

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
"УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електронних систем

ФЕСАЙ ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ

ІМПУЛЬСНИЙ ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ LiFePo_4 АКУМУЛЯТОРІВ

Спеціальність 171 Електроніка

Освітня програма Електронні системи

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Науковий керівник:

Папн Олександр Вікторович

к.ф-м.н

(асистент)

Ужгород – 2025

Регістрація _____
(номер)

« ____ » _____ 2025 р. _____
(підпис)

Тетяна СЕМАК

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

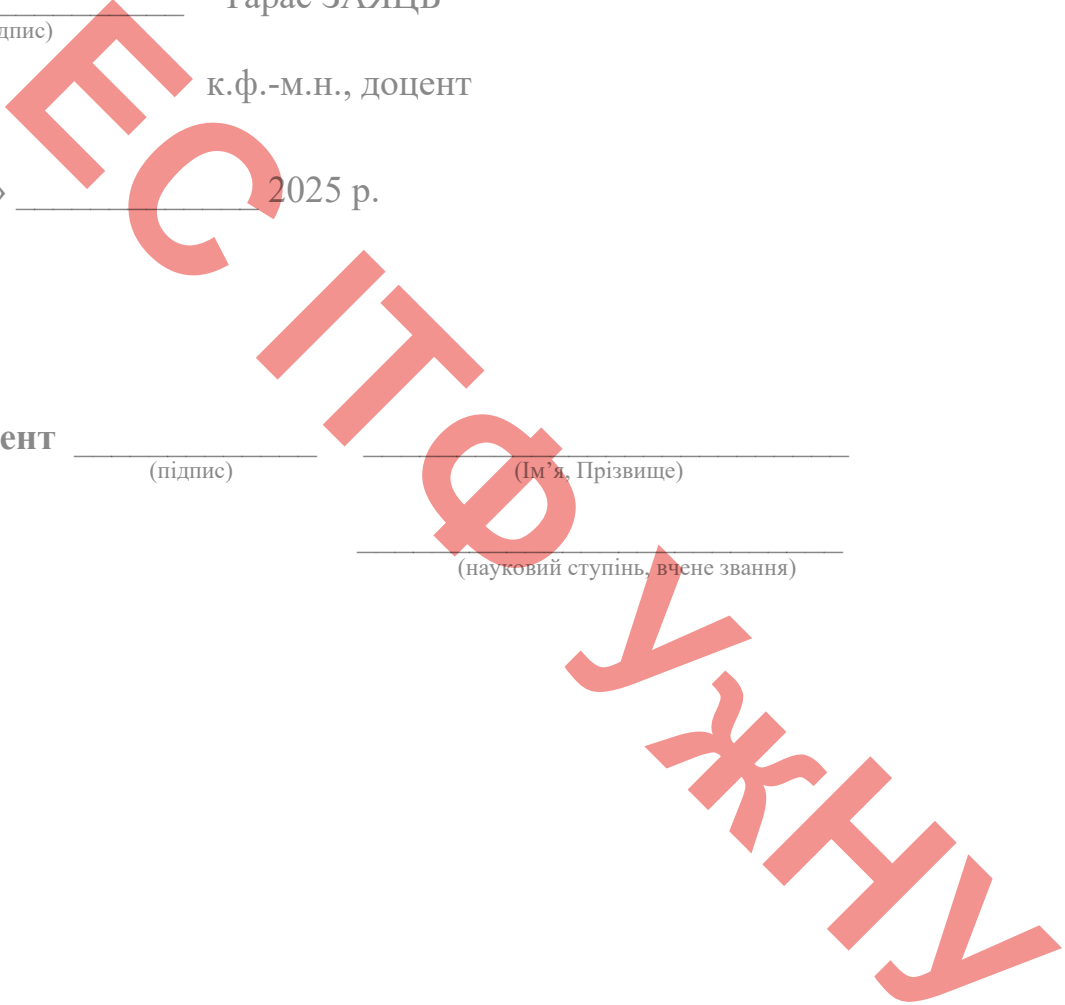
Завідувач кафедри

_____ Тарас ЗАЯЦЬ
(підпис)
к.ф.-м.н., доцент

« ____ » _____ 2025 р.

Рецензент _____
(підпис) _____
(Ім'я, Прізвище)

(науковий ступінь, вчене звання)



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет
Кафедра електронних систем

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Зав. кафедрою,
доц. _____ (Заяць Т. М.)
“ ____ ” _____ 2025 року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

На кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

ІМПУЛЬСНИЙ ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ LiFePo₄ АКУМУЛЯТОРІВ

Студента групи ЕС: Віктора ФЕСАЯ ()
Керівник: кандидат фіз.-мат. наук, кафедри ЕС
Олександр ПАПП ()

Ужгород - 2025

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою,

доц. _____ (Заяць Т. М.)

“ ___ ” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу бакалавра студента

Фесая Віктора Михайловича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: **Імпульсний зарядний пристрій для LiFePo4 акумуляторів**_Затверджена на засіданні кафедри (протокол № _ від _____ 2024року).
2. Термін закінчення студентом дипломного проекту: 15 липня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи:
Спроекувати контролер напруги та струму, який задовольняє наступним параметрам: вхідна напруга живлення – номінальна 15В, максимальна 60В, зарядна напруга: 3.6–60 В (регульована), зарядний струм: до 10 А (регульований). Температурний діапазон: від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):
 - 1) Вступ. Огляд та аналіз аналогів об'єкту проектування .
 - 2) Синтез та аналіз структурної та функціональної схеми об'єкту проектування та її опис.
 - 3) Технічна пропозиція та її обґрунтування і опис.
 - 4) Розрахунок електричних параметрів окремих фрагментів принципової схеми та дослідження дискретних елементів при необхідності.
 - 5) Висновки.

5. Консультанти бакалаврської роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Заяць Т. М.		
Нормоконтроль	Папп О. В.	Папп О.В.	Фесай В.М.

Дата видачі завдання _____ 2024 року.

Керівник роботи _____ (доц. Заяць Т.М.)
(підпис)

Завдання прийняв на виконання _____ (Фесай В.М.)
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів виконання КБР	Термін виконання етапів	Примітки
1.	Пошук та аналіз аналогів об'єкта досліджень.	до 20.12.2024 року	
2.	Огляд та аналіз аналогів.	до 20.02.2025 року	
3.	Вибір технічного рішення та обґрунтування технічної пропозиції.	до 20.03.2025 року	
4.	Синтез структурної та принципової схем, їх розрахунок.	до 20.04.2025 року	
5.	Виготовлення конструкторської документації.	до 20.05.2025 року	
6.	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи.	до 10.06.2025 року	
7.	Захист на державній екзаменаційній комісії.	Згідно з графіком захисту	

Студент _____ (В. М. Фесай)
Керівник дипломної роботи _____ (Папп О.В.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Імпульсний зарядний пристрій для LiFePO₄ акумуляторів» / УжНУ; Керівник Папп О. В.; Студент Фесай В. М., група ЕС.

Пояснювальна записка: 42 сторінки, 16 рисунків, 15 джерел, 4 додатків.

Графічна частина: 4 листів формату А1.

Об'єкт проектування – Імпульсний зарядний пристрій для LiFePO₄ акумуляторів.

Мета дослідження – проектування, розрахунки, виготовлення, графічної документації із застосуванням програмних проектно-конструкторського пакету “AutoCAD та Altium Designer”.

Проект включає літературний огляд та аналіз типових схем зарядних пристроїв для LiFePO₄ акумуляторів, а також загальні принципи їх побудови. На основі зібраних даних і вимог технічного завдання розроблено структурну схему пристрою. Проектно-конструкторський розділ охоплює обґрунтування вибору елементної бази, детальну розробку принципової електричної схеми, а також розрахунок основних функціональних блоків.

Окремо розглянуто особливості реалізації інтелектуального керування процесом заряджання за допомогою мікроконтролера, що забезпечує моніторинг та адаптацію параметрів у режимі реального часу. Підкреслено актуальність використання пристрою в сучасних системах автономного живлення, IoT-платформах, резервних та мобільних енергетичних рішеннях.

Ключові слова:

КОНТРОЛЕР СТРУМУ, КОНТРОЛЕР НАПРУГИ, BUCK INVERTER,
ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ, ESP32

ABSTRACT

Diploma project of the “Bakalavr” degree: « Pulsed charging device for LiFePO₄ batteries » / UzhNU; Supervisor: Papp O.V.; Student: Fesay V.M., ES group.

Explanatory note: 42 pages, 16 figures, 15 sources, 4 appendices.

Graphic part: 4 A1 sheets.

Project Object - Pulse Charger for LiFePO₄ Batteries.

Research Objective: Design, calculations, manufacturing, and preparation of graphical documentation using the “AutoCAD” and “Altium Designer” software packages.

The project includes a literature review and analysis of typical charging circuit designs for LiFePO₄ batteries, as well as the general principles of their construction. Based on the collected data and the requirements of the technical specification, a structural diagram of the device was developed. The design section covers the justification for the selection of components, detailed development of the electrical schematic, and calculation of the main functional blocks.

Special attention is given to the implementation of intelligent charge control using a microcontroller, which enables real-time monitoring and adjustment of parameters. The relevance of using the device in modern autonomous power systems, IoT platforms, backup systems, and mobile energy solutions is emphasized.

Keywords:

CURRENT CONTROLLER, VOLTAGE CONTROLLER, BUCK INVERTER, BATTERY CHARGER, ESP32

ЗМІСТ

1. Вступ.	9
2. Загальні відомості	
2.1. Контролери струму та напруги для заряджання акумуляторів	10
2.2. Детальний алгоритм роботи	11
2.3. Опис та принцип роботи LiFePO ₄ акумуляторів	13
2.4. Порівняння LiFePO ₄ із Li-Pol акумуляторами	15
3. Огляд схемних рішень	
3.1. Texas Instruments BQ24650.....	17
3.2. Analog Devices LTC4015.....	19
3.3. Microchip MCP73123.....	21
3.4. STMicroelectronics STC4054.....	22
3.5. Renesas ISL78692.....	24
4. Проектно-конструкторський розділ	
4.1. Структурна схема пристрою.....	25
4.2. DC/DC перетворювач.....	26
4.3. Контролер напруги та струму LTC4000	31
4.4. Вибір цифрового мікроконтролера (ESP32)	37
4.5. Вибір та реалізація зовнішнього інтерфейсу (USB).....	40
5. Висновки	41
6. Список використаної літератури	42

УЖНУ

					<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>		
<i>Ви</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>		<i>Літера</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Фесай В.М.</i>			<i>Н</i>	<i>8</i>	<i>42</i>
<i>Перевіри</i>		<i>Папп О.В.</i>			<i>УжНУ, ІТФ, V курс, гр. ЕС</i>		
<i>Реценз</i>							
<i>Н.Контр</i>		<i>Папп О.В.</i>					
<i>Затв.</i>		<i>Заяць Т.М.</i>					

Додатки

Схема електрична структурна

Схема електрична принципова

Специфікація

Перелік елементів

ЕС ТТФ УЖНУ

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ВСТУП

Сучасний розвиток електроніки значно розширює можливості автономного живлення завдяки впровадженню новітніх технологій у сфері заряджання акумуляторів. Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO_4) є одним із найперспективніших типів елементів живлення завдяки високій ємності, довговічності, термічній стабільності та безпечності. Проте для забезпечення їх максимально ефективної та безпечної експлуатації необхідне використання спеціалізованих зарядних пристроїв, які враховують хімічні особливості цього типу батарей.

Ця робота присвячена розробці зарядного пристрою для заряджання трьох послідовно з'єднаних LiFePO_4 акумуляторів. Пристрій побудований на основі мікроконтролера ESP32 та спеціалізованої мікросхеми LTC4000, яка виконує інтелектуальне управління процесом заряджання. Завдяки LTC4000 реалізовано автоматичне перемикання між режимами постійного струму (CC) та постійної напруги (CV), а також забезпечено функції захисту від перенапруги, короткого замикання та перевантаження.

ESP32 використовується як керуючий модуль, що забезпечує інтерактивну взаємодію з зарядним пристроєм через USB або бездротові інтерфейси. Це дозволяє не лише здійснювати заряджання, а й відстежувати стан акумуляторів у реальному часі та інтегрувати зарядний пристрій у сучасні IoT-системи.

Метою проєкту є розробка ефективного, надійного та економічного зарядного пристрою з можливістю інтерактивного керування, який відповідатиме актуальним вимогам до систем енергоживлення.

Робота включає огляд наявних технічних рішень, розробку структурної та принципової електричної схеми, а також обґрунтований вибір елементної бази.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Зарядні пристрої для LiFePO₄ акумуляторів

Процес заряджання акумуляторів є критично важливим фактором, що впливає на їх довговічність, енергетичну ефективність та безпеку експлуатації. Особливо це стосується сучасних хімічних систем, таких як літій-іонні (Li-ion) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори, які потребують дотримання суворих умов заряджання відповідно до їх електрохімічних характеристик. Для цього використовуються спеціалізовані зарядні пристрої, які забезпечують керування електричними параметрами з урахуванням фаз заряду, температури та стану елемента живлення.

Типовий алгоритм заряджання LiFePO₄ акумуляторів реалізується у два основні режими:

1. **Режим постійного струму (CC, constant current)** – використовується на початковому етапі, коли елемент може приймати великий зарядний струм. Це дозволяє швидко поповнити запас енергії до досягнення порогової напруги.
2. **Режим постійної напруги (CV, constant voltage)** – активується після досягнення заданої напруги на елементі. В цьому режимі зарядний пристрій поступово знижує струм до мінімального рівня, запобігаючи перезаряду та забезпечуючи повне насичення батареї.

Сучасні зарядні пристрої також можуть виконувати функції температурного контролю, оцінки залишкової ємності, а також підтримки стандартів швидкого заряджання. Наприклад, мікросхема LTC4000 від компанії Analog Devices дозволяє реалізувати енергоефективну систему заряджання з автоматичним перемиканням між режимами CC/CV, а також забезпечує надійний захист від перевищення напруги, коротких замикань та інших аварійних ситуацій.

Особливу увагу при проектуванні зарядного пристрою слід приділити вибору топології силової частини. Для акумуляторів високої ємності ефективним рішенням є використання понижувальних перетворювачів (buck-конфігурацій),

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

наприклад, **LT3845**, які забезпечують точне регулювання напруги й струму при мінімальних втрат енергії й тепла [1].

2.2 Детальний алгоритм роботи.

Зарядні пристрої забезпечують процес заряджання акумуляторів відповідно до їхніх електрохімічних властивостей та специфічних вимог до режимів роботи. Алгоритм роботи сучасного зарядного пристрою можна умовно поділити на три основні фази:

- **Аналіз стану акумулятора**
- **Регулювання процесу заряджання**
- **Завершення заряджання та моніторинг**

1. Аналіз стану акумулятора

На початковому етапі контролер перевіряє:

- **Напругу на клеммах акумулятора** для визначення його рівня заряду.
- **Температуру** за допомогою датчика для запобігання перегріву.
- **Опір батареї**, який може вказувати на деградацію або коротке замикання.

Ці параметри визначають стратегію заряджання. Наприклад, якщо напруга дуже низька, контролер може активувати попереднє заряджання невеликим струмом для безпечного відновлення ємності.

2. Регулювання процесу заряджання

Основний етап заряджання складається з двох ключових режимів:

2.1 Режим стабілізації струму (CC)

На цьому етапі:

- Контролер подає струм фіксованого значення (наприклад, 1C для Li-ion або 0.5C для LiFePO4).
- Напруга батареї поступово зростає до порогового значення (максимальної напруги заряджання).

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Різниця для Li-ion і LiFePO4:

- Для **Li-ion** порогова напруга заряджання зазвичай складає **4.2 В на елемент**.
- Для **LiFePO4** порогова напруга нижча — **3.6 В на елемент**, що дозволяє зменшити ризик перегріву.

2.2 Режим стабілізації напруги (CV)

Після досягнення порогової напруги:

- Контролер утримує напругу на рівні V_{max} .
- Струм поступово зменшується до значення нижче порогового (зазвичай $0.05C$).

Різниця для Li-ion і LiFePO4:

- Для **Li-ion** струм продовжує зменшуватися повільніше через необхідність стабільного насичення батареї.
- Для **LiFePO4** цей етап коротший через плоску криву заряджання (мінімальна зміна напруги в кінці заряду).

3. Завершення заряджання та моніторинг

Коли струм падає до заданого мінімуму:

- Контролер припиняє заряджання, щоб уникнути перезарядження.
- Вмикається режим моніторингу, під час якого контролер перевіряє рівень заряду, температуру та можливу розрядку.

Різниця для Li-ion і LiFePO4:

- Для **Li-ion** може бути увімкнений режим балансування для забезпечення рівномірного заряду осередків.
- Для **LiFePO4** балансування менш критичне через природну хімічну стабільність.

Додаткові функції контролерів

1. **Захист від перевантаження:** Автоматичне вимкнення заряджання при перевищенні температури, напруги або струму.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

2. **Балансування:** Забезпечує рівномірний заряд між осередками в пакеті (особливо важливо для Li-ion).
3. **Швидке зарядження:** Для Li-ion можливе використання протоколів швидкого зарядження (QC або PD).

Таким чином можна відвести ризику між відмінностями у алгоритмах для основних 2-х типів акумуляторів: **Li-ion** та **LiFePO₄**. Порівняння приведені у таблиці 1. [2]

Таблиця 1. Ключові відмінності між алгоритмами Li-ion та LiFePO₄

Характеристика	Li-ion	LiFePO ₄
Напруга зарядження на елемент	4.2 В	3.6 В
Максимальний струм зарядження	1С (звичайно)	0.5–1С (нижчий при 0.5С)
Балансування осередків	Критично важливо	Менш важливо
Температурний контроль	Висока чутливість до перегріву	Стійкий до підвищення температури
Профіль зарядження	Повільне завершення (CV)	Швидке завершення (CV)

2.3 Опис та принцип роботи LiFePO₄ акумуляторів

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) є одним із найпопулярніших типів літєвих акумуляторів завдяки своїй високій безпеці, тривалому терміну служби та стабільності. Вони широко використовуються в електротранспорті, стаціонарних системах зберігання енергії та промислового обладнанні. Розглянемо детальніше їх принцип роботи.

LiFePO₄ акумулятори працюють на основі літєвих іонів, які переміщуються між катодом і анодом під час зарядження та розрядження. Основні компоненти:

1. **Катод:** Виконаний із літій-залізо-фосфату (LiFePO₄). Цей матеріал забезпечує високу стабільність та безпеку.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

2. **Анод:** Зазвичай виготовляється з графіту, що забезпечує високу ємність і низький внутрішній опір.
3. **Електроліт:** Органічний розчин із солями літію, що забезпечує перенесення іонів між анодом і катодом.
4. **Сепаратор:** Виконує функцію ізоляції між анодом і катодом, запобігаючи короткому замиканню.

Роботу акумуляторної батареї можна поділити на два етапи:

- **Зарядження:** Літій-іони переміщуються з катода (LiFePO_4) до анода (графіту) через електроліт. У цей момент електрони проходять через зовнішнє коло, накопичуючи енергію.
- **Розрядження:** Літій-іони повертаються з анода до катода, виділяючи електрони у зовнішнє коло для живлення пристроїв.

Характеристики LiFePO_4

1. **Номинальна напруга:** 3.2 В на осередок.
2. **Максимальна напруга зарядження:** 3.6 В.
3. **Термін служби:** 2000-5000 циклів (залежно від умов використання).
4. **Енергетична щільність:** $\sim 90-120$ Вт·год/кг.
5. **Температурний діапазон:** -20°C до $+60^\circ\text{C}$ (декілька модифікацій працюють і в ширших межах).

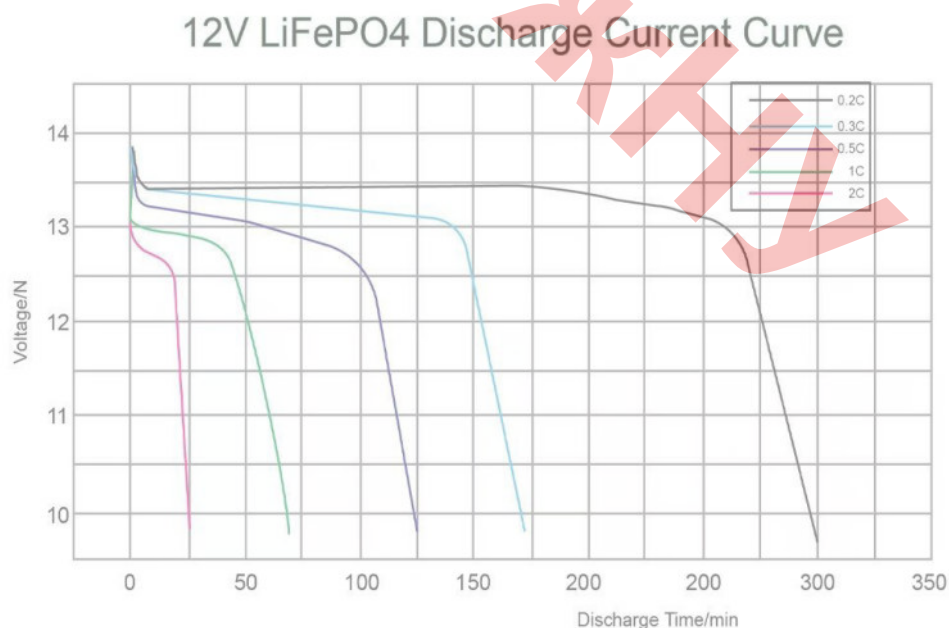


Рис2.1 Типова розрядна характеристика літій-залізо-фосфатної батареї [3].

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

2.4 Порівняння LiFePO₄ із Li-Pol аккумуляторами.

Порівняння акумуляторів LiFePO₄ із Li-Pol приведено у таблиці 2.

Серед переваг LiFePO₄ над Li-Pol можна виділити наступні:

1. **Безпека:** LiFePO₄ стабільніші за високих температур і механічних пошкоджень. Вони не виділяють кисню під час розрядження, що знижує ризик займання.
2. **Тривалий термін служби:** LiFePO₄ можуть витримувати до 5000 циклів заряджання-розрядження без значної втрати ємності, що робить їх більш економічними у довгостроковій перспективі.
3. **Стійкість до екстремальних умов:** LiFePO₄ працюють у ширшому температурному діапазоні, що особливо важливо для промислових застосувань і електротранспорту.
4. **Екологічність:** LiFePO₄ є більш безпечними для навколишнього середовища, оскільки не містять токсичних елементів, таких як кобальт.

До недоліків можна віднести:

1. **Низька енергетична щільність:** LiFePO₄ мають нижчу ємність при однаковій вазі, що робить їх менш придатними для компактних пристроїв, таких як смартфони або планшети.
2. **Вища вартість:** Хоча ціна LiFePO₄ поступово знижується, вона все ще вища, ніж у стандартних Li-Pol.
3. **Низька номінальна напруга:** Через нижчу напругу (3.2 В) потрібна більша кількість осередків у батареї для досягнення високої напруги, що може збільшити розміри [2].

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Таблиця 2.

Характеристика	LiFePO ₄	Li-Pol (літій-полімер)
Хімічний склад	Літій-залізо-фосфат	Літій-кобальт-оксид або літій-нікель-кобальт
Напруга	Номінальна 3.2 В; заряджання 3.6 В	Номінальна 3.7 В; заряджання 4.2 В
Енергетична щільність	Низька (90-120 Вт·год/кг)	Висока (150-250 Вт·год/кг)
Циклічна довговічність	2000-5000 циклів	500-1000 циклів
Безпека	Дуже висока: термічно стабільний, низький ризик займання	Середня: може перегрітися або загорітися при пошкодженні
Температурний діапазон	Широкий (-20°C до +60°C)	Обмежений (0°C до +45°C)
Саморозряд	Низький	Трохи вищий, ніж у LiFePO ₄
Термін служби	10-15 років	2-5 років
Вартість	Вища	Дешевша
Застосування	Електротранспорт, зберігання енергії, промислові системи	Смартфони, ноутбуки, дрони

LiFePO₄ акумулятори є чудовим вибором для застосувань, де пріоритетом є безпека, довговічність і стабільність роботи за екстремальних умов. Вони ідеально підходять для електротранспорту, зберігання енергії та промислового використання. Однак для компактних пристроїв, таких як смартфони або дрони, Li-Pol залишаються кращим вибором завдяки їхній високій енергетичній щільності та нижчій вартості.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

3. ОГЛЯД СХЕМНИХ РІШЕНЬ КОНТРОЛЛЕРІВ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ДЛЯ ЗАРЯДКИ АКУМУЛЯТОРІВ.

Літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) є популярним вибором для багатьох застосувань завдяки їх високій надійності, тривалому терміну служби та безпечності у порівнянні з іншими літєвими акумуляторами. Оскільки ці акумулятори мають специфічні вимоги до заряджання, існує чимало спеціалізованих мікросхем (IC) та модулів, розроблених для ефективного й безпечного заряджання LiFePO₄ елементів.

Загальні принципи заряджання LiFePO₄ акумуляторів були розглянуті у попередньому розділі. Звідти зрозуміло, що соновний критерій є вибір контролера, який працює у двох режимах – стабілізації напруги, та стабілізації струму. Цей метод забезпечує надійне заряджання без ризику перегріву чи перевантаження акумулятора, що особливо важливо для тривалого терміну служби LiFePO₄ елементів.

Розглянемо деякі популярні мікросхеми для заряджання LiFePO₄ акумуляторів:

3.1 Texas Instruments BQ24650

BQ24650 — це високоригований контролер заряджання акумуляторів у режимі перемикачання. Він забезпечує регулювання вхідної напруги, яке знижує струм заряджання, коли вхідна напруга падає нижче запрограмованого рівня. Коли джерелом живлення є сонячна панель, петля регулювання вхідної напруги зменшує струм заряджання, дозволяючи сонячній панелі забезпечувати максимальну вихідну потужність.

BQ24650 пропонує синхронний ШІМ-контролер із постійною частотою, високою точністю регулювання струму і напруги, попереднім кондиціонуванням заряду, завершенням заряду та моніторингом статусу заряду.

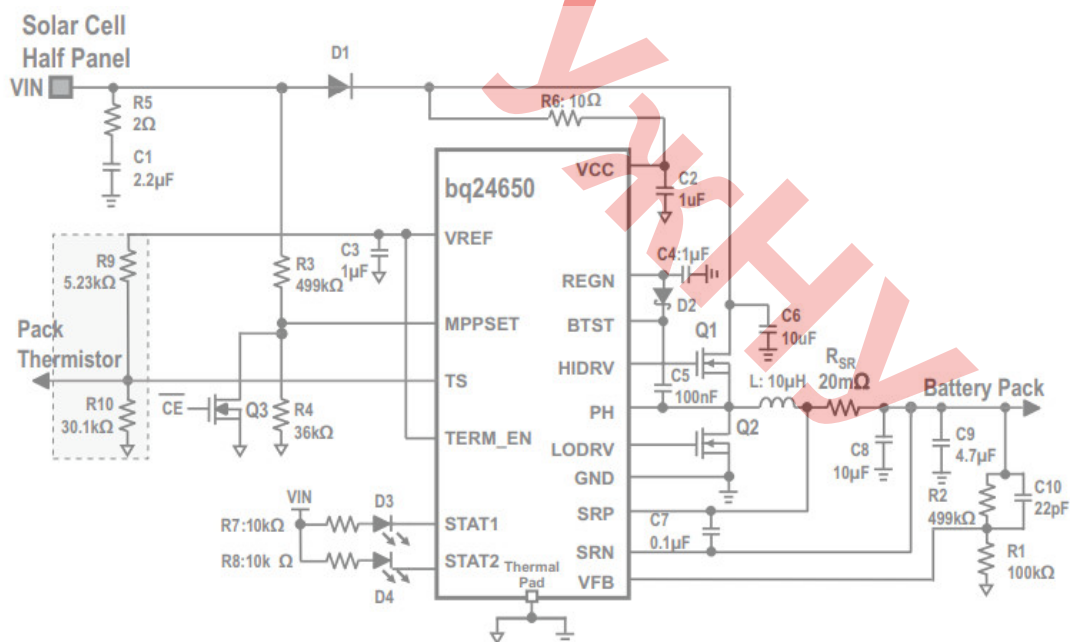
BQ24650 заряджає акумулятор у три етапи: попереднє кондиціонування, постійний струм та постійна напруга. Зарядження завершується, коли струм досягає 1/10 від швидкості швидкого заряджання. Таймер попереднього

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

заряджання фіксований і становить 30 хвилин. BQ24650 автоматично перезавантажує цикл заряджання, якщо напруга акумулятора падає нижче внутрішнього порогу, і переходить у режим низького споживання струму, коли вхідна напруга падає нижче напруги акумулятора.

BQ24650 підтримує акумулятори з напругою від 2.1 В до 26 В із налаштуванням VFB до опорного значення 2.1 В. Струм заряджання задається шляхом вибору відповідного шунтового резистора. BQ24650 доступний у 16-вивідному корпусі QFN із розмірами 3.5 мм × 3.5 мм.

- **Особливості:** Ця мікросхема є високоефективним зарядним контролером, який підтримує кілька хімічних складів, включаючи LiFePO₄.
- **Переваги:** Підтримує функцію регулювання напруги і струму, захист від перегріву, а також автоматичне відновлення при виявленні перевантаження.
- **Застосування:** Використовується в додатках з високою ємністю батарей, таких як сонячні енергосистеми та портативні електростанції.



Solar Panel 21 V, MPPT = 18 V, 2-cell, I_{CHARGE} = 2 A, I_{PRECHARGE} = I_{TERM} = 0.2 A, TS = 0 - 45°C

Рис.3.1 Типова схема використання BQ24650 [5].

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

3.2 Analog Devices LTC4015

LTC®4015 — це повнофункціональний синхронний контролер/зарядний пристрій зі схемами заряджання та алгоритмами завершення, що вибираються за допомогою виводів для конкретних хімічних складів акумуляторів. LTC4015 може заряджати акумулятори Li-Ion/Polymer, LiFePO₄ або свинцево-кислотні акумулятори. Напруга заряджання акумулятора вибирається за допомогою виводів і налаштовується через інтерфейс I2C. Обмеження вхідного струму та зарядного струму можуть бути точно задані за допомогою шунтових резисторів і індивідуально налаштовуватися через серійний порт I2C.

Цифрова телеметрична система контролює всі параметри енергосистеми. Для літєвих акумуляторів підтримуються алгоритми захисту, такі як таймер безпеки та завершення заряджання за струмом. LTC4015 також включає функції автоматичного повторного заряджання, попереднього заряджання (для Li-Ion) і захисту за допомогою NTC-термістора.

Порт I2C LTC4015 дозволяє користувачеві налаштовувати алгоритми заряджання, отримувати інформацію про стан зарядного пристрою, конфігурувати маски і програмовані оповіщення, а також використовувати й налаштовувати лічильник кулонів. Пристрій доступний у корпусі QFN із 38 виводами розміром 5 × 7 мм.

- **Особливості:** Це контролер з інтегрованим моніторингом стану батареї. Він підтримує балансування осередків і оптимізований для LiFePO₄.
- **Переваги:** Високий рівень точності вимірювання напруги, струму і температури, що забезпечує безпечне заряджання.
- **Застосування:** Ідеальний для складних багатоярусних систем, де необхідний моніторинг кожного осередку батареї.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					20
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

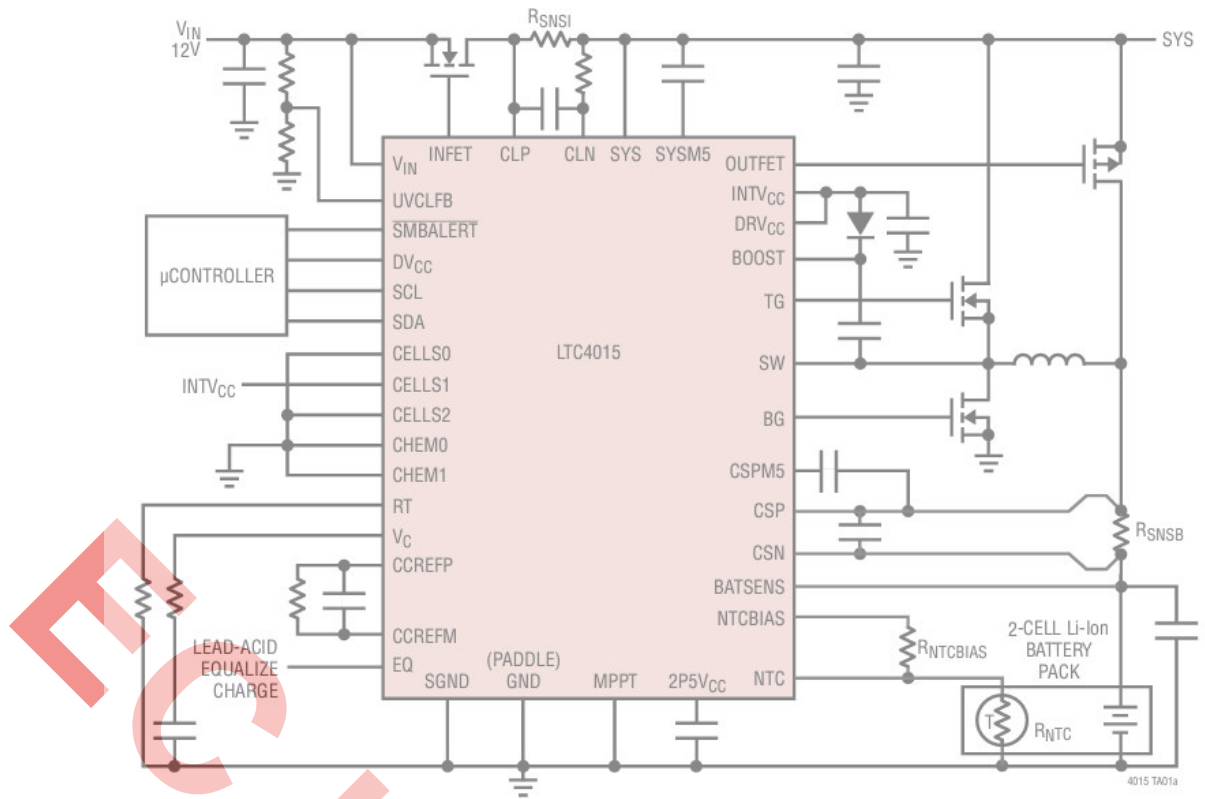


Рис3.2 Типова схема використання LTC4015 [6].

3.3 Microchip MCP73123

MCP73123/223 — це високоточний контролер управління заряджанням акумуляторів на основі літій-залізо-фосфату (LiFePO₄), призначений для застосувань з обмеженим простором і чутливістю до витрат. MCP73123/223 забезпечує спеціалізовані алгоритми заряджання для акумуляторів LiFePO₄, щоб досягти оптимальної ємності та безпеки за мінімальний час заряджання. Завдяки своїм компактним розмірам і малій кількості зовнішніх компонентів, MCP73123/223 ідеально підходить для різноманітних додатків.

Абсолютно максимальна напруга до 18 В дозволяє використовувати MCP73123/223 в умовах суворого середовища, наприклад, із недорогими адаптерами змінного струму або при стрибках напруги через підключення/відключення пристроїв. MCP73123/223 застосовує алгоритм заряджання з постійним струмом/постійною напругою. Попередньо встановлена напруга 3.6 В на елемент спрощує проектування із порогом попереднього кондиціонування 2 В. Швидке заряджання з постійним струмом налаштовується за допомогою одного зовнішнього резистора в діапазоні від 130 мА до 1100 мА.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

MCP73123/223 також обмежує струм заряджання залежно від температури кристала під час роботи у високопотужних або високотемпературних умовах. Це термічне регулювання оптимізує час циклу заряджання, зберігаючи надійність пристрою. Вивід PROG MCP73123/223 також служить виводом ввімкнення. Коли на нього подається високий імпеданс, MCP73123/223 переходить у режим очікування.

MCP73123/223 повністю характеризується в діапазоні температур навколишнього середовища від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ і доступний у 10-вивідному корпусі DFN.

- **Особливості:** Ця мікросхема є одноканальним зарядним контролером, який спеціалізується на LiFePO_4 і інших літєвих акумуляторах.
- **Переваги:** Проста в інтеграції, підтримує малопотужні системи завдяки низькому споживанню енергії.
- **Застосування:** Використовується в компактних пристроях, портативних гаджетах і медичному обладнанні.

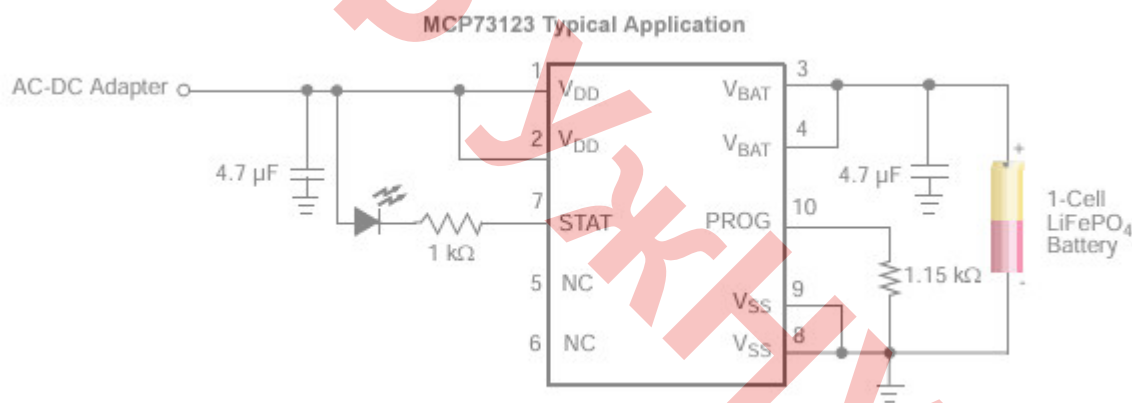


Рис3.3 Типова схема використання MCP73123/223 [7].

3.4 STMicroelectronics STC4054

STC4054 розроблений для роботи відповідно до специфікацій живлення USB. Вбудований блок регулює струм при підвищенні температури переходу, щоб захистити пристрій під час роботи у високопотужних або високотемпературних умовах. Напруга заряджання фіксована на рівні 4.2 В, а обмеження зарядного

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

струму можна налаштувати за допомогою одного резистора, підключеного між виводом PROG і GND.

Цикл заряджання автоматично завершується, коли струм, що подається на акумулятор, становить 1/10 запрограмованого значення. Якщо зовнішній адаптер видаляється, STC4054 вимикається, і з акумулятора до пристрою може протікати струм 2 μA . Пристрій може бути переведений у режим вимкнення, що знижує струм живлення до 25 μA .

STC4054 також має монітор струму заряджання, захист від зниження напруги (UVLO), автоматичне повторне заряджання. Пристрій доступний у корпусі TSOT23-5L.

- **Особливості:** STC4054 є лінійним зарядним контролером, оптимізованим для LiFePO₄ батарей.
- **Переваги:** Проста схема з мінімальною кількістю зовнішніх компонентів, вбудовані функції безпеки, такі як захист від короткого замикання та перевантаження.
- **Застосування:** Використовується в простих додатках, де не потрібно великого заряду струму, наприклад у побутовій електроніці.

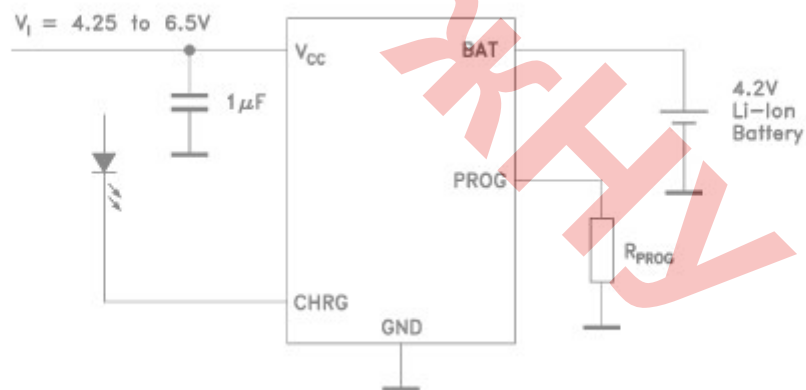


Рис3.4 Типова схема використання STC4054 [8].

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					23
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4 Renesas ISL78692

ISL78692 — це інтегрований зарядний пристрій для однокоміркових акумуляторів Li-ion або Li-polymer, здатний працювати при входній напрузі до 2.65 В (в умовах низької напруги, наприклад, cold crank case). Цей зарядний пристрій розроблений для роботи з різними типами адаптерів змінного струму або USB-портами.

ISL78692 працює як лінійний зарядний пристрій, коли адаптер змінного струму є джерелом напруги. Зарядження акумулятора здійснюється за профілем CC/CV (постійний струм/постійна напруга). Зарядний струм програмується за допомогою зовнішнього резистора до 1 А. ISL78692 також може працювати з адаптером, що має обмеження по струму, для мінімізації теплових втрат.

ISL78692 має функцію зниження струму зарядження при нагріванні (thermal foldback), що гарантує безпечну роботу за умов обмеженого теплового розсіювання друкованої плати через обмежений простір. Додаткові функції включають попереднє зарядження розрядженого акумулятора, інтерфейс NTC-термістора для зарядження акумулятора в безпечному діапазоні температур і автоматичне повторне зарядження.

Пристрій розрахований на роботу при температурі навколишнього середовища від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ і доступний у термічно покращеному корпусі DFN розміром 3x3 мм.

- **Особливості:** Ця мікросхема була спеціально розроблена для автомобільних застосувань з високими вимогами до безпеки.
- **Переваги:** Підтримує зарядження LiFePO_4 з високою точністю і надійністю, має функції захисту, які відповідають стандартам автомобільної індустрії.
- **Застосування:** Використовується в автомобільній електроніці, де потрібна висока надійність і безпека.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

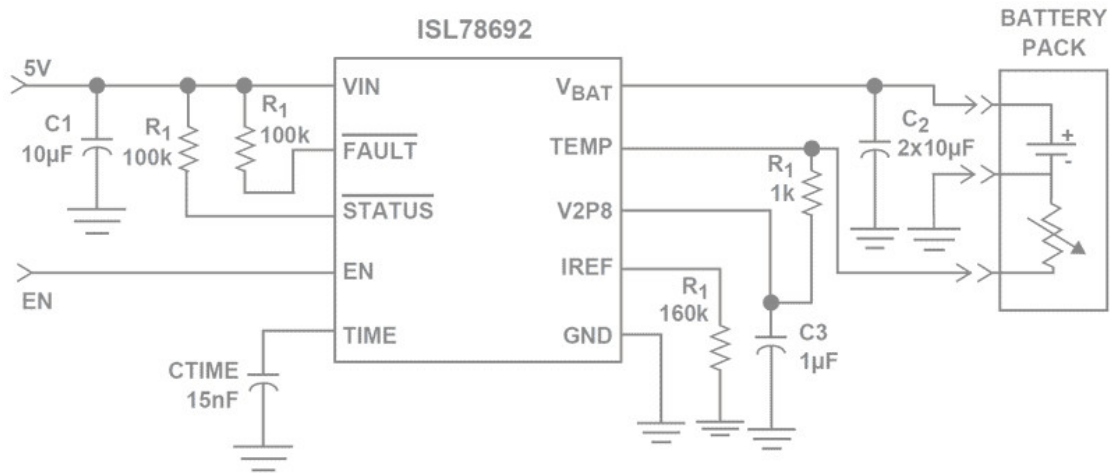


Рис3.5 Типова схема використання ISL78692 [9].

3. Порівняння та вибір оптимальної мікросхеми

При виборі мікросхеми для заряджання LiFePO₄ акумуляторів важливо враховувати такі фактори:

- **Максимальний зарядний струм** – обирається залежно від ємності акумулятора.
- **Доступність захистів** – наявність захисту від короткого замикання, перегріву та перевантаження є критично важливими для забезпечення безпечної експлуатації.
- **Точність вимірювань** – для забезпечення довговічності акумулятора важливо, щоб мікросхема підтримувала точне вимірювання параметрів заряджання.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					25
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ БЛОКІВ МАКЕТУ

4.1 Структурна схема пристрою

Згідно з технічним завданням, необхідно розробити зарядний пристрій, який відповідатиме всім вимогам щодо безпечної експлуатації LiFePO₄ акумуляторів та забезпечуватиме можливість заряджання до чотирьох послідовно з'єднаних елементів.

Обов'язковою умовою є наявність DC/DC перетворювача, який забезпечить стабільне живлення для зарядного контуру. З урахуванням вимог до функціональності та огляду існуючих технічних рішень, було обрано мікросхему **LTC4000**, що дозволяє реалізувати інтелектуальний алгоритм заряджання з режимами постійного струму та постійної напруги.

У поєднанні з понижувальним перетворювачем **LM3845**, система здатна забезпечити вихідний струм до 15 А. Проте у даній розробці розрахункове значення встановлено на рівні 5 А, оскільки за більших навантажень виникає потреба у спеціалізованому охолодженні та відповідній конструкції корпусу.

Передбачається, що пристрій міститиме мікроконтролер для моніторингу параметрів роботи та інтеграції з сучасними IoT-системами. У якості керуючого модуля обрано **ESP32**, який має вбудовані бездротові інтерфейси (Wi-Fi, Bluetooth) та відкриває широкі можливості для дистанційного управління й збору даних.

Структурну схему зарядного пристрою наведено на рисунку 4.1.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					26
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

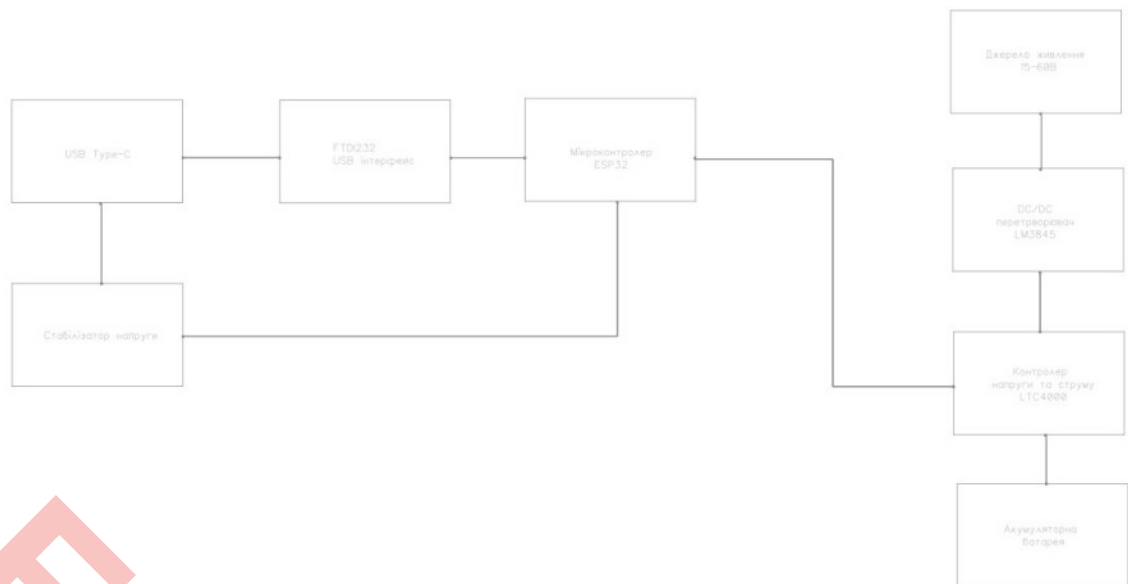


Рис 4.1 Структурна схема зарядного пристрою.

1. USB Type-C
2. Стабілізатор напруги;
3. FTDI232;
4. Мікроконтроллер ESP32;
5. Джерело напруги від 15В до 60В;
6. DC/DC перетворювач;
7. Контролер напруги та струму;
8. Акумуляторна батарея;

4.2 DC/DC перетворювач

Для зручності

Buck Converter (знижуючий перетворювач) — це тип імпульсного DC-DC перетворювача, який знижує вхідну напругу до заданого рівня, зберігаючи полярність виходу. Buck конвертер широко використовується в електронних пристроях для живлення мікросхем, двигунів, акумуляторів та інших компонентів, які потребують стабільної напруги, нижчої за вхідну.

Принцип роботи

Buck конвертер базується на комутації елементів, таких як:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

1. **Вхідний джерело напруги (VIN):** Постійна напруга, яка подається на вхід конвертера.
2. **Ключовий елемент (зазвичай MOSFET):** Контролює проходження струму до навантаження.
3. **Діод:** Забезпечує шлях для струму, коли ключ вимкнений.
4. **Індуктивність (L):** Згладжує імпульси струму та накопичує енергію.
5. **Конденсатор (C):** Забезпечує фільтрацію вихідної напруги, згладжуючи пульсації.

Режими роботи:

- **Режим постійного струму (Continuous Conduction Mode, CCM):** Індуктивність зберігає заряд під час всієї фази роботи.
- **Режим переривчастого струму (Discontinuous Conduction Mode, DCM):** Струм через індуктивність падає до нуля на деяких етапах.

Етапи роботи

1. **Фаза ввімкнення ключа:**
 - Ключовий елемент (MOSFET) увімкнено.
 - Струм тече через індуктивність до навантаження.
 - Індуктивність накопичує енергію, а напруга на навантаженні збільшується.
2. **Фаза вимкнення ключа:**
 - Ключовий елемент вимкнений.
 - Індуктивність розряджається через діод, забезпечуючи живлення навантаження.
 - Вихідна напруга стабілізується за допомогою конденсатора.[10]

LT®3845 — це високовольтний, синхронний, контролер у режимі струму, призначений для середньо- та високопотужних, високоефективних джерел живлення. Він забезпечує широкий діапазон вхідної напруги від 4В до 60В (мінімальна напруга запуску — 7.5В). Вбудований регулятор спрощує вимоги до зміщення, забезпечуючи живлення мікросхеми безпосередньо від VIN.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					28
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Режим Burst Mode® підтримує високу ефективність при малих навантаженнях, знижуючи споживання мікросхеми до 120 мкА. Ефективність при малих навантаженнях також покращується завдяки функції блокування реверсного струму індуктора, яка підтримує дискретну роботу.

Додаткові функції включають регульовану фіксовану робочу частоту, яку можна синхронізувати із зовнішнім тактовим сигналом для застосувань, чутливих до шуму, драйвери затворів, здатні керувати великими N-канальними MOSFET, точний захист від недостатньої напруги, струм споживання у вимкненому стані 10 мкА, захист від короткого замикання та програмований плавний старт.

LT3845 доступний у 16-вивідному корпусі TSSOP з термічним захистом та 16-вивідному наскрізному корпусі N.

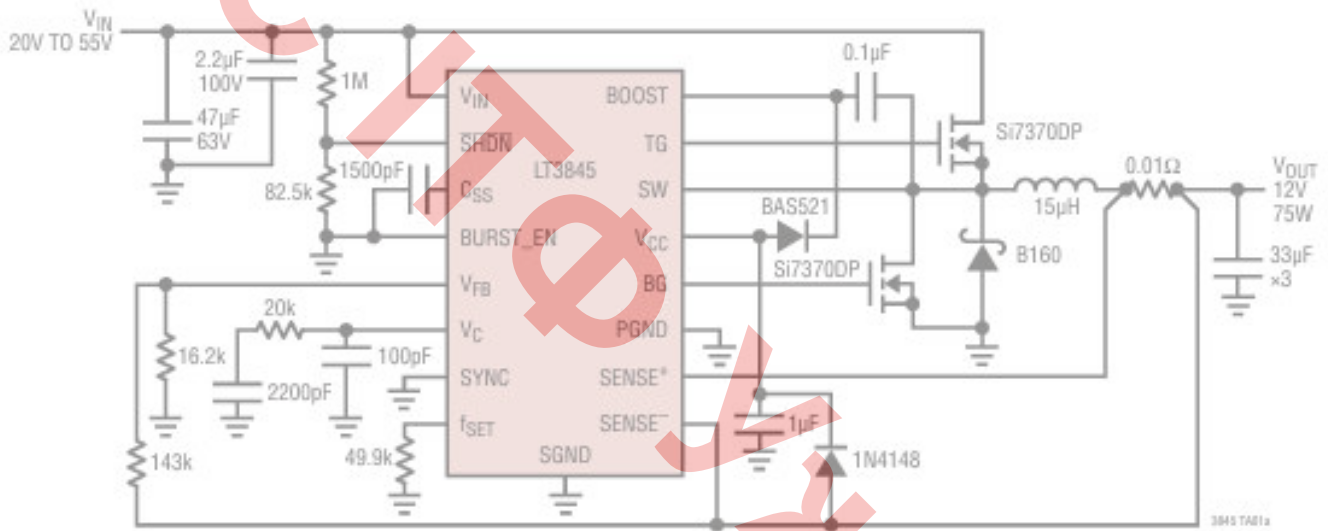


Рис4.2 Типова схема використання LM3845 [10].

Для зручності роботи, кожен сучасний пристрій повинен мати інтерфейс

Розрахуємо максимальний ESR

Для виконання вимог щодо пульсацій вихідної напруги (ΔV_{OUT}) система має відповідати наступній формулі:

$$ESR_{MAX} = \frac{\Delta V_{out} * (V_{out} * (1 - \frac{V_{out}}{V_{inmax}}))}{L * f} \quad (4.1)$$

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- Діапазон вхідної напруги (V_{in}): 15В–60В.
- Вихідна напруга (V_{out}): 12В.
- Вихідний струм (I_{out}): 10А.
- Індуктивність (L): 10μГн (типове значення для такого рівня потужності).
- Частота перемикання (f): 250 кГц
- Максимально допустима пульсація напруги (ΔV_{out}): 100мВ (0.1В).

Знайдемо пульсаційну компоненту:

Максимальна пульсація напруги виникає при $V_{inmax} = 60В$:

$$1 - \frac{V_{in}}{V_{inmax}} = 1 - \frac{12}{60} = 1 - 0.2 = 0.8 \quad (4.2)$$

Підставимо значення у формулу:

$$ESR_{MAX} = \frac{0.1 \cdot (12 \cdot 0.8)}{10 \times 10^{-6} \cdot 250 \times 10^3} \quad (4.3)$$

Спростивши чисельник та знаменник отримаємо наступне:

$$ESR_{MAX} = \frac{0,96}{2,5} = 0,384\Omega \quad (4.4)$$

Розрахуємо подільник каналу зворотнього зв'язку для режиму 12В. Напруга задається двома резисторами R1 та R2 [10].

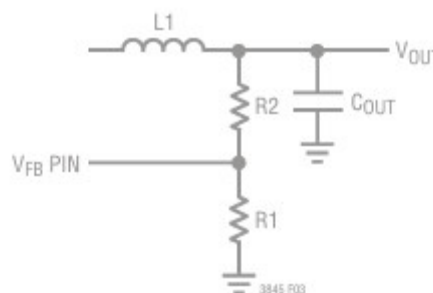


Рис4.3 схема каналу зворотнього зв'язку.

Значення резистора R2 визначається за формулою:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$R_2 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{1.231V} - 1 \right) \quad (4.5)$$

Знаючи, що вихідна напруга $V_{out} = 12V$, а значення резистора $R_1 = 10k\Omega$ вирахуємо значення R_2 :

$$R_2 = R_2 \left(\frac{12V}{1.231V} - 1 \right) = 87.48 k\Omega \quad (4.6)$$

Відповідно до стандартних номіналів виберемо $86,6k\Omega$ 1%.

Вивід **SHDN** має точний поріг напруги з гістерезисом, який можна використовувати як поріг блокування при низькій напрузі (UVLO) для джерела живлення. Блокування при низькій напрузі утримує LT3845 у вимкненому стані до тих пір, поки вхідна напруга джерела живлення не перевищить певне значення, задане користувачем. Гістерезисна напруга запобігає хибному спрацьовуванню UVLO через шуми.

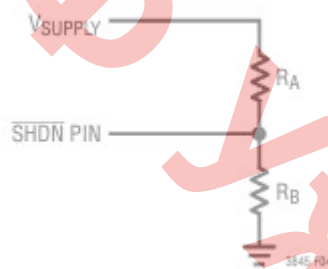


Рис4.4 схема підключення сигналу SHDN.

Резистори вибираються наступним чином: спочатку обирається R_B . Потім розраховується:

$$R_A = R_B \frac{V_{supply(on)}}{1.35V-1} \quad (4.7)$$

$V_{SUPPLY(ON)}$ – це вхідна напруга, при якій блокування при низькій напрузі вимикається, і джерело живлення вмикається. При $R_B = 49.9 k\Omega$:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$R_A = 49.9 \text{ кОм} \frac{14.5\text{V}}{1.35\text{V}-1} = 486.1 \text{ кОм} \quad (4.8)$$

Відповідно до стандартних номіналів обираємо – 499Ом.

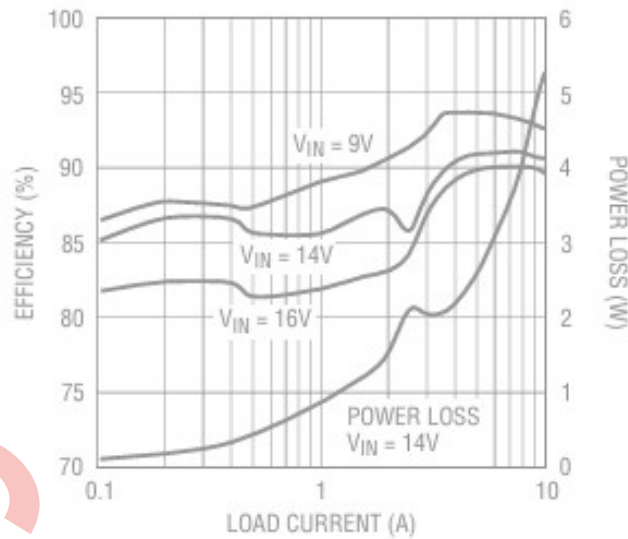


Рис4.4 Характеристика втрат ефективності перетворювача [10].

Виходячи із харатреристи ефективності перетворювача, зображеної на Рис4.4 можемо визначити приблизні втрати при навантаженні у 5А. Зрозуміло, що 2,5Вт буде виділятися у вигляді тепла і буде враховано при розрахунках теплонавантаженні.

4.3 Контролер напруги та струму LTC4000

LTC®4000 — це високовольтний, високопродуктивний контролер, який перетворює багато зовнішніх компенсованих джерел живлення DC/DC у зарядні пристрої з повним набором функцій [11].

Особливості зарядного пристрою LTC4000 включають:

- Точну програмовану напругу заряджання (з точністю $\pm 0,25\%$),
- Вибір завершення заряджання за таймером або струмом,
- Температурно-кваліфіковане заряджання за допомогою термістора NTC,
- Автоматичне відновлення заряджання,
- Підтримку заряджання малим струмом (C/10) для сильно розряджених осередків,
- Виявлення несправних акумуляторів та виходи індикаторів стану.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Зарядний пристрій також має прецизійний контроль струму, що дозволяє використовувати низькі напруги на шунті для застосувань із високими струмами.

LTC4000 підтримує інтелектуальне управління PowerPath.

Зовнішній PFET забезпечує захист від реверсного струму з низькими втратами. Ще один зовнішній PFET забезпечує зарядження або розрядження акумулятора з низькими втратами. Цей другий PFET також дозволяє реалізувати функцію миттєвого увімкнення, яка забезпечує живлення системи навіть при підключенні до сильно розрядженого або короткозамкненого акумулятора.

LTC4000 доступний у низькопрофільних корпусах QFN на 28 виводів розміром 4 мм × 5 мм та SSOP.

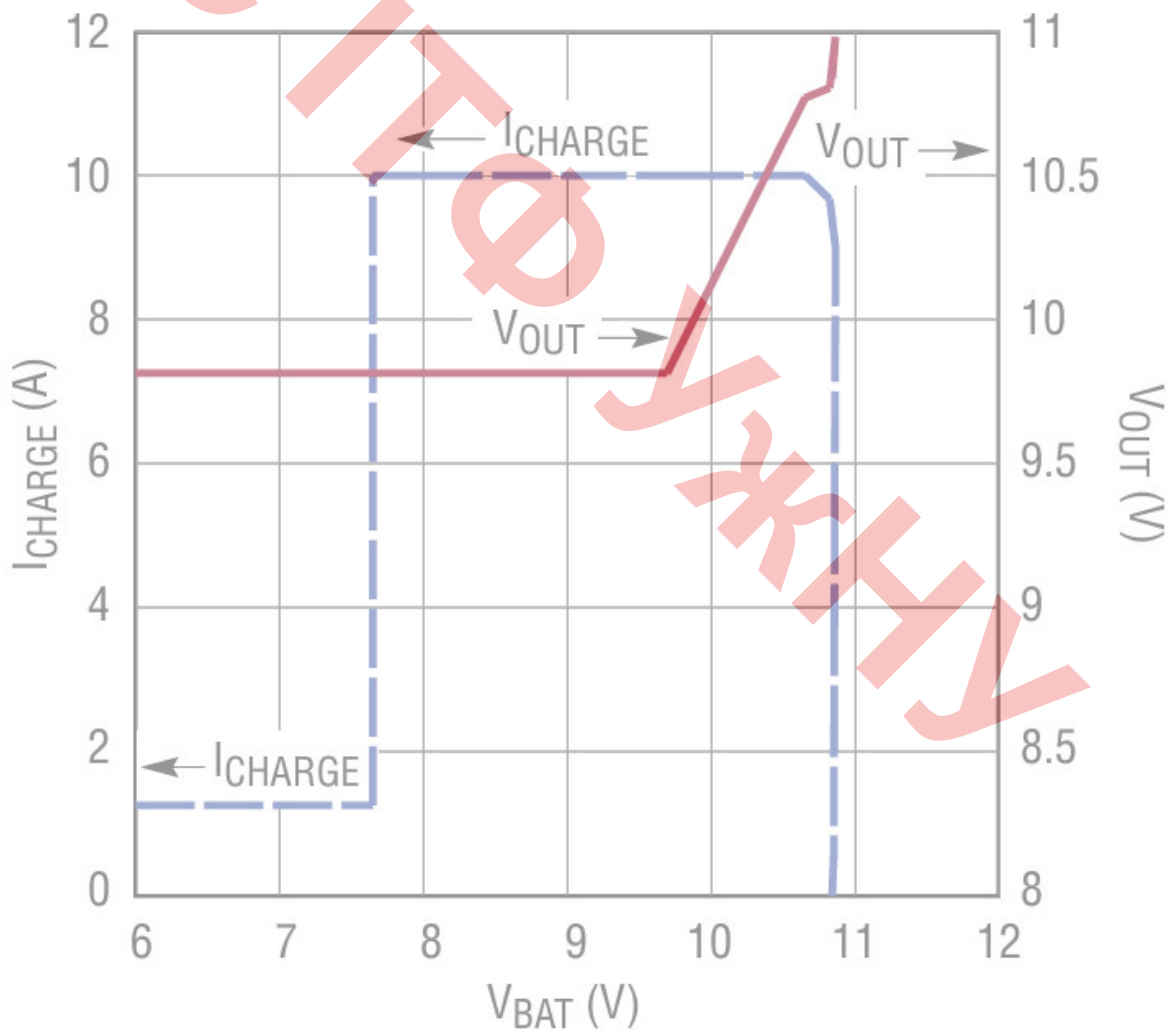


Рис4.5 Характеристика струму зарядки та вихідної напруги відповідно [11].

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Розглянемо детальніше структуру контролера напруги і струму, та розрахуємо основні його елементи. Потібно вказати на те, що деякі значення зовнішніх елементів будуть взяті з опису виробника, так як являються рекомендованими, та не потребують додаткових поррахунків, чи підбору при наладці.

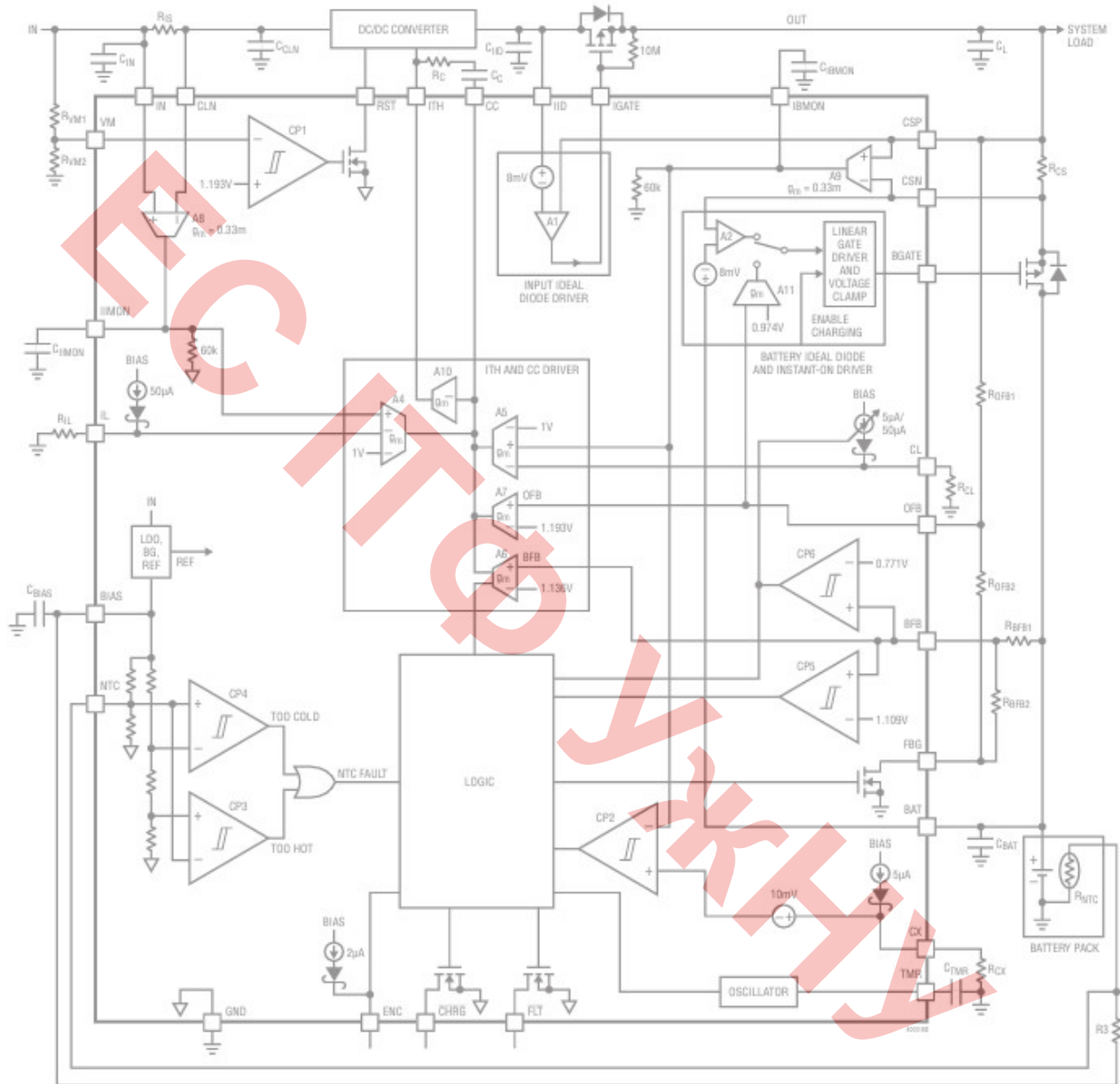


Рис4.6 Функціональна внутрішня схема контролера напруги та струму.

Регулювання та моніторинг вхідного струму відбувається спеціальним модулем. Один із контурів, що керує виводами ITH і CC, — це контур регулювання вхідного струму (Рис.4.7). Цей контур запобігає перевищенню

вхідного струму, який вимірюється через резистор датчика вхідного струму (**RIS**), понад встановлене граничне значення вхідного струму.

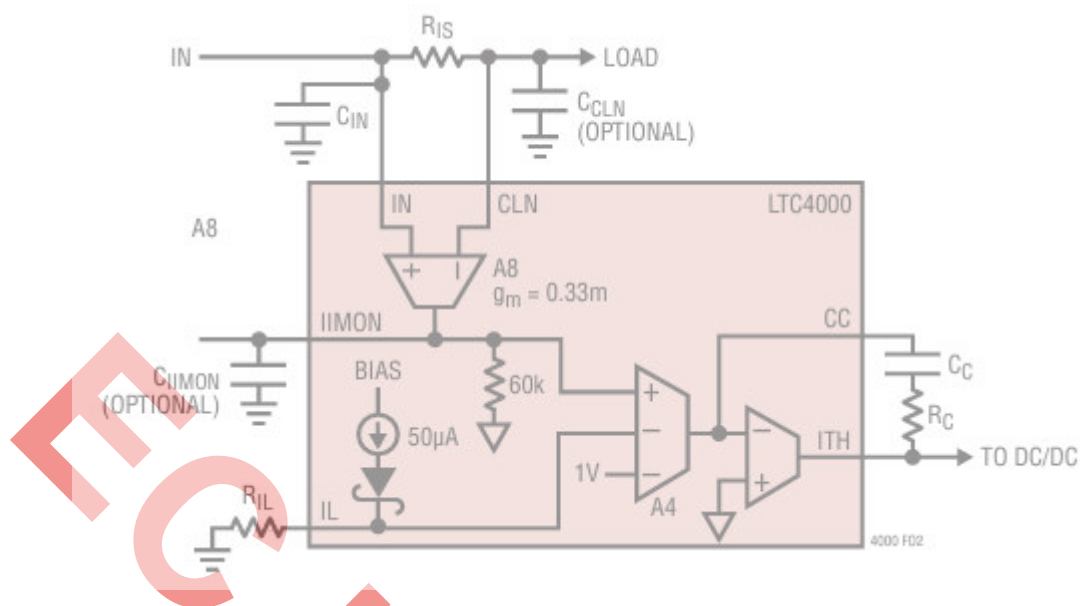


Рис4.7 Функціональна внутрішня схема каскаду контролю вихідного струму.

Окрім контуру регулювання вхідного струму, LTC4000 також регулює зарядний струм, напругу акумулятора та вихідну напругу.

Коли починається цикл заряджання акумулятора, зарядний пристрій спочатку визначає, чи акумулятор надмірно розряджений. Якщо напруга зворотного зв'язку акумулятора нижче **VLOBAT**, функція автоматичного заряджання малим струмом (trickle charge) використовує контур регулювання зарядного струму для встановлення зарядного струму акумулятора на рівні 10% від заданого повного значення. Якщо вивід **TMR** підключений до конденсатора або залишається відкритим, таймер визначення несправного акумулятора активується.

Якщо цей таймер завершується, а напруга акумулятора все ще нижча за **VLOBAT**, зарядний пристрій автоматично припиняє заряджання і через виводи **FLT** та **CHRG** вказує, що акумулятор не реагує на зарядний струм. Після того як напруга акумулятора перевищить **VLOBAT**, контур регулювання зарядного струму починає заряджання в режимі постійного струму повної потужності. У цьому випадку заданий струм заряджання визначається резистором на виводі **CL**.

Залежно від доступної вхідної потужності та зовнішніх навантажень зарядний пристрій може не забезпечувати заряджання на повному запрограмованому рівні.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Зовнішнє навантаження завжди має пріоритет над зарядним струмом акумулятора. Завжди дотримується заданий ліміт вхідного струму, а для заряджання акумулятора використовується лише додаткова потужність. Якщо системне навантаження незначне, зарядний струм акумулятора максимізується.

Коли досягається напруга підтримки (float voltage), контур регулювання напруги підтримки бере на себе управління від контуру регулювання зарядного струму і ініціює заряджання в режимі постійної напруги. У цьому режимі зарядний струм поступово зменшується.

Завершення заряджання можна налаштувати кількома способами через вивід **TMR**:

1. Якщо вивід **TMR** підключений до **BIAS**, активується завершення **C/X**. У цьому випадку заряджання припиняється, коли струм заряджання при постійній напрузі зменшується до рівня **C/X**, заданого на виводі **CX**.

2. Підключення конденсатора до виводу **TMR** активує завершення заряджання за таймером, який запускається на початку заряджання в режимі постійної напруги. Заряджання припиняється після завершення таймера.

3. Якщо потрібне безперервне заряджання при напрузі підтримки, вивід **TMR** слід підключити до землі (**GND**), щоб відключити завершення.

Після завершення заряджання підключений до виводу **BGATE** PMOS працює як ідеальний діод між виводами **BAT** і **CSN**. Ця функція діода запобігає зарядному струму, але забезпечує подачу струму на системне навантаження за потреби. Якщо системне навантаження може повністю житися від вхідного джерела, PMOS акумулятора вимикається.

У стані завершеного заряджання, якщо ліміт вхідного струму не регулюється, контур регулювання вихідної напруги бере на себе управління, щоб забезпечити контроль напруги на виводі **CSP**. Контур регулювання вихідної напруги підтримує напругу на виводі **CSP**, таку щоб напруга зворотного зв'язку на виводі **OVB** становила **1.193В**.

Відповідно до опису виробника [11] розрахуємо додаткові елементи.

Поріг зниження напруги монітора вхідної напруги встановлюється на рівні 14.3 В відповідно до наступної формули:

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$R_{VM1} = \left(\frac{14.3V}{1.193V} - 1 \right) \cdot 100k\Omega \approx 1.10M\Omega \quad (4.9)$$

Вивід **IL** залишається відкритим, щоб напруга на цьому виводі була $>1,05$ В. Напруга регулювання на виводі **PMON** обмежена на рівні 1,0 В за допомогою точного внутрішнього еталона. Таким чином, ліміт вхідного струму встановлюється на рівні 10 А відповідно до наступної формули:

$$R_{IS} = \frac{0.050V}{10A} = 5m\Omega \quad (4.10)$$

Резистор **RCL** встановлений на рівні 24.9k Ω таким чином, щоб напруга на виводі **CL** дорівнювала 1.25В. Подібно до виводу **PMON**, напруга регулювання на виводі **IBMON** обмежена на рівні 1В за допомогою точного внутрішнього еталона. Таким чином, ліміт зарядного струму встановлюється на рівні 10А відповідно до наступної формули:

$$I_{CLIM(MAX)} = \frac{0.050V}{R_{CS}} = \frac{0.050V}{5m\Omega} = 10A \quad (4.11)$$

Рівень струму попереднього заряджання (trickle charge) встановлюється на рівні 1.25А відповідно до наступної формули:

$$I_{CLIM(TRKL)} = 0.25\mu A \cdot \frac{24.9k\Omega}{5m\Omega} = 1.25A \quad (4.12)$$

Напруга підтримки акумулятора (float voltage) встановлюється на рівні 10.8В відповідно до наступної формули:

$$R_{VFB1} = \left(\frac{10.8}{1.136} - 1 \right) \cdot 133k\Omega \approx 1.13M\Omega \quad (4.13)$$

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Час виявлення несправного акумулятора встановлюється на рівні 43 хвилини відповідно до наступної формули:

$$C_{TMR}(nF) = t_{BADBAT}(h) \cdot 138.5 = \frac{43}{60} \cdot 138.5 = 100nF \quad (4.14)$$

4.4 Вибір цифрового мікроконтролера.

Для можливості віддаленого керування пристроєм, та наявності гнучкого вузла автоматизації, пропонується використати цифровий модуль ESP32. Даний модуль є закінченим вузлом, та легко інтегрується на друковану плату. ESP32 є багатофункціональною платформою для створення IoT-проектів, завдяки своїм потужним характеристикам, низькому енергоспоживанню та підтримці сучасних бездротових технологій.

ESP32 — це високопродуктивний мікроконтролер із інтегрованим модулем Wi-Fi та Bluetooth, розроблений компанією **Espressif Systems**. Цей чип є популярним вибором для IoT-проектів, завдяки своїй гнучкості, низькому енергоспоживанню та доступності [12].

Основні характеристики ESP32

- **Обчислювальна потужність:**
 - Два ядра **Xtensa LX6** з тактовою частотою до 240 МГц.
 - Інтегрований цифровий сигналовий процесор (DSP) для обробки даних у реальному часі.
- **Пам'ять:**
 - До **520 КБ** оперативної пам'яті (SRAM).
 - Підтримка зовнішньої пам'яті через SPI/SDIO інтерфейси (до 4 МБ).
- **Комунікаційні можливості:**
 - **Wi-Fi** (802.11 b/g/n) з підтримкою одночасного режиму точка доступу/станція.
 - **Bluetooth 4.2** та **Bluetooth Low Energy (BLE)** для бездротової передачі даних.
 - Підтримка Ethernet через зовнішні PHY модуля.
- **Інтерфейси вводу/виводу:**

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

- До **36 GPIO** з підтримкою багатофункціональних периферійних функцій.
- SPI, I2C, I2S, UART, PWM, ADC (12-біт, 18 каналів), DAC.

➤ **Живлення:**

- Робоча напруга від **2.3 В до 3.6 В**.
- Вбудовані режими низького енергоспоживання (Deep Sleep) зі споживанням лише **2.5 мкА**.

➤ **Функції безпеки:**

- Шифрування AES, SHA-2, RSA.
- Підтримка захищеного завантаження та OTP-пам'яті для ключів.

[12]

Переваги ESP32

- **Багатофункціональність:** Завдяки інтеграції Wi-Fi, Bluetooth та обчислювальних модулів, ESP32 може виконувати одразу кілька завдань, включаючи бездротову передачу даних, обробку сигналів та управління пристроями.
- **Низьке енергоспоживання:** ESP32 підтримує кілька режимів енергозбереження (Light Sleep, Deep Sleep), що робить його ідеальним для автономних пристроїв із живленням від батареї.
- **Висока продуктивність:** Завдяки двоядерному процесору та DSP, ESP32 може обробляти складні алгоритми в реальному часі.
- **Широка екосистема:**
 - Підтримка популярних фреймворків, таких як Arduino IDE, PlatformIO та Espressif IDF.
 - Багато готових бібліотек для сенсорів, дисплеїв, комунікаційних протоколів тощо.
- **Доступність:** Відносно низька вартість у порівнянні з іншими IoT-платформами аналогічного класу.
- **Надійність:** Інтегровані функції безпеки дозволяють використовувати ESP32 у критично важливих застосуваннях, таких як промисловий IoT [12].

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Застосування ESP32

1. **IoT-пристрої:** ESP32 є ідеальним вибором для створення розумних пристроїв, таких як датчики, освітлення, термостати.
2. **Системи автоматизації:** Використовується у побутових, промислових та сільськогосподарських системах для збору даних і управління.
3. **Мультимедійні проєкти:** Завдяки підтримці I2S та DAC, ESP32 може працювати з аудіо- та відеообладнанням.
4. **Прототипування:** Висока гнучкість і підтримка багатьох інтерфейсів дозволяють використовувати ESP32 для тестування різних ідей.

Джерело: Hackaday

Для зручності роботи, кожен сучасний пристрій повинен мати інтерфейс, через який можна виконувати

Для забезпечення стабільного живлення ESP32, яке працює на напрузі 3.3 В, може бути використано вхідну напругу від USB (5 В). Оскільки USB забезпечує напругу, яка перевищує необхідну для ESP32, стабілізатор напруги LM1117 буде застосовуватися для зниження напруги до потрібного рівня.

LM1117 — це лінійний стабілізатор напруги із низьким падінням напруги (LDO), який перетворює вхідну напругу на стабільну вихідну напругу. Модель LM1117-3.3 забезпечує фіксовану напругу на виході 3.3 В, яка відповідає вимогам ESP32 [13].

Основні характеристики LM1117:

1. **Вхідна напруга:** 4.75–12 В (для забезпечення стабільної роботи при вихідній напрузі 3.3 В).
2. **Вихідна напруга:** 3.3 В (фіксована для версії LM1117-3.3).
3. **Максимальний вихідний струм:** До 800 мА.
4. **Падіння напруги:** Близько 1.1 В при максимальному струмі.
5. **Захист:** Вбудовані захисти від перевантаження по струму та перегріву.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

4.5 Вибір та реалізація зовнішнього цифрового інтерфейсу.

Для зручності роботи, кожен сучасний пристрій повинен мати інтерфейс, через який можна виконувати програмування, діагностування та налаштування. Для даного пристрою вибрано сучасний зруний інтерфейс USB type-C. Конектор Type-C можна підключати будь-якою стороною вгору, що значно спрощує процес підключення пристроїв і знижує ризик пошкодження портів. Інтерфейс USB Type-C підтримує передачу живлення до 5 В при 1.5 А або 3 А залежно від конфігурації кабелю. Це дозволяє використовувати Type-C для живлення даного пристрою.

Відповідно максимальна потужність приладу яку він зможе отримати виключно через type-c (без додаткового живлення):

$$P_{MAX} = 5V * 3A = 15Вт. \quad (4.15)$$

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					41
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи бакалавра на тему «Імпульсний зарядний пристрій для LiFePO₄ акумуляторів», відповідно до вимог, визначених у технічному завданні, було проведено повний аналіз цілей проєкту та критичний огляд існуючих технічних рішень. На основі цього:

- Розроблено електричну структурну схему зарядного пристрою;
- Спроектовано принципову електричну схему системи заряджання;
- Обрано сучасну, доступну та оптимальну елементну базу для реалізації функціоналу пристрою.

Отримані результати повністю відповідають обсягу бакалаврського проєкту й можуть бути використані як основа для подальших конструкторських робіт зі створення зарядного пристрою з інтегрованим USB-інтерфейсом для LiFePO₄ акумуляторів.

До основних переваг та технічних характеристик спроектованого пристрою можна віднести:

- Відсутність повних аналогів серед масових рішень на ринку;
- Можливість використання у пристроях з автономним живленням: промислових системах, резервному енергоживленні, медичній техніці, портативній електроніці;
- Автоматичне регулювання параметрів заряджання відповідно до типу та стану акумулятора;
- Інтелектуальне керування енергопотокami між джерелом живлення, батареєю та навантаженням (технологія PowerPath);
- Моніторинг рівня заряду батареї у режимі реального часу;
- Захист від перевантаження, перегріву, перенапруги;
- Підтримка автоматичного підзаряджання акумулятора при виявленні розряду;
- Виявлення несправностей батареї з відповідною індикацією.

	Виконав				<i>КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ</i>	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Analog Devices. *Understanding Li-Ion Battery Charging*. Доступно онлайн: <https://www.analog.com>.
2. Texas Instruments. *Battery Management Systems*. Доступно онлайн: <https://www.ti.com>.
3. Battery University. *Types of Lithium-Ion Batteries*. Доступно онлайн: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
4. ScienceDirect. *LiFePO₄ Battery Characteristics and Applications*. Доступно онлайн: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2405829716300055>.
5. IEEE Access. *Comparative Analysis of LiFePO₄ and Li-Pol Batteries*. Доступно онлайн: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8766145>.
6. Nature Energy. *Advances in LiFePO₄ Battery Safety and Longevity*. Доступно онлайн: <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0195-y>.
7. MDPI Batteries. *LiFePO₄ vs. Li-Pol: Performance and Environmental Impact*. Доступно онлайн: <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/1/2>.
8. Journal of Power Sources. *Applications of LiFePO₄ Batteries in Renewable Energy Systems*. Доступно онлайн: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-power-sources>.
9. Texas Instruments BQ24650. *High-Efficiency Li-Ion and Li-Pol Battery Charger Controller*.
10. Analog Devices LTC4015. *Multicell Li-Ion Battery Charging Controller with PowerPath Control*.
11. Microchip MCP73123. *Single-Cell Lithium-Ion/Lithium-Polymer Battery Charger with Integrated FET*.
12. STMicroelectronics STC4054. *Linear Li-Ion Battery Charger Controller*.
13. Renesas ISL78692. *Single-Cell Li-Ion and Li-Polymer Battery Charger for Portable Applications*.
14. Herbert C.G., Johnstone R.A.W. *Mass Spectrometry Basics*. CRC Press, New York, 2002.

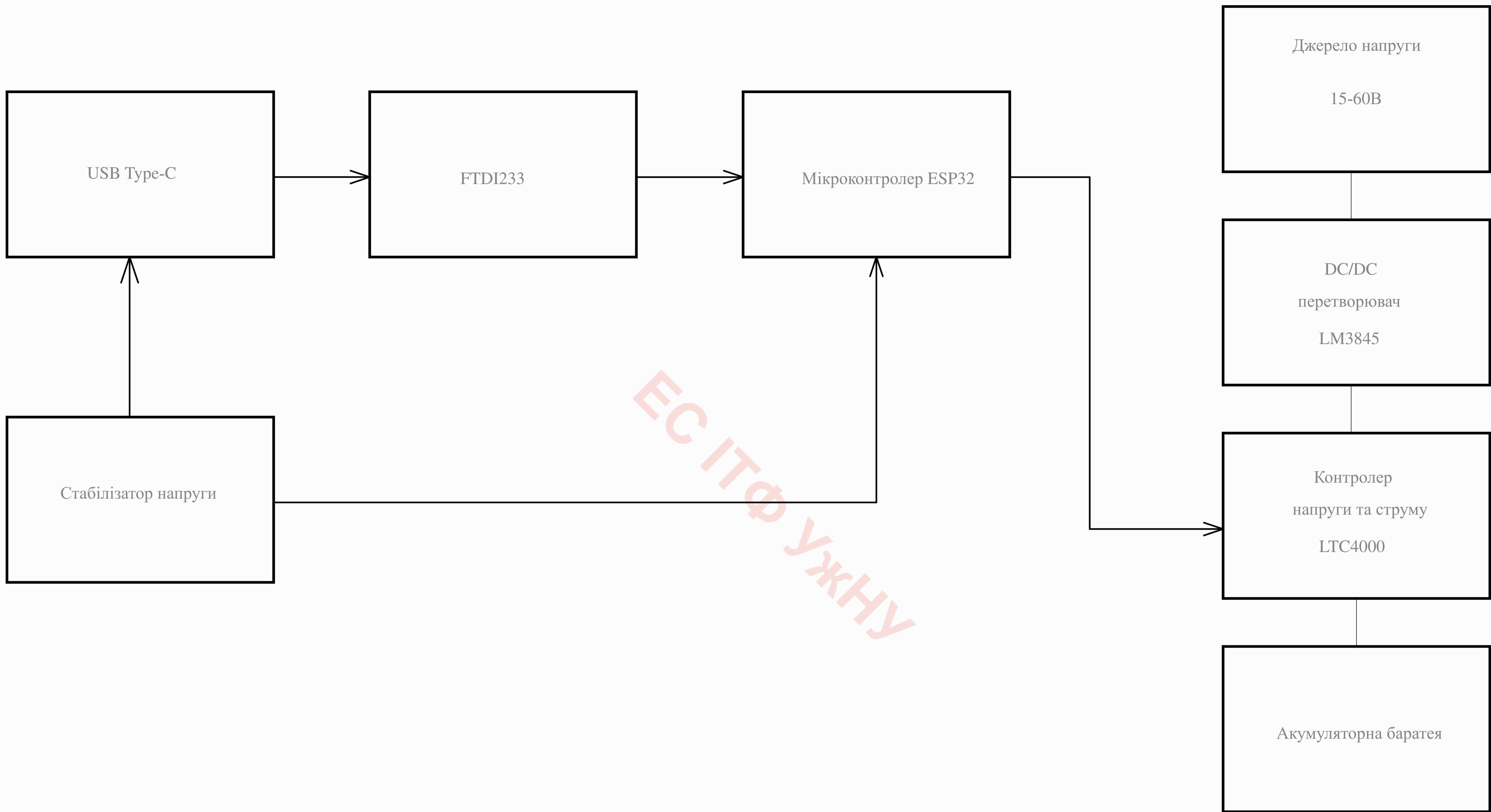
	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

15.Lodish H.F., Berk A., Zipursky S.L. et al. *Molecular Cell Biology*. Macmillan Learning, New York, 2013.

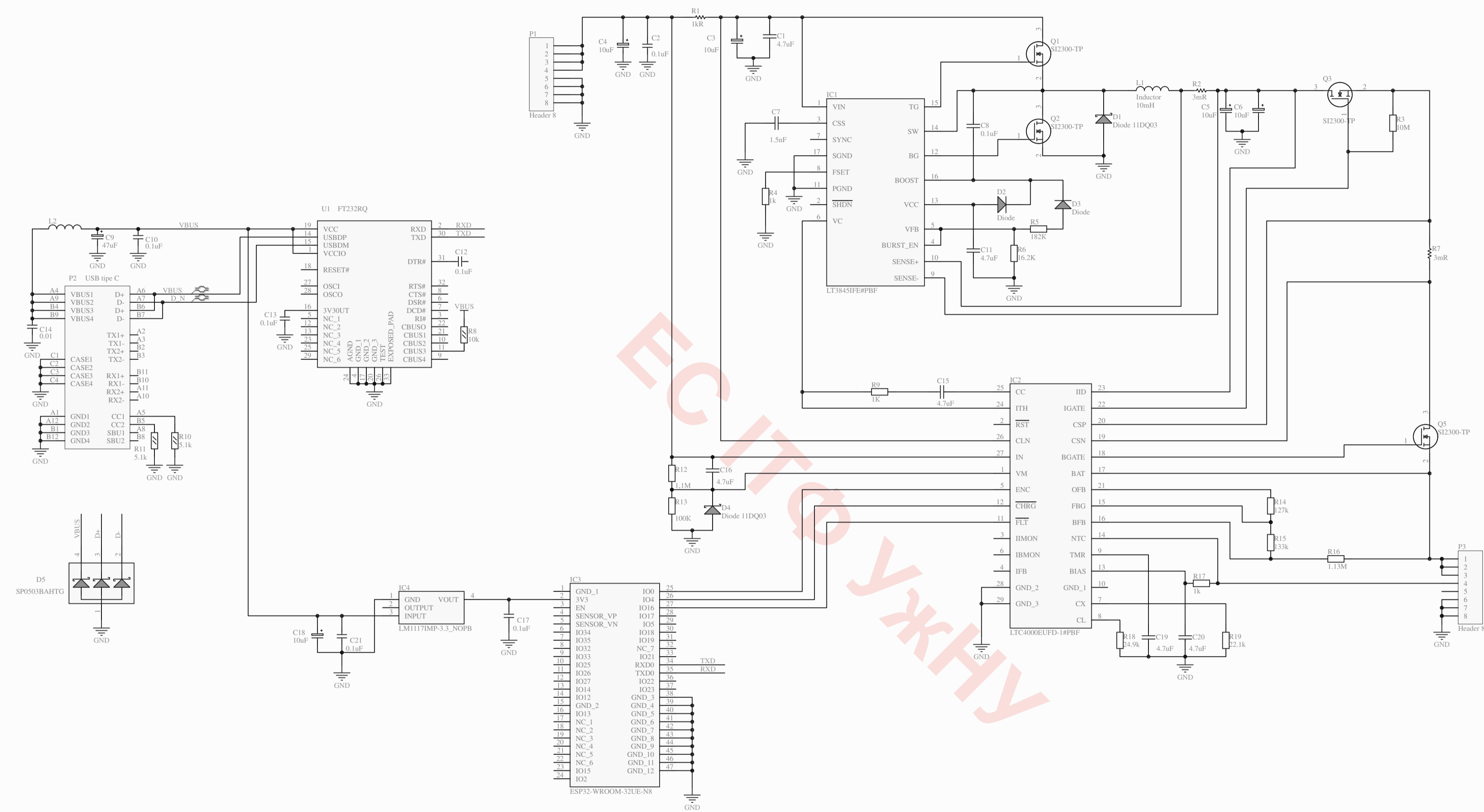
ЕСІТФУЖНУ

	Виконав				КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЗ	Арк.
	Керівник					44
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЕС ІТФ УЖНУ



						КРБ.ЕС. 4265956.001 Е1				
№	Арк.	№ докум.	Повис.	Дата	Імпульсний зарядний пристрій для LiFePo4 акумуляторів			Літера	Маса	Масштаб
Розробив	Фесей В.М.							И		5:1
Перевірив	Павл О.В.				Архив					
Н. Копр	Павл О.В.				Схема електрична структурна			УжНУ, ІТФ, курс 4 гр. ЕС		
Затвердив	Закор Т.М.									



						КРБ.ЕС. 4265956.001 E3		
Зм.	Арх.	До докум.	Підпис	Дата	Импульсный зарядный пристрой для LiFePo4 аккумуляторов			
Розробив	Фесай В.М.							
Перевірив	Пань О.В.							
						Літера	Місце	Масштаб
						И		1:1
						Архив	Архив	
Н. Кооп.	Пань О.В.					УосНУ, ІТФ, курс 4 гр. ЕС		
Затвердив	Зюльє Т.М.							

Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітки					
<u>Конденсатори</u>								
C1, C8, C11, C15, C16, C19, C20	CAP CER 4.7UF 16 V X5R 0402	7	Murata GRM155R60J475ME47					
C2, C10, C12, C13, C17, C21	TDK 100nF MLCC 25V ±10% 0603	6	TDK CGA3E2X7R1E104K080A					
C3, C4, C5, C6	CAP TANT 10UF 6.3V 0805	4	Vishay TAJR106M006RNJ					
C7	CAP CER 1.5nF 6.3V 0402	1	Murata GRM155R60J475ME47D					
C9	CAP TANT Solid 47uF 6.3V	1	KEMET T525B476M006ATE080					
C14	CAP CER 0.01uF 50V X7R 0603	1	Samsung CL10B103KB8NCNC					
C18	CAP TANT 10UF 6V 0805	1	Vishay TAJR106M006RNJ					
<u>Діоди</u>								
D1, D4	Schottky Rectifier	2						
D2, D3	1N4007	2						
D5	ESD Suppressor TVS 5.5V SOT-143	1	Littelfuse SP0503BAHTG					
<u>Мікросхеми</u>								
IC1	LT3845IFE#PBF	1	Analog Devices					
IC2	LTC4000EUFD-1#PBF	1	Analog Devices					
IC3	ESP32-WROOM-32UE-N8	1	Espressi f					
IC4	LM1117IMP-3.3_NOPB	1	Texas Instruments					
U1	FT232RQ-REEL	1	FTDI					
<u>Дроселі</u>								
L1	Inducto 1mH	1	Coilcraf					
L2	Ferrite Beads 220Ohm 0805	1	Murata BLM21PG221SN1D					
КРБ.ЕС. 4265956.01 ПЕ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Імпульсний зарядний пристрій для LiFePo4 акумуляторів Перелік елементів	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Фесай В.М.		29.06		У	1	2
Перевірів		Панн О.В.				УжНУ, ІТФ, гр. ЕС		
Т. контр						2 курс		
Н/Контр. Затвердив		Панн О.В. Заяць Т.М.	 					

Додаток 1

Завідувачу кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ

к.ф. м.н. Залучь Тарас Михайлович

Студента (-ки) 4-го курсу
спеціальності 181 Електротехніка
Ресая В.М
(прізвище, ініціали)

ЗАЯВА

щодо самостійного виконання
навчальної/кваліфікаційної роботи здобувачем освіти

Я, Ресай Віктор Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові),

Студент(-ка) денна інженерно-технічна 4
(форма навчання, факультет, курс)

заявляю: моя письмова робота на тему: Інвентарний зареєстрований
проект для LiFePO₄ акумуляторів

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату.

Всі запозичення з друкованих та електронних джерел, а також із захищених раніше робіт мають відповідні посилання. Я ознайомлений(а) з діючим Положенням, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску навчальної/кваліфікаційної роботи до захисту та притягнення до академічної відповідальності.

24.06

Дата


Підпис



Автентифіковано засобом перевірки на плагіат ANTIPLA
Дата видачі: понеділок, 23 червня 2025, 09:54
Доступно через www.antip.la

Плагіатограма

Результат (відсоток плагіату)

0%

Назва документу

КБР-Фесай

Кількість символів

7,721

Кількість спеціальних символів

64

Кількість слів

971

Унікальна кількість слів

653

Кількість речень

84

Найпоширеніші слова

та, до, для, напруги, у

Найдовше слово

Температурно-кваліфіковане

Середня довжина слова

7.0

Середня кількість слів у реченні

11.6

Всього посилань

0

Кількість слів із плагіатом

0

23.06.2025

Alex Papp

(дата)

(перевірив)

Додаток 2.

ДОВІДКА
про результати перевірки на унікальність
кваліфікаційної, навчальної (курсової) роботи

Автор роботи	Рещій Віктор Ілліайнович
Назва роботи	Імпульсний зарядний пристрій для LiFePO ₄ акумуляторів
Спеціальність	171 Електроніка
Курс	4
Факультет	Інженерно-технічний
Кафедра	Електронних систем
Керівник роботи	Пант Олександр Вікторович
Роботу перевірено в програмі	Unicheck
Додано до бази даних	так
Ідентифікаційний номер роботи	
Результати перевірки	
Показник унікальності тексту через перевірку роботи у внутрішній базі кафедри ЕС ІТФ ДНВЗ УжНУ	0%
Показник унікальності тексту в мережі Інтернет	0%

Відповідальна особа/
Науковий керівник роботи

Пант Олександр Вікторович
(прізвище, ініціали)

23.06.2025

Дата

Пант

Підпис