2 Наконечники й обтиснення

П'ясти силові з'єднання не можна. Три причини: припій втягується в жилу капіляром і робить її жорсткою, створюючи точку зламу; при аварійному нагріві припій плавиться першим і з'єднання розвалюється саме тоді, коли цього найменше треба; опір паяного з'єднання нестабільний.

Правильно: обтиснення гідравлічним пресом із шестигранною матрицею. Не "кувалдою й зубилом", не пасатижами.

Послідовність:

1. Зачистіть ізоляцію рівно на глибину гільзи наконечника, не більше. Оголена мідь за межами наконечника окислюється.
2. Не скручуйте жилу пальцями, не лудіть її.
3. Підберіть наконечник за перерізом (маркування 25-8 означає 25 мм² під болт М8) і матрицю за перерізом.
4. Обтисніть у два прийоми по довжині гільзи, повертаючи наконечник на 90 градусів між натисканнями, якщо матриця це передбачає.
5. Перевірка: потягніть із зусиллям. Наконечник не має рухатися взагалі. Провід, що повертається в гільзі, це брак.
6. Термоусадка з клейовим шаром на 20-25 мм на перехід ізоляція/наконечник. Це не косметика: вона фіксує перехід і не дає волозі потрапити в жилу.
7. Кольорове маркування: червона усадка на плюс, чорна або синя на мінус. Через рік ви не пам'ятатимете.

6.3 Моменти затягування

Клеми призматичних комірок LiFePO₄ виготовлені з алюмінію (плюс) і міді або сталі (мінус). Алюмінієва різьба зривається легко й безповоротно.

Різьба клеми	Момент	Примітка
M6	4-6 Н·м	Типово для комірок 100-105 А·год
M8	8-12 Н·м	Типово для комірок 280-314 А·год

Завжди звіряйтеся з паспортом ваших комірок: конкретний виробник може вказати вузький діапазон, і його значення важливіше за це.

Правила, що рятують клеми:

- **Динамометричний ключ обов'язковий.** Рука людини без досвіду дає на М8 від 3 до 25 Н·м, і другий варіант зриває різьбу.
- **Перевірте довжину болта.** Болт, довший за глибину різьби в клемі, впирається в дно й дає обманливе відчуття затягування, тоді як шина насправді притиснута слабо. Гірше: у деяких комірках занадто довгий болт дістає до внутрішнього елемента. Правило: різьбова частина болта входить у клему на 6-8 мм і не глибше.
- **Порядок шайб:** шина, потім плоска шайба, потім гровер (пружинна), потім болт. Гровер безпосередньо на шину продавлює її й псує контакт.
- **Не використовуйте зубчасті (стопорні) шайби** на алюмінієвій клемі: вони прорізають покриття і в місці порізу починається окислення.
- **Ніякого мастила з графітом.** Тонкий шар спеціальної струмопровідної пасти для алюмінієвих контактів припустимий, звичайне мастило створює ізолюючу плівку.
- **Протяжка після першого циклу.** Через тиждень роботи (кілька циклів заряд/розряд і кілька теплових розширень) пройдіться динамометричним ключем ще раз. Далі раз на пів року.

6.4 З'єднувальні шини

- **Переріз шини має відповідати струму пакета**, за тією ж таблицею 6.1. Мідна шина 20x3 мм має площу 60 мм² і з великим запасом покриває 200 А. Тонкі декоративні шини з комплекту дешевих комірок часто розраховані на 100-150 А, і в потужній збірці вони будуть найгарячішою точкою.
- **Гнучкі плетені шини кращі за жорсткі**, коли комірки можуть трохи рухатися: комірка "дихає" під час циклу, і жорстка шина передає це навантаження на клему.
- **Шина не тримає пакет.** Механіку тримають стягувальні пластини, шина лише проводить струм.
- **Мідь із покриттям (луджена або нікельована).** Гола мідь на алюмінієвій клемі утворює гальванічну пару й окислюється в місці контакту, поступово збільшуючи опір.
- **Контактні поверхні перед складанням** протріть спиртом, а не наждаком: подряпини зменшують площу реального контакту.

6.5 Балансувальні дроти

- Переріз 0.5-1.0 мм², окремий джгут, ніде не проходить поруч із силовою трасою.
- **Кожен балансувальний дріт має власний запобіжник** на 1-2 А (запобіжники в тримачах або самовідновні РРТС). Це стандартна практика, яку часто пропускають: якщо балансувальний дріт перетреться об корпус і замкне на сусідній потенціал, без запобіжника горить BMS, а іноді й джгут.
- Підключайте строго по порядку від В- вгору. Перевірте мультиметром напругу між сусідніми контактами роз'єму перед вставленням: має бути напруга однієї комірки (близько 3.3 В), а не подвоєна і не нуль.
- Роз'єм фіксуйте так, щоб він не вібрував і не вискакував. Пропала одна з ліній балансування, і BMS бачить комірку як нульову або як подвоєну, з відповідними спрацьовуваннями.

7. Запобіжники та комутація

BMS це електроніка, і вона може відмовити. Запобіжник це фізика, і він спрацює навіть тоді, коли не працює нічого іншого. Пакет без головного запобіжника не є завершеною установкою, скільки б розумних функцій не мала його BMS.

7.1 Розрахунок номіналу

Той самий множник, що для BMS і для проводу:

номінал запобіжника $\geq \text{peakW} / V \times 1.25$, далі округлення **вгору** до найближчого стандартного номіналу.

Стандартний ряд, з якого обирають: **40, 60, 100, 125, 150, 200, 250 А**.

Приклади:

Пакет	Інвертор	Розрахунок	Запобіжник	Мінімальний провід
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

Зверніть увагу на колонку проводу: вона рахується не від розрахункового струму, а від **номіналу запобіжника після округлення вгору**. Тому 73.2 А дають не 16 мм², а 25 мм²: запобіжник у цьому місці вже 100 А.

Три елементи, один струм. Провід, BMS і запобіжник рахуються за однією формулою з одним і тим самим запасом 1.25. Логіка захисту працює тільки якщо запобіжник спрацює раніше, ніж провід встигає перегрітись. Тому запобіжник ніколи не має бути потужнішим за допустимий струм проводу, до якого він підключений: інакше горить не запобіжник, а траса.

Перевірте по таблиці 6.1: запобіжник на 150 А вимагає проводу щонайменше 35 мм². Якщо у вас 25 мм² (100 А), або міняйте провід, або ставте запобіжник на 100 А.

7.2 Тип запобіжника: чому це важливо саме тут

Ключова характеристика для літійового пакета це **відключна здатність** (interrupt rating): максимальний струм, який запобіжник здатний розірвати, не перетворившись на дугу. Пам'ятаєте розрахунок із глави 1: пакет може віддати понад 10 000 А в коротке замикання. Запобіжник з відключною здатністю 2000 А в такій ситуації не рятує, а перетворюється на джерело плазмової дуги всередині корпусу.

Тип	Відключна здатність (DC)	Придатність
Class T	до 20 000 А (на 125 VDC)	Найкращий вибір для LiFePO ₄ , єдиний рекомендований для 51.2 В
MRBF (на клему)	10 000 А при 14 VDC, близько 5 000 А при 32 В, близько 2 000 А при 58 В	Тільки для систем 12 і 24 В, до 300 А
ANL / MIDI	2 000-6 000 А	Прийнятно лише для малих пакетів 12 В
Автомобільні "ножові"	1 000-2 000 А	Не для головного захисту
Побутовий автомат AC	не нормується для DC	Не використовувати на DC

Відключна здатність залежить від напруги, і на MRBF це вирішально. Паспортні 10 000 А цей запобіжник має при 14 VDC. Уже при 32 В він розриває близько 5 000 А, а при 58 В (тобто в системі 51.2 В на верхній точці заряду) близько 2 000 А. Пакет 16s здатний віддати понад 10 000 А, отже в системі 51.2 В MRBF опиняється в тій самій категорії, що й ANL: він не розірве аварійний струм, а перетвориться на дугу. Тому правило просте:

- **12 В і 24 В:** MRBF припустимий (зручний, ставиться прямо на клему), Class T кращий.
- **51.2 В:** тільки **Class T**. Ніяких MRBF, ANL чи ножових як головного запобіжника.

Автоматичні вимикачі змінного струму на постійному струмі не працюють як захист. Постійний струм не має переходу через нуль, тому дуга в контактах не гасне сама. Автомат, розрахований на 230 В AC, на 51.2 В DC може не розірвати ланцюг узагалі, залишившись у стані дуги, що горить. Якщо потрібен автомат-вимикач, беріть той, що явно маркований для DC із зазначеною напругою (наприклад "48 VDC" або "125 VDC") і потрібною відключною здатністю.

Напруга запобіжника має бути не нижча за напругу пакета. Запобіжник, маркований 32 VDC, у системі 51.2 В непридатний, навіть якщо його номінал у амперах здається правильним.

7.3 Де що ставити

Порядок від пакета до навантаження:

[+] пакета → головний запобіжник → головний вимикач → шина розподілу → споживачі
 [-] пакета → BMS (B-) → шина мінуса → споживачі

- **Головний запобіжник ставиться на плюсовому проводі якомога ближче до клеми пакета**, у межах 15-20 см. Ділянка проводу до запобіжника не захищена нічим, тому вона має бути мінімальною й механічно захищеною (гофра, ізольований тримач).
- **Головний вимикач ставиться після запобіжника.** Це ваш спосіб знеструмити систему для обслуговування. Він має бути розрахований на DC і на повний струм системи.
- **Окремий запобіжник на кожен гілку** після шини розподілу, розрахований за струмом саме цієї гілки. Інвертор, зарядний пристрій і лінія 12 В для дрібних споживачів це три різні гілки з трьома різними номіналами.
- **Зарядний пристрій має власний запобіжник** відповідно до свого струму, а не до струму інвертора.

- **BMS у мінусовому колі** (типова схема для більшості плат): силові ключі розмикають мінус, тому весь мінусовий струм проходить через B- BMS. Не підключайте жодного споживача до мінуса пакета в обхід BMS: він працюватиме без захисту, і BMS не бачитиме його струму.

7.4 Попередній заряд (pre-charge)

Вхідні конденсатори інвертора при підключенні розряджені, і в перший момент вони поведуться як коротке замикання. Кидок струму сягає сотень ампер за мілісекунди. Наслідки: сильна іскра, підгоряння контактів вимикача, зварювання контактів, а часом і спрацювання BMS по короткому.

Рішення просте: перед замиканням головного вимикача подайте живлення через резистор.

- Резистор 50-100 Ом потужністю 5-10 Вт, послідовно, на 2-5 секунд. Конденсатори заряджаються, іскри при основному підключенні немає. Номінал підбирається так, щоб постійна часу $R \times C$ вклалася в ці 2-5 секунд: для типової вхідної ємності інвертора 10-20 мФ резистор 50 Ом дає 0.5-1 с на одну постійну часу, тобто повний заряд за 2-5 с. Менший опір (10 Ом) пропускає надто великий кидок і сам стає джерелом іскри, більший (понад 200 Ом) заряджає конденсатори так довго, що людина не дочекається й замкне вимикач передчасно.
- Реалізація: окрема кнопка з резистором паралельно головному вимикачу, або просто торкання дротом із резистором перед замиканням вимикача.
- Готові вимикачі з функцією pre-charge теж існують і зручні.
- Ознака, що pre-charge потрібен: помітна яскрава іскра з клацанням при кожному підключенні інвертора. Ознака проблеми, а не браку pre-charge: іскра, що не припиняється. Це коротке замикання, і його треба шукати, а не гасити резистором.

7.5 Заземлення

- Металевий корпус шафи або ящика заземлюється на захисне заземлення будинку.
- Мінус пакета **не з'єднується** з корпусом і з заземленням, якщо інвертор не вимагає цього прямо у своїй документації. Плаваючий DC-контур безпечніший у побутовій установці: одиничний пробій на корпус не створює струму.
- Заземлення інвертора виконується строго за його інструкцією: у гібридних інверторів із функцією перемикання мережі схема з'єднання нейтралі й землі має значення для правильної роботи захисту.
- Не використовуйте водопровідні труби або арматуру як заземлення.

8. Зима

Українська зима це і головна причина, чому цей пакет збирається, і головна загроза для нього. Ця глава про те, як пережити її без втрати ємності.

8.1 Що саме робить холод

Заряд нижче 0 С руйнує комірку. Механізм описаний у розділі 5.4: літій осідає металевим шаром на аноді замість того, щоб входити в його структуру. Шкода накопичується, вона незворотна й непомітна ззовні. Це єдиний абсолютний "не можна" в усій зимовій експлуатації. Нуль це фізична межа, а поріг у BMS ставлять вище, на 5 С зі зняттям при 10 С: датчик має похибку, а всередині ящика завжди є градієнт у кілька градусів.

Розряд на морозі дозволений і безпечний, але:

Температура комірок	Доступна ємність	Заряд
+25 С	100%	Дозволений
+10 С	приблизно 95%	Дозволений
0 С	приблизно 85%	Заборонений
-10 С	приблизно 70-80%	Заборонений
-20 С	приблизно 60-70%	Заборонений

Втрата ємності на холоді тимчасова: після прогріву вона повертається повністю. Не сприймайте зимове зниження часу автономності як деградацію пакета.

Внутрішній опір на морозі зростає приблизно вдвічі при -10 С проти +25 С. Практичний наслідок: під навантаженням напруга просідає сильніше, і BMS може спрацювати по перерозряду раніше, ніж очікувалося. Це ще одна причина не ставити поріг UVP надто високим.

8.2 Найдешевше рішення: розмістити пакет у теплі

Перш ніж купувати нагрівачі, розгляньте просте: пакет 51.2 В на 280 А-год це приблизно 100 кг і об'єм порядку 40-60 літрів. Це шафа в коридорі, в комірці, під сходами, у опалюваному підвалі.

- Приміщення з температурою +10 С і вище знімає всю зимову проблематику повністю.
- Неопалюваний, але утеплений балкон із загальною стіною до квартири зазвичай тримає 0...+5 С навіть у сильний мороз, і цього вже достатньо, якщо є невеликий підігрів.
- Гараж, вулична шафа, неутеплений сарай це сценарії, де потрібен активний підігрів.

Пакет сам по собі виділяє тепло під час роботи (втрати на внутрішньому опорі), а велика теплова маса змінює температуру повільно: 100 кг комірок остигають на кілька градусів за добу, а не за годину. Це працює на вас.

8.3 Утеплення

Утеплення дешевше й надійніше за нагрівання: воно не споживає енергії й не може вийти з ладу.

- Екструдований пінополістирол (XPS) 20-30 мм по всіх стінках ящика, включно з дном і кришкою. Дно найважливіше: холод іде знизу, від бетону.
- Пакет не ставиться на бетон безпосередньо. Дерев'яний піддон або шар XPS під ящиком.
- Утеплення має бути з зазором для BMS і особливо для інвертора: інвертор гріється й потребує вільного повітря, його не утеплюють разом із пакетом.
- Не робіть конструкцію герметичною. Утеплена, але вентилярована, це правильне поєднання.

8.4 Активний підігрів

Коли пакет мусить стояти на морозі:

Обладнання. Силіконові нагрівальні килимки на 12 В або 24 В, потужність 20-50 Вт на килимок. На пакет 16s зазвичай досить 2-4 килимків загальною потужністю 60-150 Вт.

Розміщення. Килимки під пакетом і на бічних гранях крайніх комірок, не зверху (тепло й так іде вгору). Через тонкий шар теплопровідного матеріалу, не безпосередньо на плівку комірки, щоб не було локального перегріву.

Керування. Термостат із датчиком на комірці: вмикати при +5 С, вимикати при +12 С. Так пакет виходить трохи вище порога зняття блокування заряду (10 С, розділ 5.4) і заряд справді стартує. Такий гістерезис не дає системі клацати щохвилини. Багато BMS мають вихід керування нагрівом; якщо у вашої він є, це найзручніший варіант, бо BMS уже знає температуру комірок.

Логіка живлення нагріву це головна тонкість. Нагрівати пакет від самого пакета взимку означає розряджати його, щоб дозволити собі заряджатися. Правильна схема:

1. Є мережа: нагрів живиться від мережі (через блок живлення), пакет заряджається після прогріву вище 10 С.
2. Немає мережі: нагрів або вимкнений, або живиться від пакета в мінімальному режимі (лише щоб утримати температуру вище -10 С для розряду). Заряджати все одно нема від чого, тому підтримувати +10 С немає сенсу.
3. Аварійний нижній поріг: якщо SoC пакета впав нижче 20-30%, нагрів вимикається повністю. Краще холодний пакет, ніж розряджений у нуль.

Порахуйте, чому саме третій пункт важливий. Нагрів на 100 Вт, що працює добу без мережі, з'їдає $100 \times 24 = 2400 \text{ В} \cdot \text{год}$. Пакет 51.2 В на 280 А·год містить $51.2 \times 280 = 14\,336 \text{ В} \cdot \text{год}$, отже підігрів забирає близько 17% усього запасу за добу, нічого не живлячи. Два-три доби блекауту в мороз, і пакет розряджений у нуль самим лише обігрівом. Тому взимку без мережі нагрів або вимкнений, або утримує мінімум, потрібний для розряду, а не комфортні +10 С.

Порядок дій при поверненні мережі після зимового блекауту. Спочатку прогрів, потім заряд. Якщо BMS налаштована правильно (розділ 5.4), вона зробить це сама: блокуватиме заряд, доки комірки не досягнуть 10 С. Якщо ви пропустили це налаштування, зробіть це зараз, до першого морозу.

8.5 Зимовий чеклист

- Температурні датчики BMS фізично на комірках, показання перевірені.

- Нижня межа заряду 5 C виставлена й перевірена, зняття блокування при 10 C.
 - Утеплення встановлене, дно ізольоване від бетону.
 - Нагрів (якщо є) перевірений на реальному спрацьовуванні термостата.
 - Живлення нагріву не залежить від пакета, коли є мережа.
 - Клеми протягнуті динамометричним ключем (перепади температури послаблюють з'єднання).
 - Пакет заряджений до 100% перед сезоном, delta перевірена.
-

9. Типові помилки

Десять сценаріїв, які повторюються зі збірки в збірку. Для кожного: що роблять, як це проявляється і що робити натомість.

Помилка 1. Збірка без верхнього балансування

Що роблять. Отримують комірки з напругою 3.29-3.31 В, вважають "вони й так однакові", збирають послідовно й заряджають.

Симптом. Пакет заряджається до 60-85% і BMS обриває заряд по перезаряду однієї комірки. Ця комірка на 3.65 В, а найнижча ще на 3.30 В. Автономність значно менша за розрахункову.

Чому. Різниця 0.02 В на плоскій ділянці кривої це до 10% ємності. "Однакова напруга" не означає "однаковий заряд". Пасивне балансування (100 мА) не здатне закрити такий розрив у розумний час.

Що робити. Розібрати послідовне коло, зробити верхнє балансування за главою 3. Один раз, і проблема зникає на роки.

Помилка 2. Заряд на морозі

Що роблять. Ставлять пакет у гараж або на балкон, не налаштувавши нижній температурний поріг заряду в BMS.

Симптом. Немає жодного. Перші тижні все працює. Через один-два сезони пакет тримає помітно менше, внутрішній опір виріс, напруга під навантаженням просідає сильніше.

Чому. Літєве покриття (plating) на аноді. Незворотно, накопичується з кожним епізодом.

Що робити. Виставити нижню межу заряду 5 С (зняття при 10 С) у BMS до першого морозу. Датчик на крайній, найхолоднішій комірниці, не в повітрі й не на центральній. Це десять хвилин роботи, які рятують пакет.

Помилка 3. Заряд до 3.65 В на комірку щодня

Що роблять. Виставляють на зарядному 58.4 В для 16s, "щоб заряджалось повністю".

Симптом. BMS відключає заряд наприкінці кожного циклу, іноді по кілька разів. Delta між комітками зростає з місяцями. Ємність падає швидше, ніж мала б.

Чому. Між 3.45 і 3.65 В міститься менше 3% ємності, зате саме там комірка старіє найшвидше. Постійна робота на верхній межі це найгірший режим для ресурсу.

Що робити. Виставити 3.50-3.55 В на комірку (56.0-56.8 В для 16s). Втрата кілька відсотків ємності, виграш у ресурсі й спокійна робота без відключень.

Помилка 4. Запобіжник відсутній або неправильний

Що роблять. Покладаються на BMS ("вона ж захищає від короткого") або ставлять автомобільний ножовий запобіжник чи побутовий автомат АС.

Симптом. До аварії жодного. Під час аварії: MOSFET BMS пробиваються в замкнутий стан і не розмикаються, або запобіжник не гасить дугу, і замість спрацьовування маємо стійке горіння.

Чому. Пакет здатний віддати понад 10 000 А. Захист має мати відповідну відключну здатність, і він має бути фізичним, а не електронним.

Що робити. Головний запобіжник на плюсі, в межах 15-20 см від клеми пакета, номінал за розрахунком 1.25 з округленням угору по ряду 40/60/100/125/150/200/250 А. Тип за напругою системи: для 12 і 24 В підходить MRBF (або Class T), **для 51.2 В тільки Class T**. Відключна здатність MRBF падає з напругою: 10 000 А при 14 В, близько 2 000 А при 58 В, тобто в системі 16s він уже не тримає струм короткого замикання пакета. Перевірте також, що провід витримує номінал запобіжника, а не тільки розрахунковий струм.

Помилка 5. Зірвана різьба або надто довгий болт

Що роблять. Затягують клеми "від душі" без динамометричного ключа, або беруть болти зі старих запасів, не перевірявши довжину.

Симптом. Зірваної різьби: клема більше не тримає момент, з'єднання гріється, комірka фактично непридатна для нормального монтажу. Довгого болта: шина здається затягнутою, але контакт слабкий, клема гріється під навантаженням; у важкому випадку болт дістає до внутрішнього елемента.

Чому. Різьба в алюмінієвій клемі не пробає перевищення моменту. Болт, що вперся в дно, дає той самий "кляц" динамометричного ключа, що й правильно затягнутий.

Що робити. Динамометричний ключ, $M6 = 4-6 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M8 = 8-12 \text{ Н}\cdot\text{м}$, звірка з паспортом комірki. Різьбова частина болта входить у клему на 6-8 мм. Прикрутіть болт у клему без шини й переконайтеся, що він не досягає дна.

Помилка 6. BMS використовується як вимикач

Що роблять. Вимикають систему через застосунок BMS, вимикаючи заряд або розряд, замість фізичного вимикача.

Симптом. MOSFET деградує від комутації під навантаженням, з часом росте опір і нагрів ключів. У гіршому випадку ключ зварюється в замкнутому стані, і BMS втрачає здатність захищати.

Чому. Силкові ключі BMS розраховані на аварійне відключення (рідке), а не на щоденну комутацію. Захисний елемент не має бути органом керування.

Що робити. Головний вимикач DC на потрібний струм після запобіжника. BMS відключає тільки в аварії.

Помилка 7. Неправильний переріз проводу або паяні наконечники

Що роблять. Ставлять 16 мм² туди, де потрібно 35 мм², або паяють наконечники замість обтиснення. Часто це кабель ССА (мідь на алюмінії) з завищеним заявленим перерізом.

Симптом. Провід і наконечники помітно теплі або гарячі під навантаженням, запах нагрітої ізоляції, потемніла ізоляція біля наконечника, падіння напруги під навантаженням більше очікуваного.

Чому. Тепловиділення пропорційне квадрату струму, тому "трохи тонший провід" на піковому навантаженні гріється зовсім не "трохи" сильніше. Паяне з'єднання розвалюється саме при перегріві.

Що робити. Розрахунок $\text{peakW} / V \times 1.25$, таблиця перерізів 6.1, гідравлічне обтиснення шестигранною матрицею, тільки мідь. Після першого навантаженого циклу перевірте рукою всі з'єднання: жодне не має бути теплішим за інші.

Помилка 8. Пакет без стягування

Що роблять. Ставлять комірки в ящик, іноді просто стягують пластиковою стрічкою, вважаючи стягувальні пластини "необов'язковим тюнінгом".

Симптом. Через кілька місяців комірки помітно опуклі. Ємність падає швидше, ніж передбачає паспортний ресурс. Стягнути вже здуті комірки назад неможливо.

Чому. Комірка розширюється й стискається кожен цикл. Без зовнішнього обмеження шари електродів поступово розшаровуються, і контакт усередині погіршується.

Що робити. Дві жорсткі торцеві пластини, 4 шпильки, орієнтовно 300 кгс зусилля, прокладки між комірками. Робиться під час збірки й більше не згадується.

Помилка 9. Помилка в балансувальному джгуті

Що роблять. Підключають балансувальний роз'єм, не перевіривши порядок дротів мультиметром, або підключають його до пакета, що вже під навантаженням, або лишають джгут без запобіжників.

Симптом. У кращому випадку BMS показує неможливі значення (комірка 0 В, комірка 6.6 В) і не працює. У гіршому вхідні кола BMS вигорають одразу, іноді з димом.

Чому. Балансувальні входи розраховані на різницю в одну комірку. Переплутані дроти подають подвоєну або зворотну напругу безпосередньо на вимірювальні кола.

Що робити. Підключати строго по порядку від В- вгору, перед вставленням роз'єму перевірити мультиметром напругу між сусідніми контактами (має бути близько 3.3 В на кожній парі), поставити запобіжники 1-2 А на кожній лінії, зафіксувати джгут окремо від силової траси.

Помилка 10. Змішування різних комірок в одному колі

Що роблять. Докуповують дві комірки замість пошкоджених, беруть іншу партію або іншого виробника, ставлять у той самий послідовний ланцюг. Або додають нову комірку до пакета, що відпрацював два роки.

Симптом. Пакет ніколи не балансується стабільно: delta росте від циклу до циклу, одна й та сама комірка постійно "тікає" вгору або вниз. Ємність визначається найслабшою коміркою.

Чому. Різна реальна ємність і різний внутрішній опір означають різну швидкість заповнення. Балансир витрачається на постійне вирівнювання замість підтримки.

Що робити. У одному послідовному колі використовуйте комірки однієї партії й близького віку. Якщо доводиться змішувати, обов'язково зробіть тест ємності (глава 2) і підбирайте так, щоб розкид ємностей був у межах 3-5%. Стару комірку в новий пакет не ставлять.

10. Чеклист першого запуску

Роздрукуйте цю сторінку. Відмічайте пункти олівцем. Не переходьте до наступного блоку, доки поточний не закритий повністю.

A. До складання

- ☐ Усі комірки візуально перевірені: без опуклості, плівка ціла, різьба чиста
- ☐ Напруга кожної комірки виміряна й записана; нижче 2.0 В у пакет не йде
- ☐ Розкид напруг при отриманні не перевищує 0.10 В
- ☐ Ємність перевірена (повний тест або спрощений варіант); розкид у межах 3-5%
- ☐ Верхнє балансування виконане: паралель, 3.65 В, витримка до падіння струму й ще 6-12 годин
- ☐ Після балансування розкид напруг у межах 0.005-0.010 В
- ☐ Стягувальні пластини й шпильки готові, прокладки між комірками на місці

B. Складання

- ☐ Прикраси зняті, інструмент ізольований, окуляри вдягнені, вогнегасник поруч
- ☐ Полярність кожної комірки перевірена перед встановленням шини
- ☐ Загальна напруга пакета збігається з розрахунковою (кількість комірок x 3.42 В)
- ☐ Довжина болтів перевірена: 6-8 мм у різьбі, дна не досягають
- ☐ Усі клеми затягнуті динамометричним ключем: M6 = 4-6 Н·м, M8 = 8-12 Н·м
- ☐ Порядок шайб правильний: шина, плоска шайба, гровер, болт
- ☐ Переріз проводу за таблицею не менший за номінал запобіжника
- ☐ Наконечники обтиснуті гідравлічним пресом, тест на витягування пройдений
- ☐ Термоусадка встановлена, маркування кольором на місці

C. BMS

- ☐ Кількість комірок (S) і хімія (LFP) виставлені правильно
- ☐ Ємність пакета введена за результатом тесту
- ☐ Пороги комірки: OVP 3.65 В / release 3.55 В, UVP 2.80 В / release 3.00 В
- ☐ Струмові пороги розраховані за $peakW / V \times 1.25$, затримки достатні для пуску інвертора
- ☐ Нижня межа заряду 5 С виставлена, зняття при 10 С
- ☐ Верхня межа заряду 50-55 С, розряду 60 С; нижня межа розряду -20 С
- ☐ Балансування: старт 3.40 В, різниця 0.010 В
- ☐ Температурні датчики фізично закріплені на комірках

- ☐ Балансувальний джгут перевірений мультиметром попарно перед підключенням
- ☐ Запобіжники 1-2 А на балансувальних лініях встановлені
- ☐ Налаштування збережені й записані (знімок екрана або аркуш)

D. Захист і комутація

- ☐ Головний запобіжник на плюсі, не далі 20 см від клеми (для 51.2 В тільки Class T)
- ☐ Номінал запобіжника за розрахунком, округлений угору по ряду 40/60/100/125/150/200/250 А
- ☐ Номінал запобіжника не перевищує допустимий струм проводу
- ☐ Головний вимикач DC встановлений після запобіжника
- ☐ Окремі запобіжники на кожну гілку (інвертор, зарядний, лінія малих споживачів)
- ☐ Схема попереднього заряду (pre-charge) передбачена
- ☐ Корпус заземлений, мінус пакета не з'єднаний із корпусом
- ☐ Жоден споживач не підключений до мінуса пакета в обхід BMS

E. Перший запуск

- ☐ Мультиметром перевірена полярність на вході інвертора до підключення
- ☐ Інвертор підключений через pre-charge, іскри при замиканні вимикача немає
- ☐ BMS показує всі комірки, сумарну напругу й нульовий струм
- ☐ Кінцева напруга зарядного виставлена на 3.50-3.55 В на комірку (не 3.65)
- ☐ Струм заряду в межах 0.2-0.5С
- ☐ Перший заряд проведений під наглядом, від початку до кінця
- ☐ Наприкінці заряду delta не перевищує 0.020 В
- ☐ Усі клеми, наконечники й шини перевірені на нагрів під навантаженням
- ☐ Проведений один повний цикл розряду з контролем: жодна комірка не провалюється раніше за інші
- ☐ Через тиждень роботи всі клеми протягнуті повторно динамометричним ключем

F. Записати й зберегти

- ☐ Таблиця комірок: номер, напруга при отриманні, виміряна ємність, внутрішній опір
- ☐ Знімок налаштувань BMS
- ☐ Схема з'єднань із номіналами запобіжників і перерізами проводу
- ☐ Дата введення в експлуатацію

Додаток А. Формули розрахунку системи

Ці формули використовує калькулятор на сайті. Вони наведені тут, щоб ви могли перевірити результат вручну.

1. Тривала потужність.

$$\text{contW} = \text{сума} (\text{потужність}_i \times \text{кількість}_i)$$

Складіть номінальну потужність усього, що працює одночасно.

2. Пікова потужність.

$$\text{peakW} = \text{contW} + \max(\text{пускова}_i - \text{номінальна}_i)$$

Береться найбільший одиночний пусковий приріст, а не сума всіх пускових струмів: два двигуни практично ніколи не стартують у одну мілісекунду.

3. Потрібна енергія.

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

- **0.8 (DoD, глибина розряду).** Пакет не розряджають у нуль: 80% це компроміс між доступною енергією й ресурсом.
- **0.88 (ККД інвертора).** Типовий ККД якісного інвертора з чистою синусоїдою на середньому навантаженні. Втрати йдуть у тепло.

Приклад: 500 Вт протягом 8 годин це $500 \times 8 / 0.8 / 0.88 = 5682 \text{ В} \cdot \text{год}$.

4. Вибір напруги пакета.

Пробуємо по порядку: 12.8 В (тільки якщо contW не перевищує 600 Вт), потім 25.6 В (contW до 1500 Вт), потім 51.2 В. Приймається перший варіант, за якого $Ah = \text{requiredWh} / V$ не перевищує 314 А·год (найбільша поширена комірка). Якщо не підійшов жоден, беремо 51.2 В і паралельні лінійки: $\text{кількість лінійок} = \text{округлення вгору} (Ah / 314)$.

Для прикладу вище: 5682 В·год при 500 Вт тривалої потужності. 12.8 В підходить за потужністю, але $5682 / 12.8 = 444 \text{ А} \cdot \text{год}$, це більше за 314. Беремо 25.6 В: $5682 / 25.6 = 222 \text{ А} \cdot \text{год}$. Підходить, отже 8s з комірками 280 А·год.

5. Струм BMS.

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

6. Потужність інвертора.

$$\text{потужність інвертора} \geq \max(\text{contW} \times 1.3, \text{peakW})$$

Інвертор має і тримати тривале навантаження із запасом 30%, і переварювати пік.

7. Провід і запобіжник.

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

Запобіжник округлюється вгору по ряду 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 А, і **провід обирається вже за номіналом запобіжника**, а не за розрахунковим струмом: за таблицею 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) беруть переріз, чий тривалий струм не менший за номінал

запобіжника.

Якщо інвертор працюватиме тривало на повну паспортну потужність, спочатку рахують реальний струм з урахуванням ККД: $W / 0.88 / V$, а тоді, як і в кроці 5, множать його на запас 1.25 і лише після цього обирають провід і запобіжник (розділ 5.3).

Додаток Б. Довідкові величини

Величина	Значення
Номинальна напруга комірки LiFePO ₄	3.2 В
Максимальна напруга заряду	3.65 В
Рекомендована робоча верхня межа	3.50-3.55 В
Напруга в спокої при 100% SoC	приблизно 3.40-3.45 В
Напруга в спокої при 50% SoC	3.28-3.32 В
Рекомендована нижня межа	2.80 В
Абсолютний мінімум	2.50 В
Межа, нижче якої комірку не відновлюють	2.00 В
Напруга зберігання (приблизно 50% SoC)	3.28-3.32 В
4s пакет	12.8 В номінал
8s пакет	25.6 В номінал
16s пакет	51.2 В номінал
Рекомендований струм заряду	0.2-0.5C
Струм завершення заряду (taper), одна комірка	0.02-0.05C
Струм завершення при балансуванні в паралелі	2-4 А на всю збірку
Температура заряду	+5...+50 С (фізична межа 0 С)
Температура розряду	-20...+60 С
Температура зберігання	-20...+45 С
Ресурс при 80% DoD	приблизно 3000-6000 циклів
ККД інвертора для розрахунку	0.88
Робоча глибина розряду (DoD)	0.8
Запас для BMS, проводу, запобіжника	1.25

VERSTAT Power. Цей посібник надається як довідковий матеріал. Завжди звіряйтеся з документацією на ваше конкретне обладнання.