

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної
техніки», за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

на тему: «Джерело безперебійного живлення апаратури зв'язку»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РЕ-з21

Зорін Артем Сергійович

Керівник

Проф., к.т.н.

Мовчанюк Андрій Валерійович

Рецензент

асист. каф. РІ

Ванділовський Борис Валерійович

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) __ Зорін Артем

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Зоріна Артема Сергійовича

1. Тема проєкту «Джерело безперебійного живлення апаратури зв'язку (проєкт)»

2. Керівник проєкту Мовчанюк Андрій Валерійович, затверджені наказом по університету від «__» травня 2026 р. №__

Строк подання студентом проєкту 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: Розробка джерела безперебійного живлення телекомунікаційного обладнання абонентів базового сегменту наземного зв'язку для роботи в умовах циклічних відключень електроенергії.

Специфікація входів/виходів:

Номер виходу	Тип роз'єму	Найменування входу/виходу	Номінал(струму, напруги)	Потужність
1	USB Type C	Вхід зарядного пристрою	20V 5A	100W PD 3.0
2	2,1 x 5.5 DC	Вихід 12В	12V 3A	36W для усіх виходів.
3	2,1 x 5.5 DC	Вихід 12В		
4	2,1 x 5.5 DC	Вихід 9В	9V 1A	
5	2,1 x 5.5 DC	Вихід 9В		
6	2,1 x 5.5 DC	Вихід 5В	5V 1A	

- Максимальна вихідна потужність - 36Вт.
- Автономність роботи від АКБ – не менше 7,5 годин в режимі навантаження 40% від максимального.
- Час заряджання до 80% не менше 2х годин.
- Індикація рівня заряду збірки батарей, та режиму швидкої зарядки.
- Холодний старт при комутації навантаження.

4. Зміст пояснювальної записки:

Огляд існуючих рішень, розробка та аналіз завдання на проєкт, розробка функціональної схеми та вибір компонентів, розробка схеми електричної принципової, розробка друкованої плати, розробка конструкторської документації, оформлення текстової та графічної документації

5. Перелік графічного матеріалу:

Складальний кресленик плати, складальний кресленик пристрою, презентація 10 сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.26-06.05.26	
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.26-10.05.26	
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.26-18.05.26	
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.26-23.05.26	
5	Розробка друкованої плати	24.05.26-29.05.26	
6	Розробка конструкторської документації	30.05.26-05.06.26	
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.26-08.06.26	

Студент

Керівник

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт складається з пояснювальної записки обсягом 50 сторінок, сформовану з використанням 15 джерел, додатків А, Б, та В.

У дипломному проєкті розроблено Джерело безперебійного живлення апаратури зв'язку, адаптованого для роботи в умовах циклічних відключень електроенергії..

У роботі наведено огляд існуючих рішень, виконано аналіз та обґрунтування технічних рішень, розроблено функціональну та електричну принципову схеми, а також підготовлено комплект конструкторської документації.

Розроблений пристрій розрахований на живлення від USB Type-C з використанням протоколу USB Power Delivery, з підтримкою PDO до 100Вт. Забезпечує вихідні напруги 12 В, 9 В та 5 В, для реалізації різних сценаріїв підключення периферії. В якості резервного джерела енергії використовується 5S2P LiFePO₄ акумуляторна батарея із системою BMS.

Ключові слова: джерело безперебійного живлення, USB Power Delivery, LiFePO₄, BMS, DC/DC-перетворювач, телекомунікаційне обладнання.

ABSTRACT

The diploma project consists of a 50-page explanatory report prepared using 15 references and including Appendices A, B, and C.

The project is devoted to the development of an uninterruptible power supply for communication equipment adapted for operation under conditions of cyclic power outages.

The work includes a review of existing solutions, analysis and justification of technical decisions, development of functional and electrical schematic diagrams, and preparation of design documentation.

The developed device is intended to be powered from a USB Type-C interface using the USB Power Delivery protocol with support for Power Data Objects (PDO) up to 100 W. The device provides output voltages of 12 V, 9 V, and 5 V for various peripheral connection scenarios. A 5S2P LiFePO₄ battery pack with a Battery Management System (BMS) is used as the backup power source.

Keywords: uninterruptible power supply, USB Power Delivery, LiFePO₄, BMS, DC/DC converter, telecommunication equipment.

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту

на тему: «Джерело безперебійного живлення апаратури зв'язку (проєкт)»

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	6
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	7
2 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТ	10
2.1 Аналіз архітектури джерел безперебійного живлення постійного струму	10
2.1.1 Батарейний блок	10
2.1.2 Архітектура та схемотехнічне рішення	16
3 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ	22
4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ..	27
4.1 USB-вхід та PD-Sink	27
4.2 Селектор вхідного тракту	31
4.3 Селектор джерела живлення (основної шини)	35
4.4 Основна шина	37
4.5 Управління та індикація	40
4.6 Вихідні перетворювачі	43
4.7 Зарядний перетворювач CC/CV	46
4.8 Boost-перетворювач 20 В	47
ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49
ДОДАТОК А Схема функціональна	
ДОДАТОК Б Схема електрична принципова	
ДОДАТОК В Перелік елементів	

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ			
Зм.	Арк..	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив		Зорін А.С			<i>Джерело безперебійного живлення апаратури зв'язку</i> <i>Пояснювальна записка.</i>	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Мовчанюк А.В					3	51
Н. Контр.						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>		
Затв..								

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКБ - акумуляторна батарея

ДБЖ - джерело безперебійного живлення

UPS - Uninterruptible Power Supply, джерело безперебійного живлення

VRLA - Valve Regulated Lead Acid, герметизована свинцево-кислотна акумуляторна батарея

AGM - Absorbed Glass Mat, свинцево-кислотна батарея зі скловолоконним сепаратором

GEL - гелева свинцево-кислотна батарея

LCO - Lithium Cobalt Oxide, літій-кобальт-оксидна хімія

LMO - Lithium Manganese Oxide, літій-марганцева хімія

NMC - Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, літій-нікель-марганець-кобальтова хімія

NCA Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide, літій-нікель-кобальт-алюмінієва хімія

LFP - Lithium Iron Phosphate, літій-залізо-фосфатна хімія

LTO - Lithium Titanate Oxide, літій-титанатна хімія

SEI - Solid Electrolyte Interphase, міжфазний твердий електролітний шар

USB - Universal Serial Bus, універсальна послідовна шина

PD - Power Delivery, протокол передачі потужності USB

PDO - Power Data Objects, об'єкти параметрів живлення

PPS - Programmable Power Supply, програмоване джерело живлення

APDO - Augmented Power Data Objects, розширені об'єкти параметрів живлення

VBUS - Voltage Bus, силова шина USB

CC - Configuration Channel, канал конфігурації USB Type-C

CC/CV - Constant Current / Constant Voltage, режим заряду постійним струмом та постійною напругою

MCU - Microcontroller Unit, мікроконтролер

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PWM - Pulse Width Modulation, широтно-імпульсна модуляція

ADC - Analog-to-Digital Converter, аналого-цифровий перетворювач

I²C - Inter-Integrated Circuit, двопровідний інтерфейс обміну даними

BMS - Battery Management System, система керування акумуляторною батареєю

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, польовий транзистор з ізольованим затвором

TVS - Transient Voltage Suppressor, діод захисту від імпульсних перенапруг

ESD - Electrostatic Discharge, електростатичний розряд

SMD - Surface Mount Device, компонент поверхневого монтажу

DIN - стандарт кріплення промислового обладнання

GPON - Gigabit Passive Optical Network, гігабітна пасивна оптична мережа

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В умовах віялових відключень надійний доступ до послуг фіксованого зв'язку широкими верствами населення ускладняється відсутністю доступного рішення здатного покрити циклічні режими роботи з відносно короткими періодами з

Дивлячись на проблему очима оператора наземного зв'язку можна відмітити наступну закономірність: Проблема безперебійного доступу до послуг на боці оператора вирішується масштабною перебудовою мережі під використання пасивних технологій, наприклад мережі Gigabit Passive Optical Network, та кваліфікованим системним впровадженням джерел безперебійного живлення, вузлів генерації, в тому числі з використанням джерел альтернативної енергії.

Натомість проблема безперебійного живлення телекомунікаційного обладнання на боці абонента наймасовішого базового сегменту лишається невирішеною в повній мірі.

Існуючі готові рішення часто не відповідають вимогам режимів роботи, самодостатності, виконанням, або ціною впровадження.

Рішення запропоноване в дипломному проєкті розраховане на роботу в циклічному режимі віялових відключень, та орієнтоване на масового користувача базового сегменту.

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Боксові джерела безперебійного живлення на прикладі BestEn UPS-1203-01-BOX



Рис 1.1– Типове боксове рішення для охоронних систем, та телекомунікацій
Складається з бокового корпусу, який опціонально має кріплення під DIN-рейку.
В корпусі розміщується зарядний пристрій. Та місце під розміщення 12-
Вольтових акумуляторних батарей у форм-факторі під ємність 7Ah-9Ah
Технічні характеристики:

<i>Вхідна робоча напруга</i>	<i>AC 160 – 265 В</i>
<i>Напруга виходу під час роботи від мережі 220В</i>	<i>13.8 В ±2%</i>
<i>Напруга виходу під час роботи від АКБ</i>	<i>Відповідає напрузі АКБ</i>
<i>Вихідний струм для підключення навантаження</i>	<i>3 А</i>
<i>Вихідна потужність</i>	<i>50 Вт (із зарядом акумулятора)</i>
<i>Кількість каналів навантаження</i>	<i>1</i>
<i>Індикація</i>	<i>LED</i>
<i>Ємність акумулятору</i>	<i>7Ah, 9 Ah</i>
<i>Струм заряду АКБ</i>	<i>650 мА (макс.)</i>
<i>Режим заряду АКБ</i>	<i>CC (constant charge)</i>
<i>Захист</i>	<i>Від перенапруги, КЗ, навантаження по струму, перезаряду/глибокого розряду АКБ</i>
<i>Матеріал корпусу</i>	<i>Пластик</i>
<i>Умови експлуатації</i>	<i>-20°C ~ +50°C, вологість 80% або менше</i>
<i>Габарити</i>	<i>228 x 195 x 78 мм</i>

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Плюси:

- Розрахований на тривалу роботу в буферному режимі.
- Останні ревізії плати мають збільшений струм для покращення показників роботи в циклічному режимі.
- Розроблений з урахуванням промислових вимог безпеки, має необхідні захисти.

Мінуси:

- Вартість впровадження.
- Відносна громіздкість.
- Стаціонарний монтаж, що не завжди задовільняє потреби користувачів базового сегменту.
- Відсутність виходів 9В, 5В для живлення медіаконвертера (вихід батареї комутується на лінію 12В).

Мобільні джерела безперебійного живлення (Mini UPS)
На прикладі Step4Net PU38W-51212



Рис 1.2– Портативне рішення для домашнього роутера

Являє собою мобільне джерело безперебійного живлення, не розраховане на роботу як в буферному режимі, так і в циклічному режимі. Має відносно багато

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

аналогів. Однак Конструктивно вони переважно спираються на використання збірки 4S літієвих акумуляторних батарей у формфакторі 18650, що обмежує час роботи в циклі розряду до 4...6-ти годин. Характерізуються відносно повільним часом заряду близько 3-х годин. Технічні характеристики

<i>Входное напряжение</i>	<i>12V 2A, коннектор IN:5.5*2.1mm</i>
<i>Выходное напряжение</i>	<i>USB 5B 2A; DC 12B 1A; 12B 1A; коннектор DC output 5.5*2.5mm</i>
<i>Мощность</i>	<i>38,5Вт/ч</i>
<i>Батарея</i>	<i>Li-ion</i>
<i>Емкость батареи</i>	<i>10500 mAh</i>
<i>Защита</i>	<i>от перезарядки и переразрядки, короткого замыкания</i>
<i>Рабочая температура</i>	<i>20°C~65°C</i>
<i>Размеры</i>	<i>116x73x24 мм</i>

Плюси:

- Мобільне рішення, не потребує кваліфікованого впровадження
- Має необхідний набір вихідних напруг, для підключення периферійних пристроїв.
- Робота від зовнішніх джерел живлення

Мінуси:

- Переважно незадовільна ємність вбудованого батарейного блоку.
- Переважно низька швидкість заряду.
- Не розрахований на роботу в буферному режимі. Часто немає відповідних сертифікацій

Висновок: Стаціонарні дбж - з точки зору характеристик зарядного пристрою, та джерела безперебійного живлення – виріб підходить вимогам технічного завдання, однак рішення розрахована на стаціонарне використання, та монтаж кваліфікованими спеціалістами. Мобільні дбж – не розраховані на роботу в буферному режимі.

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ НА ПРОЄКТ

2.1 Аналіз архітектури джерел безперебійного живлення постійного струму.

Визначення технічного рішення передбачає опрацювання наступних розділів:

- Батарейний блок
- Архітектура (схемотехнічне рішення).

Робота з кожним наступним розділом проводиться з оглядом пріоритетного рішення обраного у попередньому розділі.

В кінці аналізу формується підсумок, який визначає концепцію та конкретизовані функціональні рішення.

2.1.1 Батарейний блок.

Відповідно до джерел та рекомендації. Найбільш актуальними для застосування в аплікаціях джерел безперебійного живлення, як побутових, так і спеціалізованих в сфері телекомунікацій, станом на зараз є наступні типи батарей: VRLA: LiFePo₄

VRLA (Valve Regulated Lead Acid) – клас свинцево-кислотних герметичних батарей, які не передбачають обслуговування, та призначені для роботи в різних положеннях. Що досягається відмовою від застосування електроліту у рідкому стані.

Поділяються на два підкласи:

AGM (Absorbed Glass Mat) – в таких батареях електроліт є пропиткою спеціальних скловолоконних матів, розміщених безпосередньо між пластинами.

GEL (Гелеві) – в таких батареях електроліт загущений до стану гелю за допомогою додавання з'єднань кремнію.

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

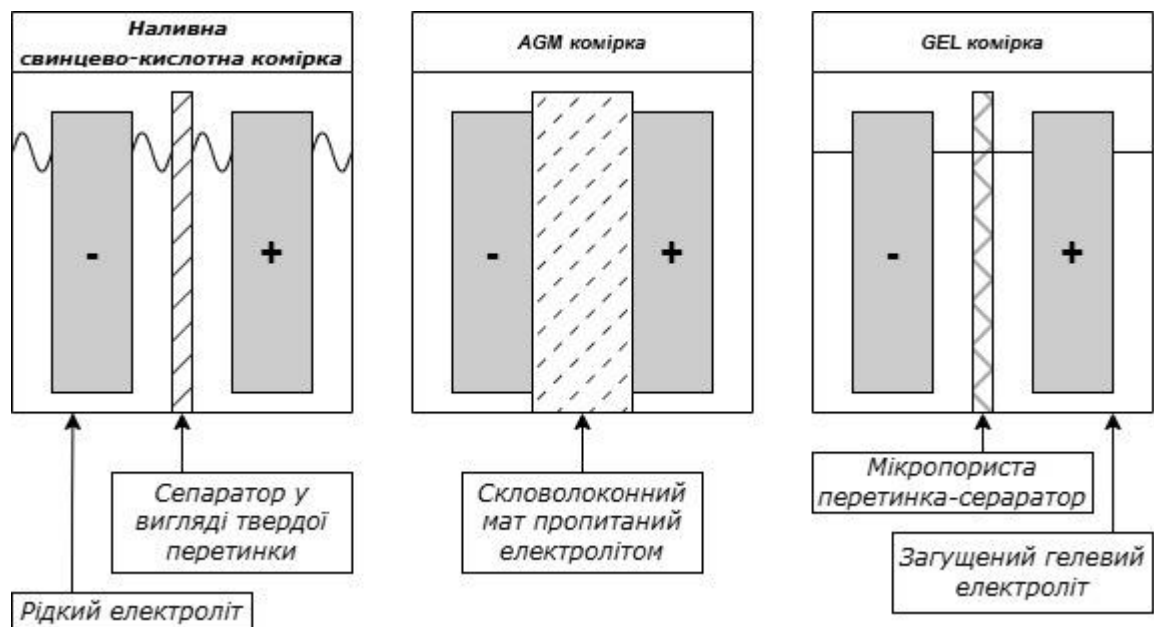


Рис 2.1 – порівняння конструкцій комірок свинцево-кислотних батарей.

AGM/GEL батареї – є подальшим розвитком мокрих свинцево-кислотних батарей, та їх адаптацією для роботи в системах UPS, спрощення вимог до обслуговування, та транспортування.

Переваги AGM/GEL:

- Кінцевий виріб відносно недорогий у виробництві, звідси низька вартість ват-години ємності.
- Низький саморозряд, найнижчий серед розглянутих технологій.
- Відмінний термін служби у зарядженому (черговому) режимі, якісні зразки працюють 10-15 років.
- Широкий діапазон робочих температур від -15°C до 50°C для AGM, та від -20°C до 55°C GEL варіантів.

Недоліки:

- Низька питома енергія, погане співвідношення ваги до енергії $40\text{-}50 \text{ Вт}\cdot\text{год}/\text{кг}$
- Довгий цикл зарядки, найдовший серед розглянутих технологій 5-7 годин, цикл зарядки передбачає проміжний етап насичення між етапами постійного струму, та постійної напруги.

- Погано працюють в циклічному режимі. Якісні зразки надають близько 500 циклів заряд-розряд. Глибокий розряд <50% сильно скорочує циклічний ресурс.

Li-Ion - сучасне, необслуговуване джерело живлення, що працює на переміщенні іонів літія між електродами. Поділяється на наступні підкласи(хімії):

LCO (LiCoO₂) - Складається з катода з оксиду кобальту, та вуглецевого анода.

Характеризується високою питомою енергією 150-200 Вт·год/кг, підтримує струми заряду та розряду до 1С. Однак має відносно низьку температурну стабільність (поріг теплового розгону ~ 150°C), та циклічний ресурс в межах 500-1000 циклів, залежно від температурного режиму, який в свою чергу сильно залежить від струмів заряду-розряду, та глибини розряду. Є ранньою версією розвитку літій-іонних акумуляторів, станом на зараз вважається застарілою, та неактуальною, однак все ще обмежено представлена на ринку.

LMO (LiMn₂O₄) - Використовує літій марганець в якості катодного матеріалу.

Графіт в якості аноду. Архітектура замість пластин утворює тривимірну структуру (шпінель), яка покращує потік іонів на електроді, та зменшує внутрішній опір, відповідно виділення надлишкового тепла при заряді/розряді.

Має дещо нижню питому ємність 100–150 Вт·год/кг. Високий зарядний струм (до 3С), та надзвичайно високий розрядний струм (короткочасно до 10С).

Поріг теплового розгону вище ~250°C. Однак має малий циклічний ресурс: 300-700 циклів заряд-розряд. Станом на зараз вважається застарілим, однак все ще широко представлений на ринку через свою тягову специфіку, та відносно помірну вартість.

NMC (LiNiMnCoO₂) – Комбінований катод виконується з нікель-марганець-кобальту. Анод виконується з графіту. Має комерційно орієнтовані хімічні адаптації (NCM, CMN, MNC, MCN) з різними комбінаціями домішок. Вважається вдалим, збалансованим розвитком двох попередніх хімії. Питома енергія 150-220 Вт·год/кг. Життєвий цикл 1000–2000 циклів заряду-розряду.

Зарядний струм до 1С, розрядний струм до 2С. Поріг теплового розгону ~210 °C

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окремою ланкою розвитку NMC – можна виділити NCA хімію (LiNiCoAlO_2) – спеціалізоване рішення, яке застосовує літій-нікель-кобальто-алюмооксидний катод, передбачає збільшення питомої енергії до 300 Вт, та збільшену кількість циклів заряду-розряду. Однак дорожчі, та менш стабільні по температурі.

Поріг теплового розгону $\sim 150^\circ\text{C}$.

NMC підвид - актуальний, та широко представлений на ринку. Використовується як в портативній техніці, так і в тяговому виконанні.



Рис 2.2 – NCA акумуляторні комірки 18650 фірми Panasonic, демонтовані з батарейного блоку електромобіля TESLA Model S

LFP (LiFePO_4) – використовує фосфатний катодний матеріал. Серед переваг цієї хімії можна виділити тривалий термін служби >2000 циклів заряду-розряду - що обумовлено стійкістю до глибокого розряду, хорошу температурну стабільність (тепловий розгін починається від 270°C) хімічні процеси при цьому не передбачають активного горіння, відмінна стійкість до умов повного заряду, що у поєднанні з робочими напругами 2,5...3,6В, та попередньо переліченими факторами – робить їх хорошим вибором для заміни VRLA в потужних ДБЖ, зокрема у сфері телекомунікацій. Серед недоліків можна виділити підвищений саморозряд, що ускладнює схеми балансування, та створює проблеми зі зберіганням (деякі комерційні батарейні модулі передбачають обов'язкове заряджання виробу кожні 6 місяців в рамках гарантійних зобов'язань.).

Також можна відмітити відносно низьку питому ємність (90-120 Вт·год/кг).

Та погану роботу на заряд при температурах середовища - наближених до нуля (при $T_{\text{зовн.}} < 0$ – комірки не беруть заряд взагалі).

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



Рис 2.3 – батарейні модулі 48В,100А/год ZXESM R321 фірми ZTE встановлені на вузлі зв'язку одного з комерційних операторів України. В нових ревізіях виробник застосовує примусовий підігрів акумуляторних комірок за умови роботи на заряд при температурах середовища наближених до нуля, та нижче нуля.

Широко доступні на ринку, поширені в сучасних аплікаціях електротранспорту, Вважаються відносно дорогими, однак спостерігається стійка тенденція до зниження вартості, що прямує до рівня NMC

LTO (Li_2TiO_3) - використовує NMC варіації катода зі структурою шпінелі, однак графітовий анод замінюється на літій-титанатовий. Для LTO властиві високі струми заряду (до 5C), та надзвичайно високі струми розряду (до 10C). Велику кількість циклів заряду розряду 3000-7000, хорошу температурну стабільність (збереження ємності до 80% при -30°C). Висока безпека, не підданий тепловому розгону. Вирішальним мінусом є висока вартість кВт·години ємності (~3 рази дорожче LFP), яка до того ж не має стійкої тенденції до зниження, що значно звужує сферу застосування до вузькоспеціалізованих аплікацій. Додатковим мінусом є відносно низька питома енергія 50–80 Вт·год/кг

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Підсумок: Проаналізувавши завдання, розглянувши поширені типи комірок, придатні для використання в джерелах безперебійного живлення, оцінивши їхні переваги та недоліки - для подальшої розробки обираємо Літій-іонні комірки з **LFP (LiFePo4)** хімією.

Обґрунтування:

Специфікою завдання, а саме вимогою циклічної роботи в режимі 2 години заряду, 7,5 годин розряду – передбачається вибір хімії з високим ресурсом на заряд-розряд. Найбільш придатним варіантом є LTO хімія – однак її вкрай висока вартість робить його сумнівним вибором для впровадження серед базового сегменту наземного зв'язку, що обумовлено завданням.

Наступною ланкою є вибір між NMC, та LFP – які мають співставні характеристики.

LFP – має більше циклів заряд/розряд

NMC – має більшу питому енергію.

Однак, механізми старіння в них відрізняються. Для NMC – притаманний більш різкий ріст SEI в циклічному режимі. Руйнування катода при роботі в буферному режимі з високим рівнем заряду, що прямо не передбачено завданням, однак може бути реальним кейсом використання. Ріст SEI – призводить до збільшення внутрішнього опору комірки, та збільшеного виділення тепла на ній, що підвищує ризик температурного розгону, який майже не притаманний LFP хімії.

Враховуючи вимоги по режимам заряду/розряду проведемо приблизний розрахунок деградації акумулятора використовуючи

Напівемпіричну модель втрати ємності. Semi-Empirical Capacity Fade Model:

$$Q_{\text{втрат}} = 40\% \cdot 36\text{Вт} = 14,4 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{вих}} = 40\% \cdot 36\text{Вт} = 14,4 \text{ Вт}$$

$$W_{\text{бат}} = \frac{14,4\text{Вт} \cdot 7,5\text{год}}{90\% \text{ ККД}} = 120 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1.2 Архітектура та схемотехнічне рішення

Вимоги завдання передбачають вибір для задоволення потреб користувачів базового сегменту. Тому під час огляду, аналізу та вибору технічних рішень ми будемо орієнтуватись на здешевлення кінцевого виробу. Наприклад за можливості ми спробуємо обійтись без MCU (Microprocessor Unit), та реалізувати виріб з використанням жорсткої логік для селекції джерел живлення, управління режимами роботи, та індикації.

Вхід виробу передбачено виконати з використання USB type-C , з підтримкою режимів роботи протоколів Power Delivery до 100 Вт.

USB Power Delivery – це стандарт, який дозволяє двом пристроям автоматично узгодити напругу, та струм живлення, які будуть надаватись через USB інтерфейс, залежно від потреб споживача, та можливостей джерела.

Стандарт передбачає декілька поколінь специфікації:

USB Power Delivery 1.0 – перша версія стандарту, що з'явилась до стандартизації USB type-C. Тому описана для виконання стандартних кабелів Type A/Type B, та роз'ємів: USB Type A, USB Type B, Micro USB.

Перша версія передбачає використання фіксованих профілів напруги та струму:

Профіль	Напруга(макс)	Струм(макс)	Потужність(макс)
Profile 1	5В	2А	10 Wm
Profile 2	5В / 12В	2А / 1.5А	18 Wm
Profile 3	5В / 12В	2А / 3А	36 Wm
Profile 4	5В / 12В / 20В	2А / 3А / 3А	60 Wm
Profile 5	5В / 12В / 20В	2А / 5А / 5А	100 Wm

Таблиця.1 – порівняння профілів USB PD 1.0

Серед особливостей специфікації можемо виділити:

- Використання силової шини **V_{BUS}** для обміну інформацією про профілі живлення.
- Концепція двосторонньої передачі енергії. Кожен з пристроїв у парі міг виступати як джерелом (Source), так і споживачем (Sink)

USB Power Delivery 2.0 – друга версія стандарту розрахована в першу чергу на використання з новим на той час роз’ємом USB Type C. Для комунікації стосовно режиму роботи PD – на роз’ємі вводиться новий пін CC(Configuration Channel) відокремлений від силової шини VBUS. Фіксовані профілі замінюються на Power Data Objects. Концепція що передбачає алгоритм узгодженні параметрів живлення між джерелом та споживачем. Джерело подає базову напругу 5В, та список доступних параметрів напруги та струму. Споживач надсилає джерелу бажаний профіль із доступних. Джерело змінює вхідну напругу на VBUS відповідно запиту споживача. Концепція PDO дозволяє більш гнучко обирати потужність, за рахунок доступності варіативного запиту струму.

<i>Потужність джерела</i>	<i>Комбінації напруги та струму (PDO)</i>
<i>від 0.5 Вт до 15 Вт</i>	<i>5 В від 0.1 А до 3.0 А</i>
<i>від 15 Вт до 27 Вт</i>	<i>5 В до 3.0 А</i>
	<i>9 В струм від 1.67 А до 3.0 А</i>
<i>від 27 Вт до 45 Вт</i>	<i>5 В до 3.0 А</i>
	<i>9 В до 3.0 А</i>
	<i>15 В струм від 1.8 А до 3.0 А</i>
<i>від 45 Вт до 60 Вт</i>	<i>5 В до 3.0 А</i>
	<i>9 В до 3.0 А</i>
	<i>15 В до 3.0 А</i>
	<i>20 В струм від 2.25 А до 3.0 А</i>
<i>від 60 Вт до 100 Вт</i>	<i>5 В до 3.0 А</i>
	<i>9 В до 3.0 А</i>
	<i>15 В до 3.0 А</i>
	<i>20 В струм від 3.0 А до 5.0 А</i>

Таблиця.2 – порівняння PDO USB PD 2.0

USB Power Delivery 3.0 – є подальшим розвитком другої версії протоколу. Концепція PDO замінюється концепцією PPS (Programable Power Supply)

Ключовою особливістю якої є можливість гнучкого вибору джерелом напруги (з кроком 20 мВ), та струму (з кроком 50 мВ) - в межах запропонованих джерелом профілів APDO (Augmented Power Delivery Objects).

$$3.3\text{В} \leq V_{\text{apps}} \leq 21\text{В}$$

Серед додаткових нововведень можна відмітити розширення доступних службових повідомлень для можливості обміну телеметрією, та ідентифікаційною інформацією про виріб.

USB Power Delivery 3.1 – еволюційний розвиток PD 3.0, основним введенням є збільшення максимальної потужності на інтерфейсі до 240 Вт, що передбачає використання додаткових фіксованих напруг 28,36, та 48 В. Специфікації Power Delivery передбачають зворотню сумісність до першої версії. PD2.0 не сумісний з PD1.0, оскільки використовує інший спосіб обміну інформацією на фізичному рівні.

Враховуючи отримані в завданні данні, та концепцію можливої відмови від MCU – раціональним рішенням буде реалізація вибору фіксованих профілів напруги та струму за спадаючим пріоритетом переданої потужності. Це необхідно для сумісності з широким списком користувацьких пристроїв відповідно до специфікації Power Delivery 2.0. Підтримка специфікацій з версій 3.0, 3.1 – допустима, але не є пріоритетом.

Окрім чотирьох доступних вхідних напруг 5В, або 9В, або 12В, або 20В - виходи виробу передбачено виконати з постійно доступним до використання варіантів 5В, 9В, 12В. Також оскільки ми вибрали LFP акумулятори в якості резервного джерела енергії – слід враховувати, що під час циклу заряду комірок, та під час їхнього розряду в системі з'являється додаткове джерело, що працює в діапазоні робочих напруг послідовно з'єднаних комірок.

Для їхньої гармонізації, та їх комутації в різних режимах роботи архітектура пристрою передбачає ряд перетворень.

На етапі розгляду архітектури раціональним буде відмовитись від лінійних перетворень. Оскільки вони передбачають лише пониження напруги, та занадто велике розсіювання енергії в тепло.

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянемо основні архітектури схемотехнічних рішень для побудови низьковольтних ДБЖ.

Буферна архітектура (Buffer Type) – найпростіший з точки зору реалізації варіант. Передбачає наявність вхідного перетворювача який одночасно виконує функцію зарядного контуру для акумуляторної батареї. Та формує напругу основної шини, що варіюється залежно від рівня заряду батареї, та рівня просадки її напруги під навантаженням. Основна шина є джерелом напруги для вихідних перетворювачів, та внутрішніх ланцюгів живлення пристрою. Батарея підключається безпосередньо до шини, та слугує постійно доступним буфером енергії.

Режим роботи від мережі – передбачає заряд батареї постійним струмом, або постійною напругою, надлишок доступної на шині потужності використовується вихідними перетворювачами для живлення цільового обладнання.

Режим роботи від батареї – передбачає розряд батареї, та віддачу енергії вихідним перетворювачам.

Переваги буферної архітектури:

- Мінімальна кількість перетворень, як наслідок відносно високий ККД системи в цілому.
- Миттєвий перехід між режимами роботи основного, та резервного живлення.

Завдяки відсутності комутації джерел.

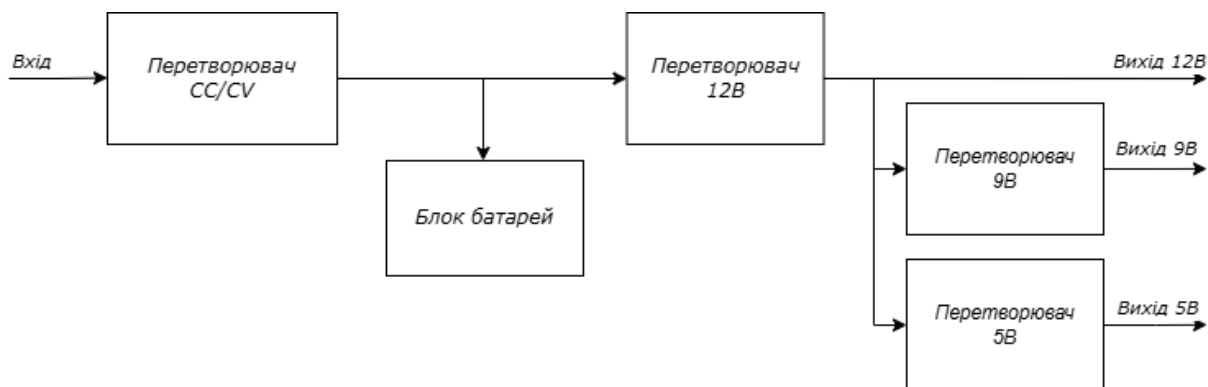


Рис 2.1 – Адаптоване до завдання проекту рішення з використанням буферної архітектури

Недоліком системи в контексті поставленої задачі є принципова відсутність розподілу потужностей між блоком акумуляторів, та вихідними перетворювачами. При роботі пристрою від PDO USB PowerDelivery < 60Вт. Може виникнути ситуація, за якою вся доступна потужність на шині буде спожита зарядом батареї. Вихідні перетворювачі при цьому не зможуть забезпечити стабільну роботу навантаження. Цей аспект робить буферну архітектуру не релевантною для застосування в нашому проекті.

Лінійно-інтерактивна архітектура (Off-Line) – використовує транзисторний ключ для чіткого розділення основного, та допоміжного джерел живлення. Що дозволяє реалізувати пріоретизацію доступної потужності шляхом використання окремого від основної шини перетворювача для заряду батареєю. Він може бути або малопотужним, або бути регульованим по струму споживання. Натомість основна шина лишається заживленою у всіх режимах роботи.

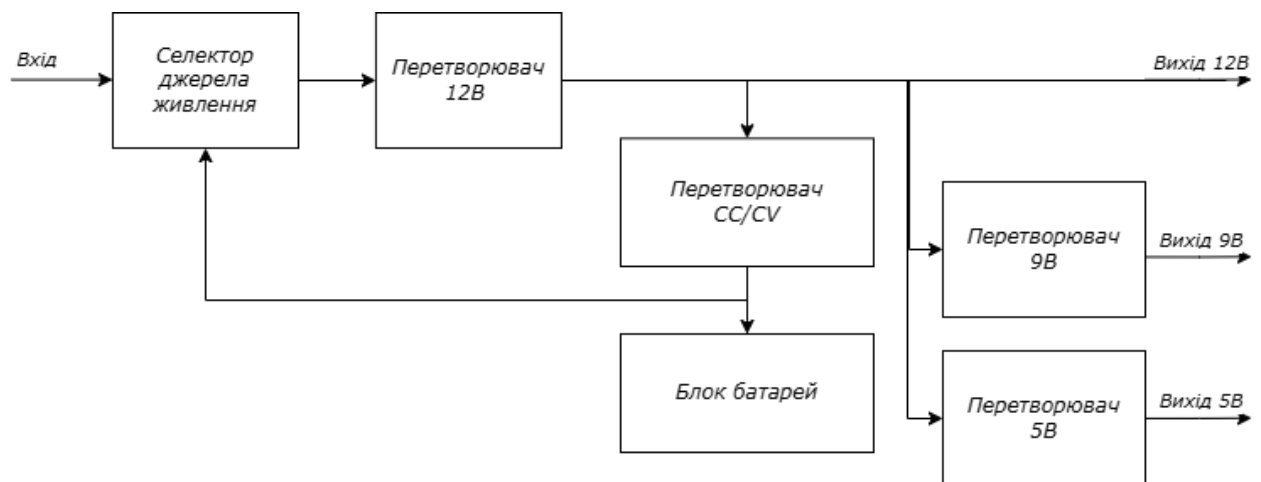


Рис 2.2 – Адаптоване до завдання проєкту рішення з використанням лінійно-інтерактивної архітектури.

Режим роботи від батареї – передбачає комутацію Перетворювача 12В селектором джерела живлення на вхід пристрою.

Перетворювач 12В формує основну силову шину напругою 12В яка одночасно є одним з виходів номіналом 12В, вибір номіналу шини дозволяє уникнути додаткового перетворення. Блок акумуляторних батарей перебуває

в режимі заряду постійним струмом, або постійною напругою від зарядного контуру, який в свою чергу заживлений від основної силової шини.

Потужність віддана на заряд батареї контролюється за пріоритетом виходів:

$$P_{CC/CV} = P_{\text{входу}} - P_{\text{втрат}} - (P_{\text{вих12В}} + P_{\text{вих9В}} + P_{\text{вих5В}})$$

де, $P_{\text{втрат}}$ - включає закладені втрати потужності на перетворювачі 12В+ закладені втрати потужності на внутрішні потреби.

Режим роботи від батареї – передбачає комутацію селектором основної шини на вихід блоку акумуляторної батареї, зарядний вузол виключається з роботи, напруга на шині вирівнюється з напругою на виході батареї.

Можливість реалізувати пріоритет напруги для виходу робить наведену архітектуру придатною до використання у проєкті. Додатковою перевагою є збереження мінімальної кількості перетворень, що здешевлює кінцевий виріб. Серед недоліків можна відзначити ненульовий час перемикання між режимами роботи, однак він не є вирішальним в нашому кейсі.

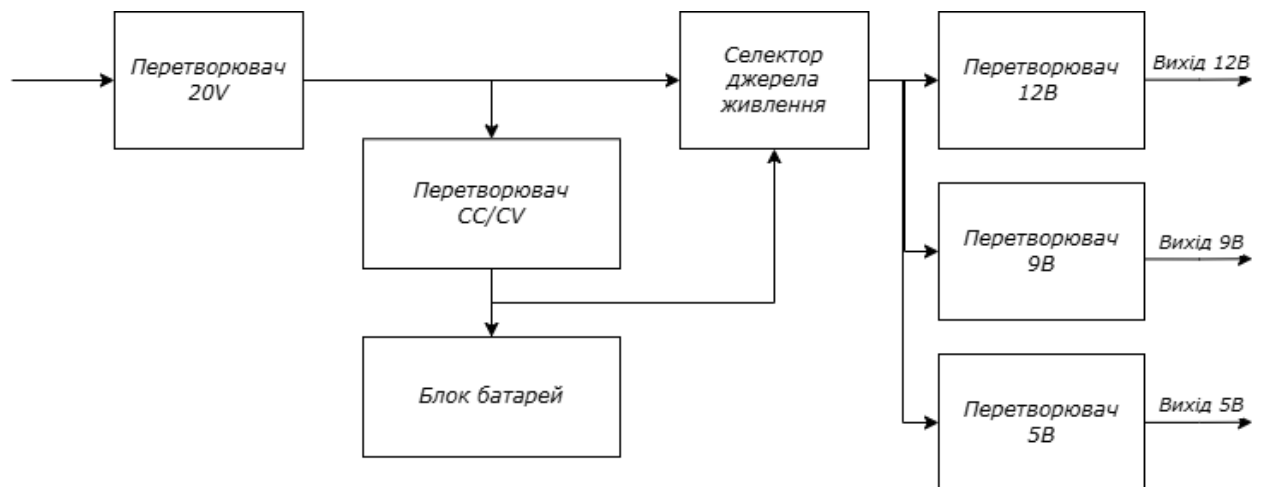


Рис 2.3 – Адаптоване до завдання проєкту рішення з використанням Архітектури з подвійним перетворенням

Адаптований до завдання варіант передбачає наявність незалежної від стану входу силової шини напругою 20Вольт, що робить архітектуру подібною до **Архітектури з подвійним перетворенням (Double Conversion)**.

3. РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА ВИБІР КОМПОНЕНТІВ

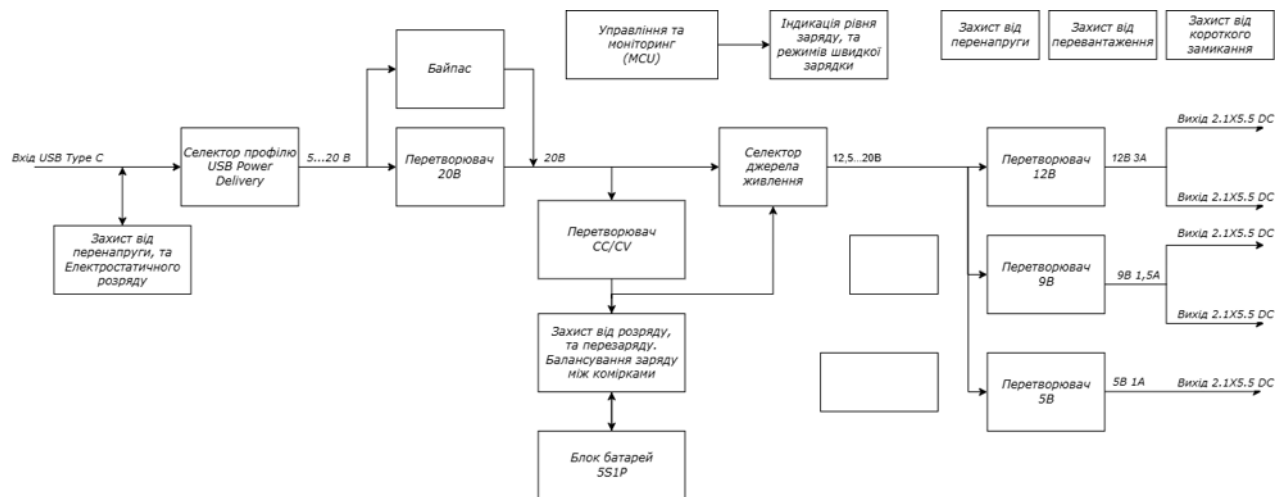


Рис 3.1– Архітектура обраного пристрою

Варіант зі спільною шиною 20 Вольт Використовує 5 перетворювачів.

Така архітектура виглядає найбільш привабливою з декількох причин.

Основний перетворювач 5,9,12...20В використовує лише boost-перетворення, що спрощує його схемотехніку, та робить пристрій більш дешевим.

При роботі від профілів 45, 65,100W – що передбачено основними режимами роботи. Напруга на вході пристрою буде 20В – що дозволяє реалізувати обхідний контур, та подавати живлення прямо зі входу на основну шину. Обхідний контур дозволяє уникнути додаткового перетворення, тим самим:

- Збільшити коефіцієнт корисної дії зарядного контуру.
- Звідси зменшити виділення тепла на основних режимах роботи.
- Використовувати дешевшу елементарну базу для перетворювача, оскільки в найбільш навантажених по потужності режимах – Перетворювач не використовується. Блок батарей в такому разі доцільно буде виконати в конфігурації 5S Базовий розрахунок:

Середня споживана потужність:

$$P_{avg} = 36 \cdot 0,4 = 14,4 \text{ Вт}$$

Енергія навантаження:

$$E_l = 14,4 \cdot 7,5 = 108 \text{ Вт год}$$

Ємність батарей:

$$E_b = \frac{108}{0,9 \cdot 0,97} \cdot 1,1 = 135 \text{ Вт год}$$

Енергія комірки

$$E_{cell} = 3,2 \cdot 6 = 19,2 \text{ Вт год}$$

Номінальна напруга батареї

$$U_{bat} = 5 \cdot 3,2 = 16 \text{ В}$$

Ємність батареї

$$C_b = 2 \cdot 6 = 12 \text{ А} \times \text{год.}$$

Повна енергія батареї

$$E_{total} = 16 \cdot 12 = 192 \text{ А} \times \text{год.}$$

Час автономної роботи

$$t = \frac{192 \cdot 0,9 \cdot 0,97}{14,4} = 11,6 \text{ год.}$$

Заряд, при 80%

$$Q_{80} = 0,8 \cdot 12 = 9,6 \text{ А} \times \text{год.}$$

Необхідний середній струм заряду

$$I_{charge} = \frac{9,6}{2} = 4,8 \text{ А}$$

Швидкість заряду

$$C_{rate} = \frac{I_c}{C_b} = 0,4 \text{ С}$$

Потужність зарядки

$$P_{charge} = 18,25 \cdot 4,8 = 87,6 \text{ Вт,}$$

Необхідна вхідна потужність з урахуванням ККД

$$P_{in} = \frac{87,6 \text{ Вт}}{0,9} \approx 97,3 \text{ Вт}$$

Перетворювач CC/CV – зарядний пристрій для батарей в такому випадку працюватиме в режимі виключно step-down, в діапазоні напруг 12,5-18,25В. Що дає нам співвідношення струмів до/після перетворення менше ніж 1:2, Що є доволі непоганим результатом з точки зору теплових втрат на MOSFET-ключах. Формування вихідних напруг здійснюється з використанням step-down перетворювачів, що також робить елементарну базу більш доступною.

Обираємо **XL4015**, як надзвичайно дешеве й доступне рішення.

Робочий діапазон напруг:

- від 12,5В + падіння на MOSFET-ах BMS.
- до 18,25В + падіння на MOSFET-ах BMS. Після чого контур переходить в режим CV. Зарядний струм регулюється втручанням в контур зворотнього зв'язку керуючим сигналом від MCU.

Зарядна напруга встановлена до верхнього порогу стаціонарно, дільником напруги на схемі.

Обов'язковим додатком до схеми буде використання вузла **BMS Battery Management System**. Для захисту комірок від надмірного розряду, та перезаряду. Додатковим функціоналом вузла буде балансування заряду між комірками. Використовуємо готовий менеджер батареї **BQ77915**, в конфігурації підключення 5S. Схема підключення – типова з Datasheet.

Шина 20В – основна шина пристрою.

Напруга під час роботи від USB – 20В Формується Первинним перетворювачем, або зарядним пристроєм, в разі наявності доступного профілю 20В.

Напруга під час роботи від батареї = напрузі батарейного блоку – (падіння напруги на ключах BMS+Падіння напруги на ключах селектора джерела живлення)

Селектор джерела живлення обирає джерело напруги для основної шини 20В. Між шиною 20В сформованою основним перетворювачем 20В, та напругою на батареї. Вибір між джерелами виконується спрацюванням власної логіки селектора, додатково формується логічний сигнал на MCU – про перехід

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на живлення від батареї. Шина 20В є джерелом додаткових напруг 5В для заживлення MCU, та індикації приладу. Ці напруги формуються лінійними перетворювачами. Селектор виконуємо на аналоговій логіці з використанням компаратора LM393.

Перетворювач 12В – є джерелом вихідної напруги 12В. Працює в режимі STEP-DOWN перетворення зі співвідношенням $< 1:2$ для всіх режимів роботи. Передбачається, що є джерелом живлення телекомунікаційного обладнання у більшості випадків. Запуск перетворювача відбувається фізичним підключенням роз'єму споживача у відповідний джек, та замиканням на ньому сигнального контакту, підтяжка до землі.

Перетворювач 9В – є джерелом напруги 9В. Працює в режимі STEP-DOWN перетворення з коефіцієнтом трансформації ~ 2 від мережі, та від повністю зарядженої батареї, та з коефіцієнтом трансформації $< 1,5$ на нижньому порозі заряду батареї.

Перетворювач 5В – є джерелом напруги 5В. Працює в режимі STEP-DOWN перетворення з коефіцієнтом трансформації від 4 до 2,5 залежно від стану шини. Запуск перетворювача відбувається фізичним підключенням роз'єму споживача у відповідний джек, та замиканням на ньому сигнального контакту, підтяжка до землі.

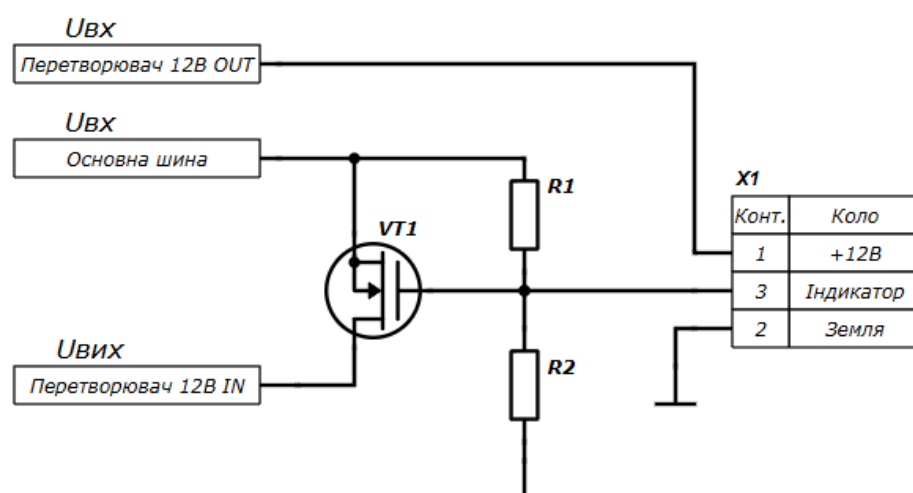


Рис 3.2 – Ланка активації вихідних перетворювачів

Основний перетворювач 20В – запускається при наявності відповідного сигналу від селектора USB PowerDelivery.

Обираємо Boost контролер **LM3478** – як доступне і просте рішення.

Байпас – обхідний контур перетворювача 20В, запускається за доступністю напруги 20В на вході пристрою, та шунтує перетворювач LM3478.

Селектор профілю USB PowerDelivery - вмикається за наявності напруги на вході пристрою 5...20В, опитує зарядний пристрій на предмет доступних протоколів PowerDelivery, та обирає найбільш потужний з доступних.

Повідомляє MCU про обраний профіль. В разі задіяння профілів з напругою 20В – формує керуючий сигнал, який шунтує перетворювач 20В, та вимикає його. Обираємо мікросхему **HUSB238**, як мінімалістичне та доступне рішення. Має перед установку пріоритетного профілю заряду, та інтерфейс I2C, для підключення до MCU.

MCU – обираємо доступне рішення **PIC12F1822** – вибір обумовлений мінімальною достатністю. Наявністю PWM модуля – для контролю зарядного струму перетворювача CC/CV, ADC – для індикацію струму споживання основною шиною 20В. Також контролер має I2C інтерфейс для зв'язку з HUSB238. Принцип керування обмеженням струму заряду батареї:

$$I_{\text{заряду}} = \frac{P_{\text{профілю_PowerDelivery}}}{20\text{В}} \times K_{\text{перетворення}} - I_{\text{споживання шини}}$$

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

4. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ

4.1 USB вхід, та PD-Sink

Вхідна група складається з типової схеми включення HUSB238, описаної виробником, модифікованої додаванням запобіжника F1, та TVS-діода VD1.

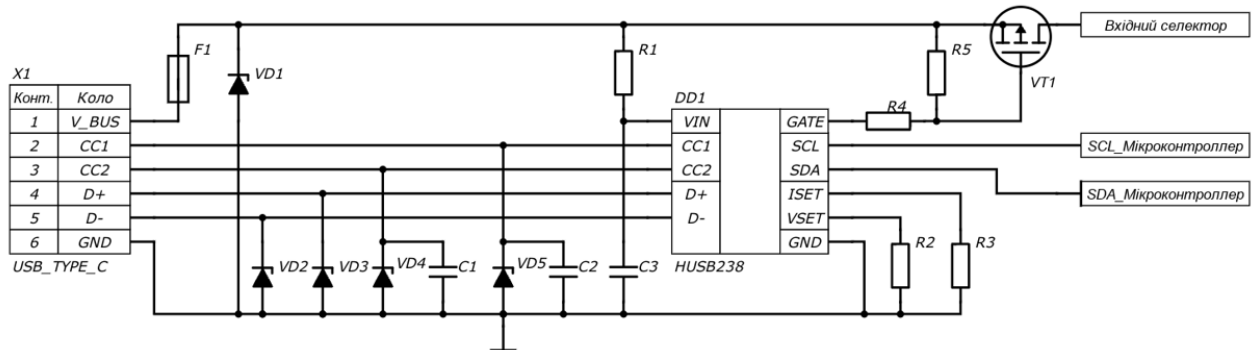


Рис 4.1– вхідна розв'язка

Підбір TVS-діодів VD1,VD2,VD3 ,VD4,VD5 виконуємо відповідно до вимог електромагнітної сумісності ДСТУ EN 61000-4-2, вимогам [2,3,4], та рекомендаціям *Texas Instruments: ESD and Surge Protection for USB Interfaces*

VD1 – Захист шини V_BUS від електростатичного розряду, перенапруги, та зворотної полярності обираємо односторонній TVS діод **SMAJ22A** керуючись максимальною робочою напругою $V_{BUS}(MAX) = 20\text{ В}$, та максимально допустимою напругою входу для HUSB238 $V_{in}(MAX) = 30\text{ В}$

Ключові параметри:

$V_{RWM} = 22\text{ В}$ – максимальна робоча напруга.

$V_{BR} = 24,4...26,9\text{ В}$ – напруга лавинного пробоя.

$P_{PK} = 400\text{ Вт}$ – Мінімальна пікова потужність розсіювання (1мс).

$T_j = -50...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ - діапазон робочих температур.

Корпус - DO-214AC.

VD4, VD5 - Захист шини Configuration Channel від перенапруги, та електростатичного розряду. Обираємо за умовою $V_{RWM} > V_{BUS}(MAX)$, та двостороннє виконання діода - оскільки існує ймовірність механічної комутації піна V_BUS на CC1/CC2 при розхитуванні роз'єма USB Type C. Можемо

використати TWS-діод **SMF20CA**, з напругою пробією меншою за максимальну напругу CC1/CC2 входів для HUSB238 $V_{cc}(MAX) = 25\text{ В}$

Ключові параметри:

$$V_{RWM} = 20\text{ В}$$

$$V_{BR} = 22,2...24,5\text{ В}$$

$$P_{PK} = 200\text{ Вт}$$

$$T_J = -50...150\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Корпус - SOD-123

VD2, VD3 - захист шини даних D+, D- від електростатичного розряду.

Додатковою вимогою відповідно до специфікацій USB – буде низька ємність p-n переходу $C_d < 1\text{ пФ}$. Обираємо двосторонній діод **PESD5V0S1BSF**

За умови $V_{BR} < 12\text{ В}$ - максимальна напруга входів D+/D- для HUSB238

Ключові параметри:

$$V_{RWM} = 5,5\text{ В}$$

$$V_{BR} = 6...10\text{ В}$$

$$C_d = 0,4...0,55\text{ пФ}$$

$$T_J = -40...150\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Корпус - SOD882

F1 – використовуємо запобіжник для захисту від короткого замикання шини V_BUS. Більш функціональним рішенням було б обрати запобіжник відновлювальний з позитивним температурним коефіцієнтом (PPTC), однак така категорія запобіжників не підходить через надмірну температурну чутливість до навколишнього середовища (Підвищення робочої температури на 30°C може зменшити робочий струм вдвічі), оскільки постійна робота в буферному режимі може спричинити накопичення надлишкового тепла в середині пристрою, а циклічна робота на заряд може спричинити локальний нагрів USB роз'єма, тепло від якого по друкованій платі може передаватись на

					<i>PE321.464419. 001 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонент (очікується розміщення запобіжник безпосередньо біля роз'єму. Номінал обираємо відповідно до емпіричного коефіцієнту запасу 1,25.

$$I_B \geq I_H \times 1,25 = 5 \text{ A} \times 1,25 = 6,25 \text{ A}$$

Обираємо найближчий-більший за номіналом одноразовий SMD запобіжник **SF-1206S700-2** в корпусі 1206, який відноситься до класу SlowBlow – оскільки повільні запобіжники вважаються більш витривалими в циклічних режимах навантаження. Ключові параметри:

$$I_R = 7 \text{ A} - \text{номінал по струму}$$

$$R_{T=25^\circ\text{C}} = 0.007 \text{ Ом} - \text{опір}$$

$$I^2t = 5.684 \text{ A}^2\text{s} - \text{кількість енергії,}$$

яку запобіжник здатен пропустити без суттєвої деградації

C1, C2 – номінали обираються в діапазоні 200...600пФ з відповідно до специфікації USB PD, вимоги до вхідної ємності шини CC для PD-sink.

Обираємо SMD конденсатор **330pF 50V X7R** в корпусі 0603.

C3 – В парі з резистором R1 формує ФНЧ, та використовується для подавлення високовольтних викидів на шині V_BUS. Використовуємо SMD конденсатор **105K 50V X7R** в корпусі 0603 – відповідно до рекомендацій з Datasheet.

R1 – В парі з C3 – працює як ФНЧ, працює на розсіювання надлишкових викидів струму на шині V_BUS. Відповідно Datasheet обираємо SMD компонент в корпусі 0603 **10R 5%**

R4, R5 – Резистори, що задають робочу точку транзистора **VT1** при відкритті затвору. Обираємо номінали у співвідношенні наближеному до 1/3, як рекомендоване з Datasheet. Обираємо SMD резистори в корпусі 0603 **33KΩ 5%, 100KΩ 5%**

VT1 – керований ключ, розмикання якого приводить в дію реалізовані в контролері HUSB238 захисти OVP, UVP, OTP. Ключовою вимогою є низький опір каналу R_{DS} у відкритому стані, для мінімізації теплових втрат, та

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплового навантаження на плату, та всередині корпусу виробу. Обираємо доступний Р-канальний MOSFET транзистор **AOD4185** в корпусі TO252.

Обраний транзистор є сумісним за параметрами аналогом до обраного в типовій схемі Datasheet - AD30P47D3, має співставний R_{DS} в робочій точці 12,5 мОм (AOD4185) проти 11,5 мОм (AD30P47D3), є дешевшим, та через поширений корпус – може бути замінений великою кількістю аналогів. Ключові параметри:

$$V_{DS} = -40 \text{ В}$$

$$I_D = -40 \text{ А } (V_{GS} = -10\text{В})$$

Оцінка теплових втрат на відкритому транзисторі при $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, при максимальному робочому навантаженні PD 100W 20В, 5А:

$$U_{GS} = U_{VBUS} \frac{R5}{R5 + R4} - U_{VBUS} = 20 \text{ В} \frac{33 \text{ КОм}}{100 \text{ КОм} + 33 \text{ КОм}} - 20 \text{ В} = -15,4 \text{ В}$$

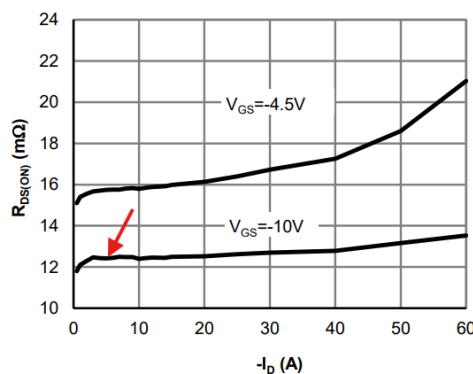


Figure 3: On-Resistance vs. Drain Current and Gate Voltage

Рис 4.2– робоча точка опору каналу

$$R_{DS(on)} \leq 12,5 \text{ мОм} - \text{визначаємо графічно.}$$

$$P_{loss} = I_D^2 \times R_{DS(on)} = 25 \text{ А} * 0,0125 \text{ Ом} = 0,375 \text{ Вт}$$

R2, R3 – Резистори, що задають початкові значення за замовчуванням, які HUSB238 буде запитувати як PDO у джерела живлення PD. Максимально доступна конфігурація $V_{set} = 20\text{В}$, $I_{set} = 3,25\text{А}$ – для цього лишаємо виходи в стані Open. (залишаємо на платі посадкові місця під резистор SMD 0603 пустими)

4.3 Селектор вхідного тракту

Реалізовуємо незалежний перемикач, який буде надійно комутувати шину VBUS на Байпас, за умови $U_{VBUS} \geq 19\text{ В} - U_{DS(VT1)}$, та комутувати шину VBUS на підвищуючий перетворювач 20В при $U_{VBUS} \leq 15,75\text{ В} - U_{DS(VT1)}$

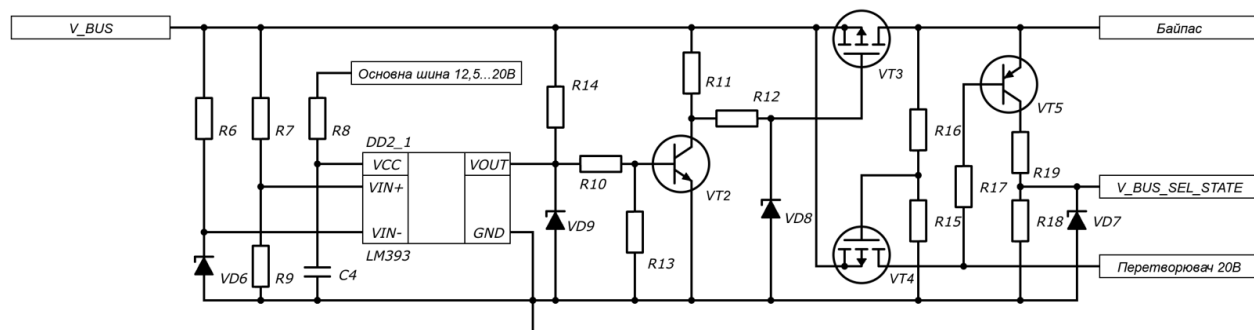


Рис 4.3– Схема селектора

Принцип роботи схеми: компаратор LM393 через дільник R7-R9 порівнює напругу на шині V_BUS з опорною напругою сформованою ланцюжком R6-VD6. У разі перевищення опорної напруги – вихід ОП переходить у високий рівень, та відкриває ключ VT3, комутуючи V_BUS на Байпас, паралельно закривається ключ VT4, відключаючи вхід Перетворювача 20В. Падіння напруги VBUS нижче опорного значення – призводить до зворотного перемикання виходів схеми. Додатково схема формує логічний сигнал V_BUS_SEL_STATE, який при комутації VBUS на Байпас переходить з високого рівня на низький (4,6В...0В), і навпаки при комутації VBUS на перетворювач.

Розрахунок схеми: Для робочої точки обираємо напругу 18,5В (точка перекомутації), в якості джерела опорної напруги VD6 обираємо прецензійне джерело TL431 з конфігурацією виходу 2,48...2,49В відповідно:

$$U_{in(SW)} = U_{VBUS} \frac{R7}{R9 + R7} = \frac{2,485\text{ В}}{18,5\text{ В}} = 0,1343$$

$$R7 = R9 \left(\frac{1}{0,1343} - 1 \right) = R9 \times 6,446$$

$$R7 = 64,9\text{ кОм [E48]} \quad R9 = 10\text{ кОм}$$

TL431 – підключаємо за схемою шунтуючого регулятора. Вивід Vref підключаємо до катода. Опорну напругу 2,485В – знімаємо з катода.

$$R_6 = \frac{V_s - R_o}{I_s} = \frac{18,5 \text{ В} - 2,485 \text{ В}}{1,5...2 \text{ мА}} = 8 \text{ КОм} = 8,2 \text{ КОм} [E24]$$

Транзистори VT3, VT4 – для уніфікації BOM-листа обираємо **AOD4185**, оскільки вони підходять по характеристикам струму стоку, та напруги Vds
Управління VT3 – виходом LM393 реалізовується через pnp-транзистор VT2, який у відкритому стані через резистор R12 підтягує напругу на затворі VT3 до 0В, а у закритому стані – напруга на затворі підтягується через ланцюжок R11-R12 до 12В, обмежених стабілітроном VD8. Розрахунок контура: Вихід LM393 стабілізований до напруги 8,2 В через ланцюжок R14,VD9. Резистор R14 – слугує підтяжкою до VBUS, В період, коли вихід LM393 перебуває у відкритому стані.

$R_{11} = 10 \text{ Ком}$ – обираємо для обмеження струму через транзистор VT2

$R_{12} = 100 \text{ Ом}$ - для обмеження струму розряду затвора при відкритті транзистора VT2

$$I_{ZD} = \frac{V_{BUS(MAX)} - V_{ZD}}{R_{11} + R_{12}} = \frac{20\text{В} - 12\text{В}}{10 \text{ КОм} + 100 \text{ Ом}} = 8,9 \text{ мА}$$

Обираємо популярний стабілітрон **BZX84-C12** робочою напругою 11,4...12,7В, В SMD корпусі SOT-23, потужністю розсіювання 0,3 Вт, при $P_{ZD} < 15 \text{ мВт}$

Для VT2 – обираємо популярний транзистор **MMBT2222** (2N2222) в SMB корпусі SOT-23. Для стабільної роботи в режимі ключа, нам потрібне стабільне насичення при відкритій базі.

$$\beta_s = 10 \quad I_b \geq \frac{I_c}{10} = \frac{8,9 \text{ мА}}{10} = 0,9 \text{ мА}$$

$$R_{10} = \frac{V_B - V_{be}}{I_B} = \frac{8,2 \text{ В} - 0,7\text{В}}{0,9 \text{ мА}} = 8,33 = 8,2 \text{ КОм} [E24]$$

$R_{13} = 47 \text{ КОм}$ – обираємо емпіричне значення

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Для ланцюжка VD9,R14 – проводимо розрахунок:

$R_{14} = 10 \text{ кОм}$ – значення рекомендоване з Datasheet .

$$I_{ZD} = \frac{V_{BUS(MAX)}}{R_{14}} \times \frac{R_{13} + R_{10}}{R_{14} + R_{13} + R_{10}} - \frac{V_{ZD}}{R_{14}}$$

$$= \frac{20 \text{ В}}{10 \text{ кОм}} \times \frac{47 \text{ кОм} + 8,2 \text{ кОм}}{10 \text{ кОм} + 47 \text{ кОм} + 8,2 \text{ кОм}} - \frac{8,2 \text{ В}}{10 \text{ кОм}} = 26 \text{ мкА}$$

Обираємо стабілітрон **BZX84-C8V2** робочою напругою 7,7...8,7В, в SMD корпусі SOT-23. Затвор транзистора Р-канального транзистора VT4 – запирається напругою близькою до 12В при появі напруги 20В на виході транзистора VT3. Для цього розраховуємо дільник R16-R15 у співвідношенні 2/3. Звідси:

$$R_{15} = 10 \text{ кОм} \quad R_{16} = 6,8 \text{ кОм [E24]}$$

При закритті транзистора VT3 – затвор VT4 – підтягується до мінусу живлення, відкриваючи канал транзистора.

Перевіряємо роботу перемикача в симуляції LTSpice:

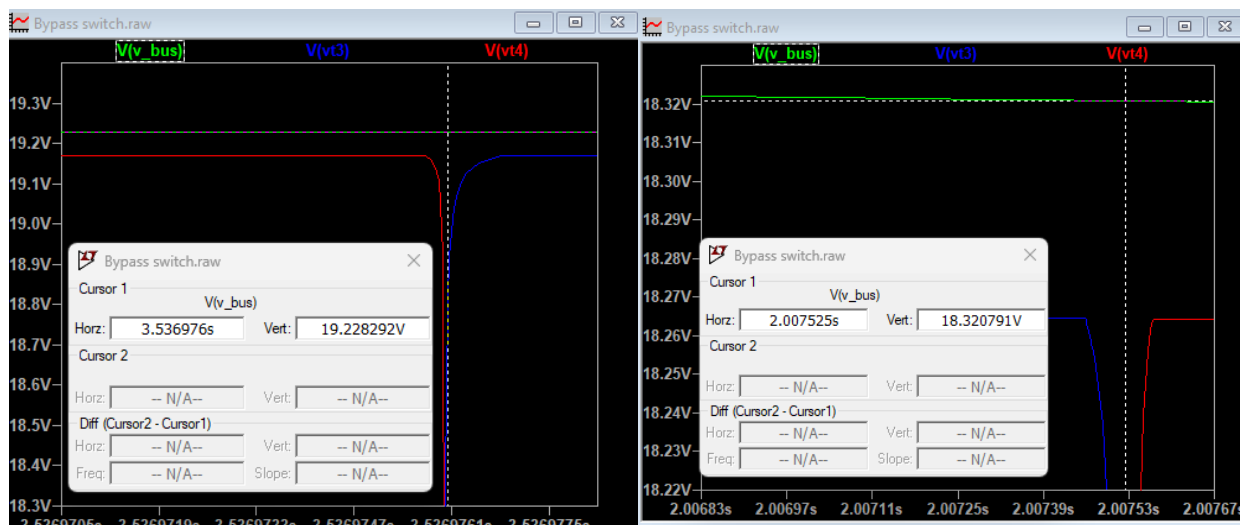


Рис 4.3– Симуляція роботи селектора

Розрахунок ланцюжка, який формує дискретний логічний сигнал **V_BUS_SEL_STATE** напругою 5В за фактом відкриття VT3, та закриття VT4. Для реалізації ланцюжка обираємо PNP транзистор **MMBT2907A(2N2907A)**. Емітер транзистора підключаємо на вихід VT3, базу на вихід VT4, колектор через дільник напруги на мінус живлення. Вихід дільника напруги через стабілізований діодом Зенера до напруги 5В.

$$I_{ZD} = 2 \text{ мА} \quad V_{CE} = 0,2 \text{ В}$$

$$V_{R19} = 20 \text{ В} - 0,2 \text{ В} - 5,1 \text{ В} = 14,7 \text{ В}$$

$$R_{19} = \frac{14,7 \text{ В}}{2 \text{ мА}} = 7,35 \text{ КОм} = 7,5 \text{ КОм} [E24]$$

$$I_{R18} = 0,5 \text{ мА} \quad R_{18} = \frac{5,1 \text{ В}}{0,5 \text{ мА}} = 1 \text{ КОм}$$

$$I_c = I_{R18} \quad \beta = 10 \quad I_B = \frac{2 \text{ мА}}{10} = 0,2 \text{ мА}$$

$$R_{17} = \frac{V_{RB} - V_{BE}}{I_B} = \frac{20 \text{ В} - 0,7 \text{ В}}{0,2 \text{ мА}} = 96 \text{ КОм} = 100 \text{ КОм} [E24]$$

Обираємо стабілітрон **BZX84-C5V1** робочою напругою 4,8...5,4В, в SMD корпусі SOT-23.

Вхід VCC LM393 підключаємо до основної шини через ФНЧ R8-C4

R8 – обираємо номіналом 10 Ом, C4 – номіналом 1 мкф, відповідно до рекомендації з Datasheet. Підсумок для компонентів вузла:

DD2_1	-	LM393D SOIC-8	R17	-	100 KOhm 0603 0,1w 5%
R6	-	64,9 KOhm 0603 0,1w 5%	R18	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%
R7	-	100 Ohm 0603 0,1w 5%	R19	-	7,5 KOhm 0603 0,1w 5%
R8	-	10 Ohm 0603 0,1w 5%	VD6	-	TL431 SOT-23-3
R9	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VD7	-	BZX84-C5V1 SOT-23-3
R10	-	8,2 KOhm 0603 0,1w 5%	VD8	-	BZX84-C12 SOT-23-2
R11	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VD9	-	BZX84-C8V2 SOT-23-3
R12	-	100 KOhm 0603 0,1w 5%	VT2	-	MMBT2222 SOT-23-3
R13	-	47 KOhm 0603 0,1w 5%	VT3	-	AOD4185 TO-252
R14	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VT4	-	AOD4185 TO-252
R15	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VT5	-	MMBT2907A SOT-23-3
R16	-	6,8 KOhm 0603 0,1w 5%	C4	-	105K 50V X7R 0603

4.4 Селектор джерела живлення (основної шини)

Реалізуємо перемикач, який за наявності напруги на Байпасі, або Перетворювачі 20В – тобто на вході пристрою – комутує основну шину (через шунт вимірювання струму споживання) на Перетворювач 20В/Байпас. За відсутності напруги на вході пристрою – комутує основну шину на батарею.

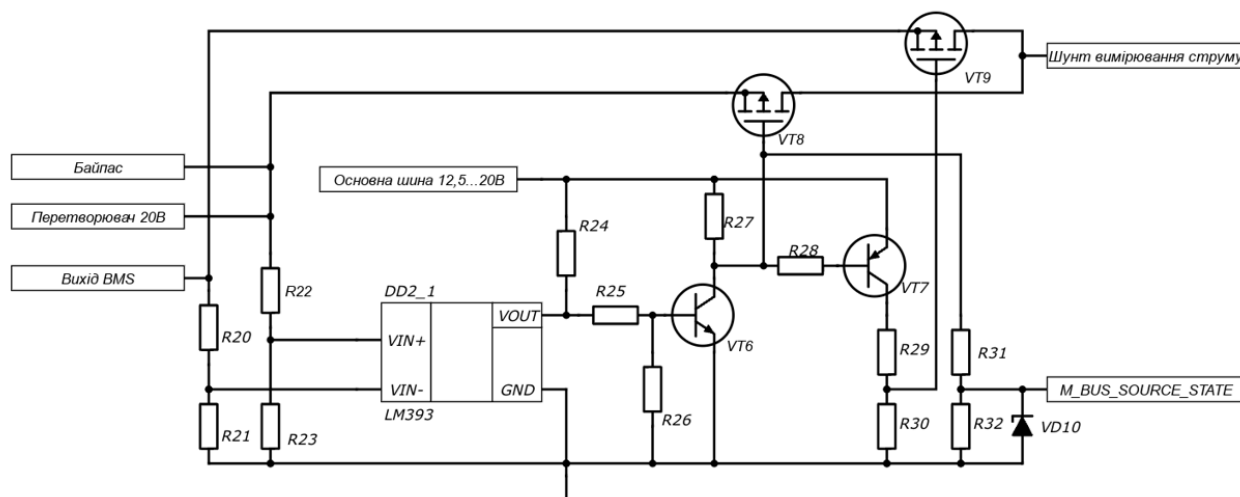


Рис 4.4— Схема селектора

Принцип дії вузла: Компаратор через ланцюжки R20-R21, та R22-R23 – постійно порівнює напруги на виході BMS 12,4...18,6В, та на вхідному тракті 19...21В. В разі появи напруги на вхідному тракті напруга на ньому буде більшою ніж на виході BMS, компаратор через відкриття транзистора VT6, відкриє затвор ключа VT8, та через VT7 закриє затвор VT9, що призведе до комутації основної шини на вхід. Коли напруга на вхідному тракті зникне – відбудеться зворотне переключення ключів VT8-VT9, комутуючи основну шину на батарею. Перехід на батарею супроводжується формуванням дискретного сигналу M_BUS_SOURCE_STATE напругою 5В через ланцюжок дільника R31-R32 та стабілітрона VD10.

Вузол повторює схемотехнічні рішення селектора вхідного тракту, тому частину елементарної бази також повторюємо. Однак вузол має деякі відмінності. Розраховуємо ділянки входів LM393 у співвідношенні 1:5

$$R_{20} = R_{22} = 47 \text{ KO}_M [E24] \quad R_{21} = R_{23} = 10 \text{ KO}_M$$

$$V_{in-(ON)} = 2,1...3,1 \text{ В}$$

$$V_{in+(ON)} = 3,5 \text{ В}$$

Інші компоненти обираємо по аналогії з селектором вхідного тракту:

DD2_2	-	LM393D SOIC-8	R29	-	6,8 KOhm 0603 0,1w 5%
R20	-	47 KOhm 0603 0,1w 5%	R30	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%
R21	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	R31	-	7,5 KOhm 0603 0,1w 5%
R22	-	47 KOhm 0603 0,1w 5%	R32	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%
R23	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VD10	-	BZX84-C5V1 SOT-23-3
R24	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VT6	-	MMBT2222 SOT-23-3
R25	-	8,2 KOhm 0603 0,1w 5%	VT8	-	AOD4185 TO-252
R26	-	47 KOhm 0603 0,1w 5%	VT9	-	AOD4185 TO-252
R27	-	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VT7	-	MMBT2907A SOT-23-3
R28	-	100 KOhm 0603 0,1w 5%			

Перевіряємо роботу перемикача в симуляції LTSpice:

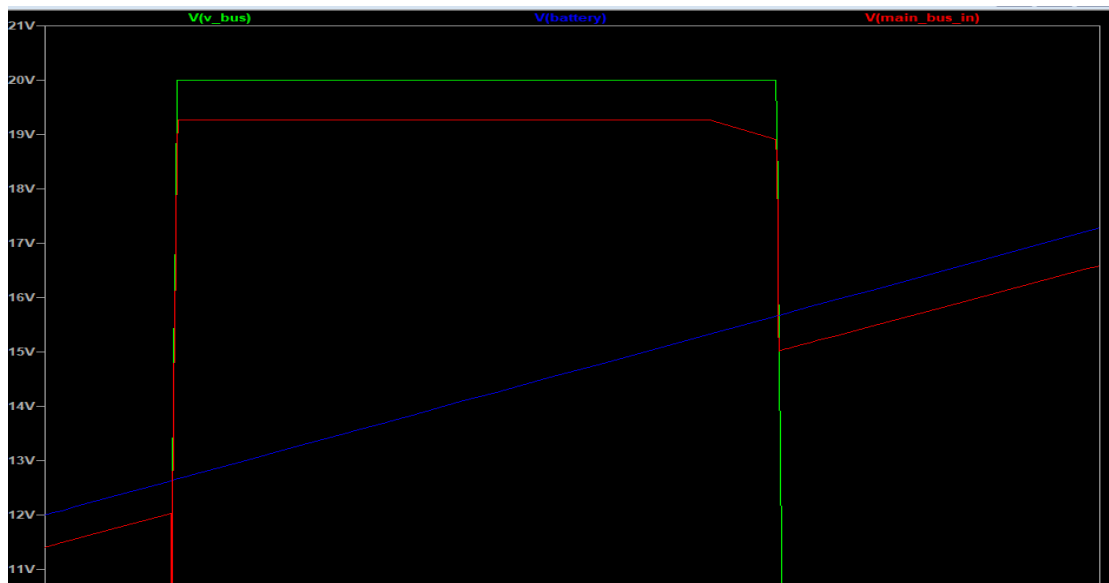


Рис 4.5– Симуляція роботи селектора. Пік в 20В – ілюструє режим роботи від зарядного пристрою.

4.5 Основна шина

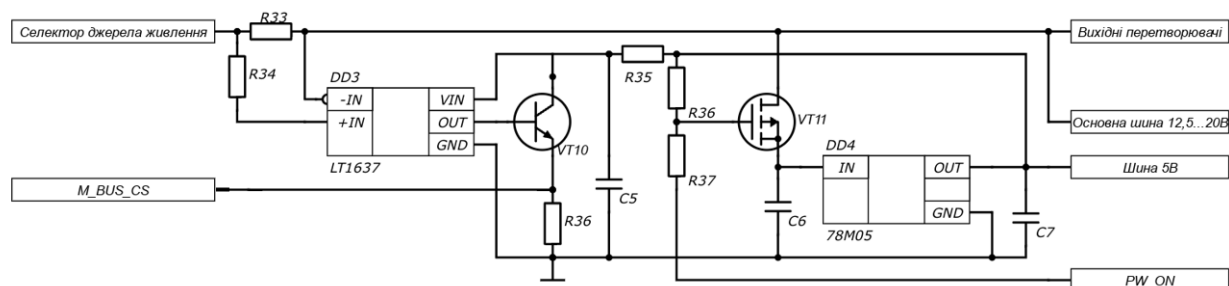


Рис 4.5– Основна шина.

Являє собою лінію живлення, яка в разі відкритої BMS, та підключеної батареї постійно перебуває під напругою. Може бути заживленою як від батареї так і від вхідного тракту. Діапазон робочої напруги 12,4...20В. Основна шина (M_BUS) є джерелом живлення для вихідних перетворювачів, компараторів, та допоміжної шини 5В, яка в свою чергу живить MCU, індикацію та LT1637. Струм споживання вихідних перетворювачів, та периферії вимірюється падінням напруги на шунті R33, На виході LT1637 через NPN транзистор VT10 – формується, та передається на MCU відповідний аналоговий сигнал *M_BUS_CS*. Шина 5В формується лінійним стабілізатором серії 7805, який заживлюється за наявності сигналу PW_ON (низький рівень), який формується при підключенні навантаження до будь-якого з вихідних роз'ємів пристрою. Таким чином індикація, та MCU включаються тільки за наявності навантаження.

Контур вимірювання струму – підбираємо обв'язку LT1637 за рекомендацією з Datasheet:

$$R_{33} = 0,2 \text{ Ом} \quad R_{34} = 200 \text{ Ом} \quad R_{36} = 2 \text{ КОм}$$

VT10 – обираємо NPN транзистор загального призначення **MMBT3904**(2n3904) в SMD корпусі SOT-23-3. Для обраної схеми підключення струм споживання визначається за законом:

$$I_{load} = \frac{V_{C(2n3904)}}{R_{33} \left(\frac{R_{36}}{R_{34}} \right)} = \frac{V_C}{2}$$

Номінали резисторів R37-R38 обираємо у співвідношенні 1:3

$$R_{38} = 10 \text{ КОм} \quad R_{37} = 33 \text{ КОм}$$

При низькому рівні сигналу PW_ON - затвор транзистора VT11 – через резистор R37 - підтягується до мінусу живлення, та закриває собою канал. При високому рівні – затвор VT11 підтягується до напруги на шині через резистор R38. Закриваючи канал, та відключаючи лінію 5В через перетворювач 7805. Для транзистора VT11 – обираємо вже використаний у проекті AOD4185 в корпусі SMD TO-252. Такий вибір є надмірним, та перезакладеним з точки зору робочих характеристик, однак обраний транзистор є дешевим, вибір його – скорочує перелік використаних компонентів. Перетворювач 7805 також є дещо надмірним з точки зору робочих струмів. Однак є масовим, доступним, там має широкий асортимент аналогів від великої кількості виробників. Схему підключення перетворювача обираємо з Datasheet:

$$C_6 = 330 \text{ нФ} \quad C_7 = 100 \text{ нФ}$$

Розрахунок теплових втрат на перетворювачі при різних станах шини (Оцінка струму споживання 15 мА):

$$P = (U_{in} - 5) \times 0.015 \text{ А}$$

Живлення від батареї, батарея в нижньому порозі заряду:

$$P = (12.4 - 5) \times 0.015 = \mathbf{0,111 \text{ Вт}}$$

Живлення від батареї, батарея в верхньому порозі заряду:

$$P = (18.6 - 5) \times 0.015 = \mathbf{0,204 \text{ Вт}}$$

Живлення від USB входу:

$$P = (20 - 5) \times 0.015 = \mathbf{0,225 \text{ Вт}}$$

Перетворювач обираємо в SMD корпусах D2PAK(TO252), радіатор не потрібен для всіх режимів роботи.

Номінали резистора R35, та конденсатора C5, які формують ФНЧ на вході операційного підсилювача обираємо опираючись на рекомендації з документації:

$$R_{35} = 10 \text{ Ом} \quad C_5 = 1 \text{ мФ}$$

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальний підсумок по компонентам вузла:

DD3 -	LT1637CMS8 MS8	R37 -	33 KOhm 0603 0,1w 5%
DD4	L78M05CD TO252	R35 -	10 Ohm 0603 0,1w 5%
R33 -	0,2 Ohm 2512 5w 5%	C6 -	330 nF 50V X7R 0603
R34 -	100 Ohm 0603 0,1w 5%	C7 -	100 nF 50V X7R 0603
R35 -	2KOhm 0603 0,1w 5%	VT10 -	MMBT3904 SOT-23-3
R36 -	10 KOhm 0603 0,1w 5%	VT11 -	AOD4185 TO-252

4.6 Управління та індикація:

Цей вузол відповідає за індикацію заряду батарейного блоку, управлінням потужністю заряду батареї.

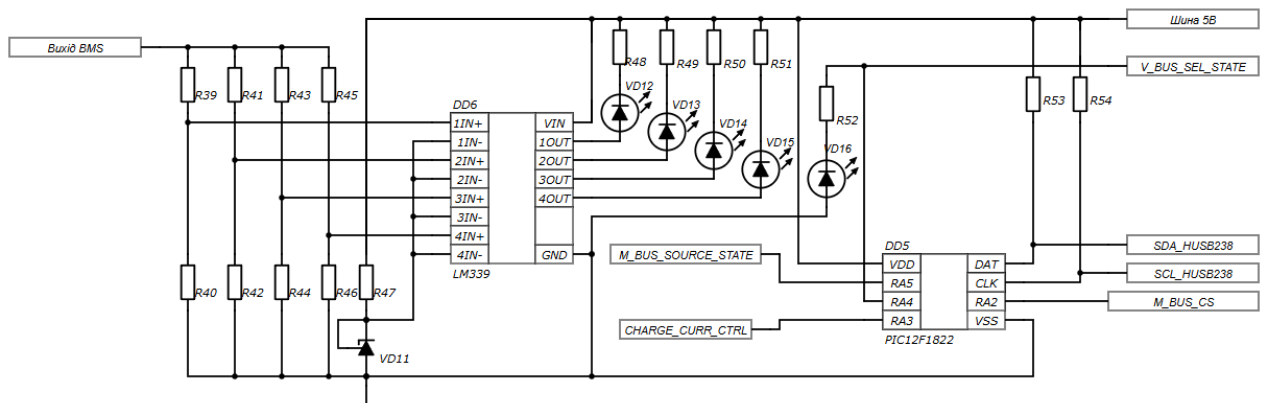


Рис 4.6— Схема ланки управління та моніторингу

Індикація рівня заряду реалізована через фіксацію напруги на батарейній збірці в 4-х контрольних точках 13,52В. 14,95В. 16,51В. 17,94В.

Такий підхід має свої недоліки оскільки криві заряду-розряду LiFePo4 – батареї мають доволі пологі характеристики, також їхні профілі сильно залежать від струмів заряду/розряду.

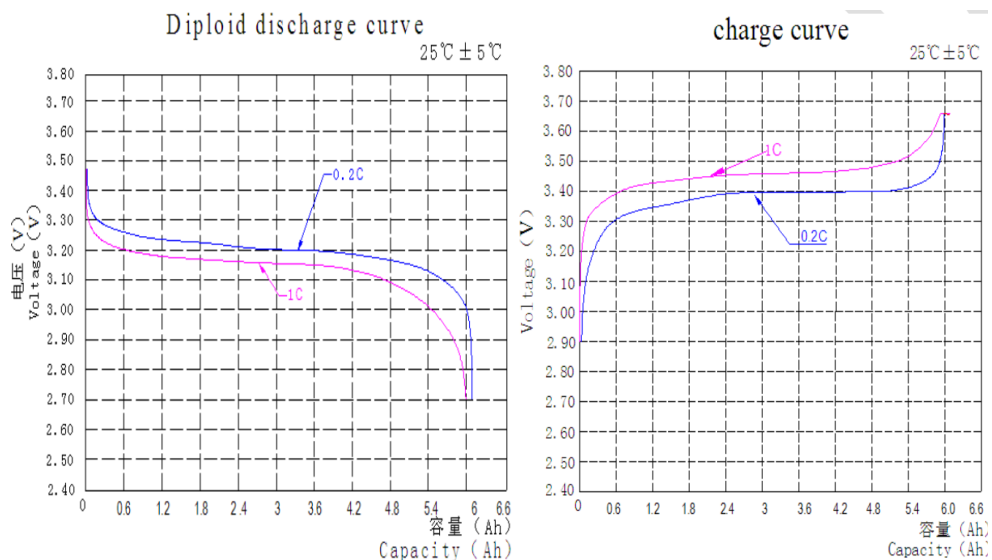


Рис 4.7– Криві заряду, розряду LiFePo4 – комірок.

Більш точним рішенням було-б реалізувати вимірювання перетікаючого через шунт підключення батареї заряду з корекцією помилки (кулонметр), однак така реалізація потребує більш просунутого MCU, з більшою швидкодією, та більшим об'ємом ПЗП.

Пропоноване рішення дозволяє користувачу отримати орієнтовну оцінку рівня заряду.

Принцип дії індикатора заснований на порівнянні 4-ма компараторами (LM339) Еталонної напруги 2,495В TL431 (VD11), 4х-рівнів напруги батареї прирівняних до 2,5В через дільники R39-R40, R41-R42, R43-R44, R45-R46.

В разі досягнення необхідного рівня напруги - транзистор вихідного каскаду LM339 - відкривається, комутуючи вихід на мінус живлення. Відкриваючи ланку струму через обмежуючий резистор R48...R51, та відповідний зелений світлодіод VD12...VD15. Додатковим індикатором є червоний світлодіод VD16, який вмикається високим рівнем (5В) сигналу V_BUS_SEL_STATE, який свідчить про встановлений джерелом живлення PDO Power delivery на рівні 60Вт , або 100 Вт, що свідчить про активацію режиму швидкого заряду.

Дільники напруги розраховуємо за формулою:

$$R_{\text{верх.}} = R_{\text{нижн.}} \left(\frac{U_{\text{батареї}}}{2,495\text{В}} - 1 \right)$$

$$R_{\text{нижн.}} = R_{40} = R_{42} = R_{44} = R_{46} = 10 \text{ кОм}$$

$$R_{39} = 44,2 \text{ кОм} \quad R_{41} = 49,9 \text{ кОм} \quad R_{43} = 56 \text{ кОм} \quad R_{45} = 61,9 \text{ кОм}$$

Вивід Vref TL431 замикаємо катод. Номінал резистора R47 розраховуємо за формулою, для мінімального стабільного робочого струму

$$R_{47} = \left(\frac{5\text{В} - 2,495\text{В}}{2 \text{ мА}} \right) = 1,2 \text{ кОм [E24]}$$

Для VD12...VD15 обираємо зелені світлодіоди **KT-SMD0603-G** в SMD корпусі 0603, розраховуємо режим роботи $I_f = 10\text{мА}$, при такому струмі пряме падіння напруги V_f складатиме близько 3В Відповідно:

$$R_{48} = R_{49} = R_{50} = R_{51} = \frac{5\text{В} - 3\text{В}}{10 \text{ мА}} = 180 \text{ Ом [E24]}$$

Для VD16 обираємо червоний світлодіод **KT-SMD0603-R** в SMD корпусі 0603, розраховуємо режим роботи $I_f = 10\text{мА}$, при такому струмі пряме падіння напруги V_f складатиме близько 2В Відповідно:

$$R_{52} = \frac{5\text{В} - 2\text{В}}{10 \text{ мА}} = 270 \text{ Ом [E24]}$$

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

LM339DT – обираємо в SMD корпусі SOIC-14

Перевірка роботи індикатора в симуляції LTSPICE



Рис 4.8– Ілюстрація увімкнення світлодіодів в симуляції.

Мікроконтролер обираємо PIC12F1822 в SMD корпусі SOIC-8

Цей контролер має 3,5 КБ Флеш пам'яті, 128Б RAM, тактову частоту процесора до 32 МГц. PWM – вихід. 4 каналний АЦП, підтримку I2C, а головне підтримує перехід в енергозберігаючий режим XLP (eXtreme Low Power) зі споживанням струму в межах 5 нА, в режимі очікування, що є ключовим параметром при виборі.

Підсумок по використаних компонентах для вузла:

R40	-	44,2 KOhm	0603	0,1w	5%	R52	-	270R	0603	0,1w	5%
R41	-	10 KOhm	0603	0,1w	5%	R53	-	10 KOhm	0603	0,1w	5%
R42	-	49,9 KOhm	0603	0,1w	5%	R54	-	10 KOhm	0603	0,1w	5%
R43	-	10 KOhm	0603	0,1w	5%	VD11-		TL431	SOT-23-3		
R44	-	56 KOhm	0603	0,1w	5%	VD12-		KT-SMD0603-G	0603		
R45	-	10 KOhm	0603	0,1w	5%	VD13-		KT-SMD0603-G	0604		
R46	-	61,9 KOhm	0603	0,1w	5%	VD14-		KT-SMD0603-G	0605		
R47	-	1,2 KOhm	0603	0,1w	5%	VD15-		KT-SMD0603-G	0606		
R48	-	180R	0603	0,1w	5%	VD16-		KT-SMD0603-R	0606		
R49	-	180R	0603	0,1w	5%	DD5	-	PIC12F1822	SOIC-8		
R50	-	180R	0603	0,1w	5%	DD6	-	LM339DT	SOIC-14		
R51	-	180R	0603	0,1w	5%						

4.7 Вихідні перетворювачі.

Для реалізації використовуємо модифіковану схему від рекомендованої з datasheet. Перетворювачі 12В, 9В, та 5В – мають однакові схеми включення. З різницею у дільнику R56,R58 який формує напругу похибки для входу FB XL4015. Розрахунок проводимо для максимального вихідного струму 3А.

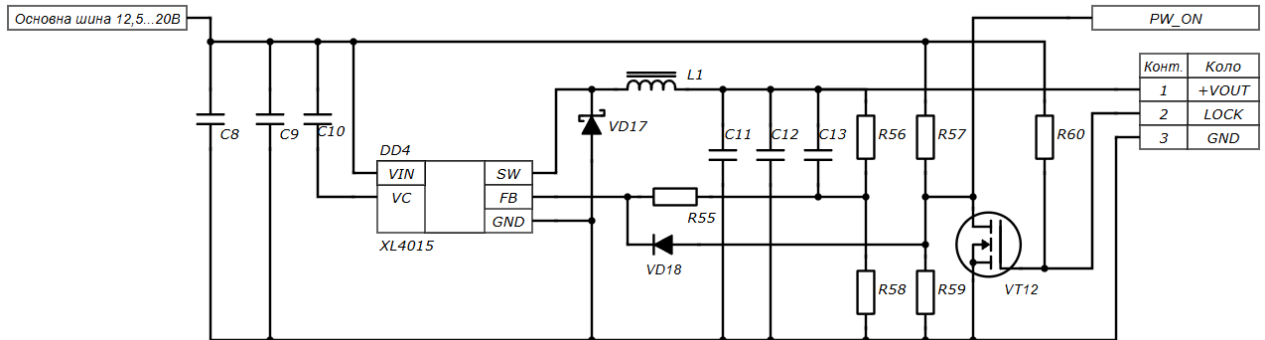


Рис 4.9– Схема одного з вихідних перетворювачів

Розрахунок дроселя для перетворювача 12В.

Максимальний, та мінімальний коефіцієнт заповнення

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}}; \quad D_{min} = \frac{12 \text{ В}}{20 \text{ В}} = 0,6;$$

Допустимі пульсації – підставляємо емпіричне значення:

$$\Delta I_L = 30\% \times I_{out} = 0,9 \text{ А}$$

Звідси індуктивність дроселя ($f_{sw} = 180 \text{ кГц}$):

$$L = \frac{V_{out} \times (1 - D)}{\Delta I_L \times f} = \frac{12 \times (1 - 0,6)}{0,9 \times 180 \times 10^3} = 29,6 \text{ мкГ}$$

Піковий струм дроселя:

$$I_{Lpeak} = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} = 3 + \frac{0,81}{2} = 3,4 \text{ А}$$

Обираємо дросель з $I_{sat} \geq 5\text{А}$

Розрахунок дроселя для перетворювачів 9, і 5В

$$D_{min(9В)} = \frac{9 \text{ В}}{20 \text{ В}} = 0,45; \quad D_{min(5В)} = \frac{5 \text{ В}}{20 \text{ В}} = 0,25;$$

$$L_{(9В)} = \frac{9 \times (1 - 0,45)}{0,9 \times 180 \times 10^3} = 30,06 \text{ мкГ}$$

$$L_{(9B)} = \frac{5 \times (1 - 0,45)}{0,9 \times 180 \times 10^3} = 23,1 \text{ мкГ}$$

В раховуючи розрахункові параметри – для всіх 3-х аплікацій використовуємо однаковий SMD дросель номіналом 33 мкГ, та максимальним струмом 5А **HPS1265-330MT** для L1...L3

Розраховуємо діод шоткі.

Максимальна зворотна напруга – обираємо 3-х кратний запас:

$$V_{RRM} \geq V_{in(MAX)} \times 3 = 60V$$

Середній струм діода 12В - перетворювач:

$$I_D = I_{out}(1 - D) = 3(1 - 0,6) = 1,2 \text{ А}$$

9В, 5В - перетворювач:

$$I_{D(9B)} = 3(1 - 0,45) = 1,65 \text{ А}$$

$$I_{D(5B)} = 3(1 - 0,25) = 2,25 \text{ А}$$

Розсіювання тепла при найгіршому сценарії:

$$P_D = V_F \times I_{D(5B)} = 0,45...0,6 \text{ В} \times 2,25 \text{ А} = 1,1 \text{ Вт}$$

Для всіх 3х (VD17) перетворювачів обираємо однаковий діод **MBR0560-TP** в SMD корпусі SOD-123. З параметрами $V_{rrm} = 60V$, $I_{fsm} = 5.5A$.

Підбір конденсаторів виконуємо відповідно до рекомендацій з Datasheet C8, C10 – обираємо у SMD виконанні з низьким імпедансом серії HITANO EZV - 220 мкФ 50В, та 330 мкФ 25В відповідно. Обидва в розмірі F.

Шунтуючі конденсатори C9, C11, та конденсатор C10 – ємністю 1мкФ в SMD в корпусі 0805, діелектрик X7R. Конденсатор C13 - 33нФ в корпусі 0805, діелектрик X7R. Розрахунок дільника напруги ланки зворотного зв'язку:

$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{R_{\text{верхн}}}{R_{\text{нижн}}} \right)$$

$$R_{\text{нижн}} = 1 \text{ кОм}$$

Тоді, для 12 вольт:

$$R_{\text{верхн}(12B)} = 1000 \times \left(\frac{12}{1,25} - 1 \right) = 3 \text{ кОм}$$

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Для 9, та 5 Вольт:

$$R_{\text{верхн}(9\text{В})} = 1000 \text{ Ом} \times \left(\frac{9 \text{ К}}{1,25} - 1 \right) = 6,2 \text{ кОм}$$

$$R_{\text{верхн}(5\text{В})} = 1000 \text{ Ом} \times \left(\frac{5 \text{ К}}{1,25} - 1 \right) = 8,6 \text{ кОм}$$

Струм через дільник для найгіршого сценарію.

$$P = 12 \text{ К} \times \frac{12 \text{ В}}{8,6 \text{ К} + 1 \text{ К}} < 15 \text{ мВт}$$

Резистори дільника обираємо в SMD корпусі 0603.

Додатковим функціоналом вузла є ланка R55,R57,R59,R60, VT12, VD18.

Яка відповідає за формування дискретного сигналу напругою 4,2...7В

(залежно від напруги на шині). При замиканні на мінус живлення контакту pin-detect на вихідному роз'ємі (штекер не під'єднано) - N-канальний MOSFET VT12 – закритий, і сформована на дільнику напруга вимикає перетворювач, піднімаючи вгору сигнал похибки зворотного зв'язку через діод VD12.

Цей самий сигнал закриває Р-канальний транзистор-вимикач шини 5В.

При розмиканні контакту pin-detect на роз'ємі (штекер вийнято) – транзистор відкривається, і комутує верхнє плече дільника на мінус живлення.

Сигнал PW_ON знімається, відкриваючи лінію 5В, та знімаючи надлишковий сигнал помилки з перетворювача. Для транзистора VT12 обираємо 2n7002 в SMD корпусі SOT 23-2. Опір верхнього плеча дільника обираємо 18 кОм, опір нижнього плеча – обираємо 10 кОм. Опір зміщення напруги затвору – 18 кОм. Резистор R55 – 10 кОм. Всі чотири резистора – обираємо SMD в корпусі 0603. Діод VD18 - обираємо **1N4148W-TP** в SMD корпусі SOD123

					РЕЗ21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.8 Зарядний перетворювач СС/CV

В якості дешевого, та доступного рішення використовуємо XL4015, модифікуємо схему для управління обмеження струму через MCU

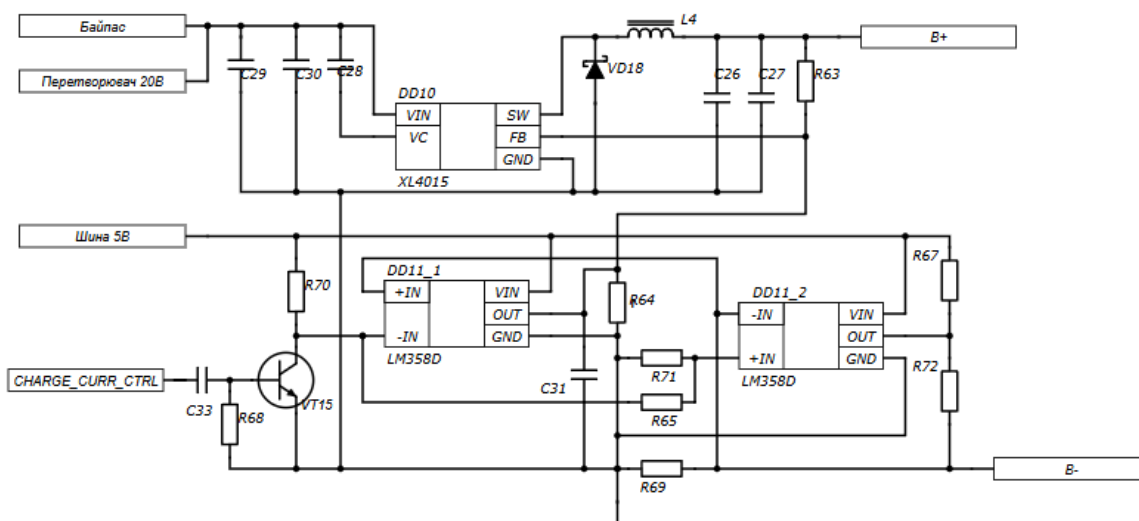


Рис 4.10– Модифікована схема зарядного пристрою

Режим заряду Постійним струмом – постійною напругою реалізується модифікацією контуру зворотного зв'язку.

$$D_{min} = \frac{12,4 \text{ В}}{20 \text{ В}} = 0,62$$

$$L = \frac{12,4 \times (1 - 0,6)}{1,5 \times 180 \times 10^3} = 17,4 \text{ мкГ}$$

$$I_{Lpeak} = I_{OUT} + \frac{\Delta I_L}{2} = 5 + \frac{1,5}{2} = 5,75 \text{ А}$$

Обираємо дросель Струмом 7А, та індуктивністю 22 мкГн в SMD виконанні.

HPS1265-220MT

$$R_{ниже(18,5В)} = 1000$$

$$R_{верхн(18,5В)} = 1000 \times \left(\frac{18,5}{1,25} - 1 \right) = 13,8 \text{ кОм}$$

Резистори дільника обираємо в SMD корпусі 0603.

Boost перетворювач 20В

Використовуємо типову схему з Datasheet.

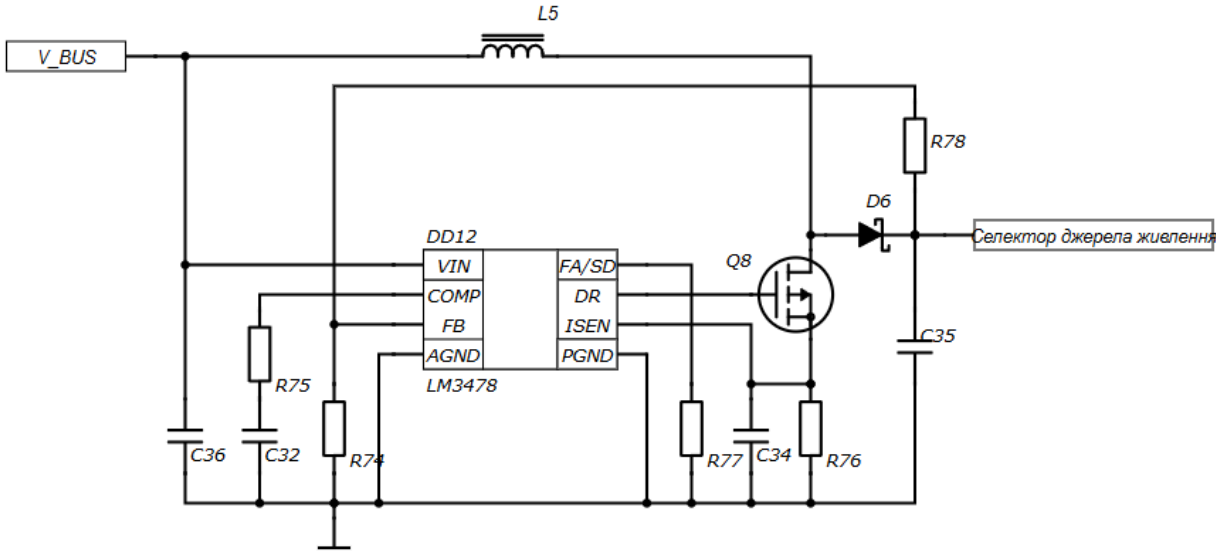


Рис 4.11– Каскад буст-перетворювача

Для розрахунку схеми використовуємо калькулятор *LM3478-88_Quickstart_Calculator_Boost_V1* від *Texas Instruments*

Step 1: Design Specifications	
Minimum Input Supply Voltage, $V_{SUPPLY(MIN)}$	4 V
Typical Input Supply Voltage, $V_{SUPPLY(TYP)}$	5 V
Maximum Input Supply Voltage, $V_{SUPPLY(MAX)}$	15 V
Target Output Voltage, V_{LOAD}	20 V
Maximum Output Current, I_{LOAD}	5 A
Free Running Switching Frequency, F_{SW}	400 kHz
Free running Oscillator Set Resistor, R_t	39,35 kΩ
Estimated Efficiency	90 %
Output Power, P_{OUT}	100 W
Recommended maximum duty cycle LM3478-88 at $V_{SUPPLY(MIN)}$	98 %
Ideal Duty Cycle at $V_{SUPPLY(MIN)}$	80 %
Operation Mode	CCM
Step 2: Filter Inductor	
Desired Maximum Inductor Current Ripple Ratio (I_{RR_MAX})	60 %
Recommended Inductance (L_{M_CALC})	2,469 μH
User Selection. Inductance, (L_M)	4,7 μH
Max Inductor DCR, R_{DCR}	8 mΩ
Peak inductor current, I_{LPK}	28,63 A
Step 3: Current Sense Resistor Selection	
Peak Current Limit Margin	10 %
Selected Peak Current limit(I_{LPK_SELECT})	31,49 A
Recommended current sense Resistor (R_{SEN})	2,62 mΩ
Recommended external slope compensation Resistor (R_{SC})	0 Ω
Selected current sense Resistor (R_{SEN})	10 mΩ
Selected external slope compensation Resistor (R_{SC})	0 Ω
Actual inductor peak current limit	13,30 A
Recommend Minimum Inductor Saturation Current Rating	15,30 A
Step 4: Output Capacitor Selection	
Desired load step ripple voltage (ΔV_{OUT})	1000 mV
Minimum output capacitance	10,00 μF
Capacitor RMS current (I_{RMS_COUT})	10,01 A
Selected Output Capacitance (C_{OUT})	110 μF
Equivalent COUT ESR (R_{ESR})	5 mΩ

Рис 4.11– Калькулятор *LM3478* від *TI*.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено джерело безперебійного живлення телекомунікаційного обладнання абонентського сегменту мереж зв'язку, призначене для роботи в умовах циклічних відключень електроенергії.

Проведено аналіз існуючих стаціонарних та мобільних рішень резервного живлення, визначено їх переваги та недоліки, а також встановлено, що наявні комерційні вироби не повністю задовольняють вимоги базового сегменту

Виконано аналіз сучасних акумуляторних технологій та обґрунтовано вибір літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO₄), які забезпечують високий циклічний ресурс, підвищену безпеку та придатність до тривалої експлуатації в умовах регулярних циклів заряд-розряд.

На основі технічних вимог обрано архітектуру пристрою, що забезпечує пріоритет живлення навантаження, розподіл потужності між вихідними перетворювачами та зарядним контуром, а також можливість роботи від зовнішніх джерел живлення з підтримкою USB Power Delivery.

Розроблено функціональну та електричну принципову схеми пристрою, виконано вибір елементної бази та визначено склад основних функціональних вузлів: вхідного тракту USB Type-C з PD-Sink, селекторів живлення, зарядного перетворювача CC/CV, системи індикації та вихідних DC/DC-перетворювачів.

Запропоноване технічне рішення забезпечує живлення телекомунікаційного обладнання з вихідними напругами 5 В, 9 В та 12 В, підтримує швидкий заряд акумуляторної батареї та може бути використане як основа для створення доступних джерел безперебійного живлення для абонентського обладнання мереж зв'язку.

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк ; пер. с англ. – Москва : Додэка-XXI, 2008. – 272 с.
2. Маниктала С. Импульсные источники питания от А до Z / С. Маниктала ; пер. с англ. Ю. Ф. Авраменко. – Киев : МК-Пресс ; Санкт-Петербург : Корона-Век, 2008. – 256 с.
3. Титце У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство / У. Титце, К. Шенк ; пер. с нем. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.
4. Buchmann I. Understanding Lithium-Ion [Электронный ресурс] // Battery University. – Режим доступа: <https://www.batteryuniversity.com/article/understanding-lithium-ion> (дата звернення: 18.06.2026).
5. Buchmann I. BU-205: Types of Lithium-Ion [Электронный ресурс] // Battery University. – Режим доступа: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (дата звернення: 18.06.2026).
6. Buchmann I. BU-808: How to Prolong Lithium-Based Batteries [Электронный ресурс] // Battery University. – Режим доступа: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries> (дата звернення: 18.06.2026).
7. Texas Instruments. ESD and Surge Protection for USB Interfaces [Электронный ресурс]. – Rev. В. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/an/slva82b/slva82b.pdf> (дата звернення: 18.06.2026).

					РЕз21.464419. 001 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

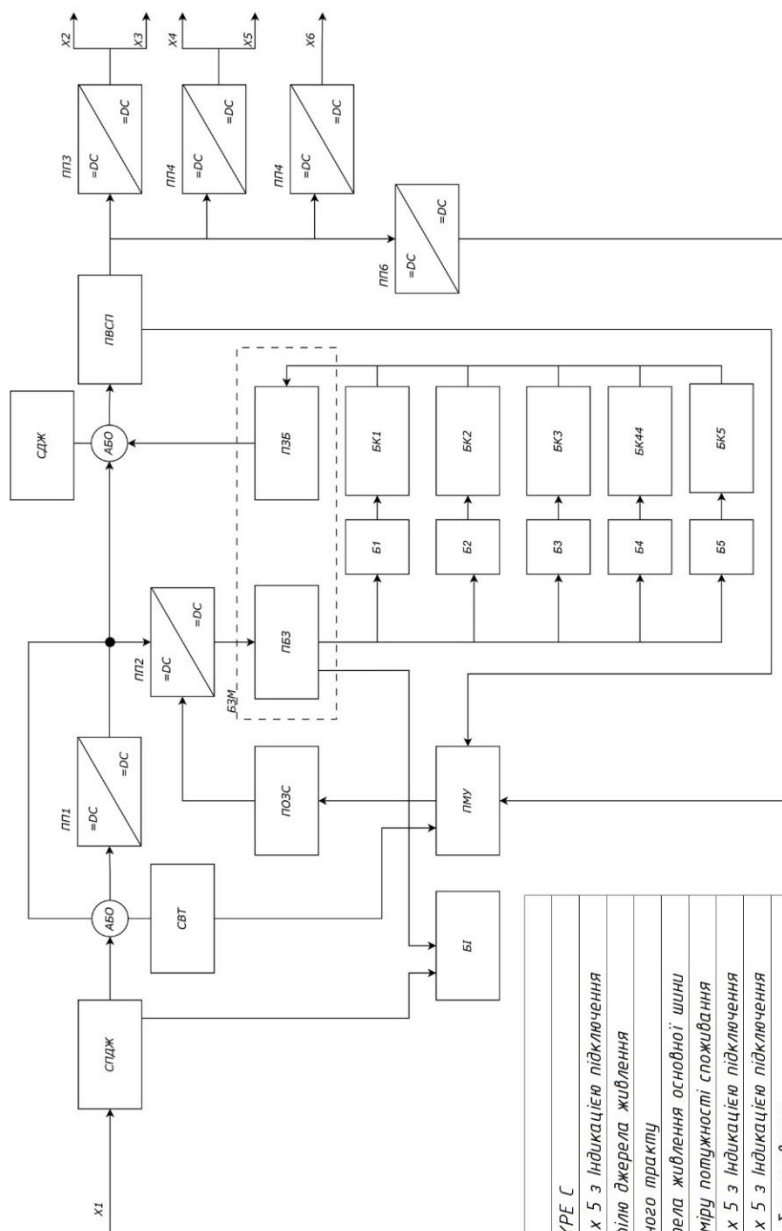
8. USB Implementers Forum. Universal Serial Bus Power Delivery Specification Revision 3.1. – USB-IF, 2021.
9. USB Implementers Forum. Universal Serial Bus Type-C® Cable and Connector Specification Release 2.1. – USB-IF, 2021.
10. Hynetek Semiconductor Co., Ltd. HUSB238 USB Power Delivery Sink Controller Datasheet. – 2022.
11. XLSEMI. XL4015 5A 180 kHz 36 V Buck DC to DC Converter Datasheet.
12. Texas Instruments. LM358 Low-Power Dual Operational Amplifier Datasheet.
13. Texas Instruments. TL431 Adjustable Precision Shunt Regulator Datasheet.
14. Vishay Siliconix. Si2301 P-Channel MOSFET Datasheet.
15. Diodes Incorporated. B5819W Schottky Barrier Rectifier Datasheet.

					<i>PE321.464419. 001 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

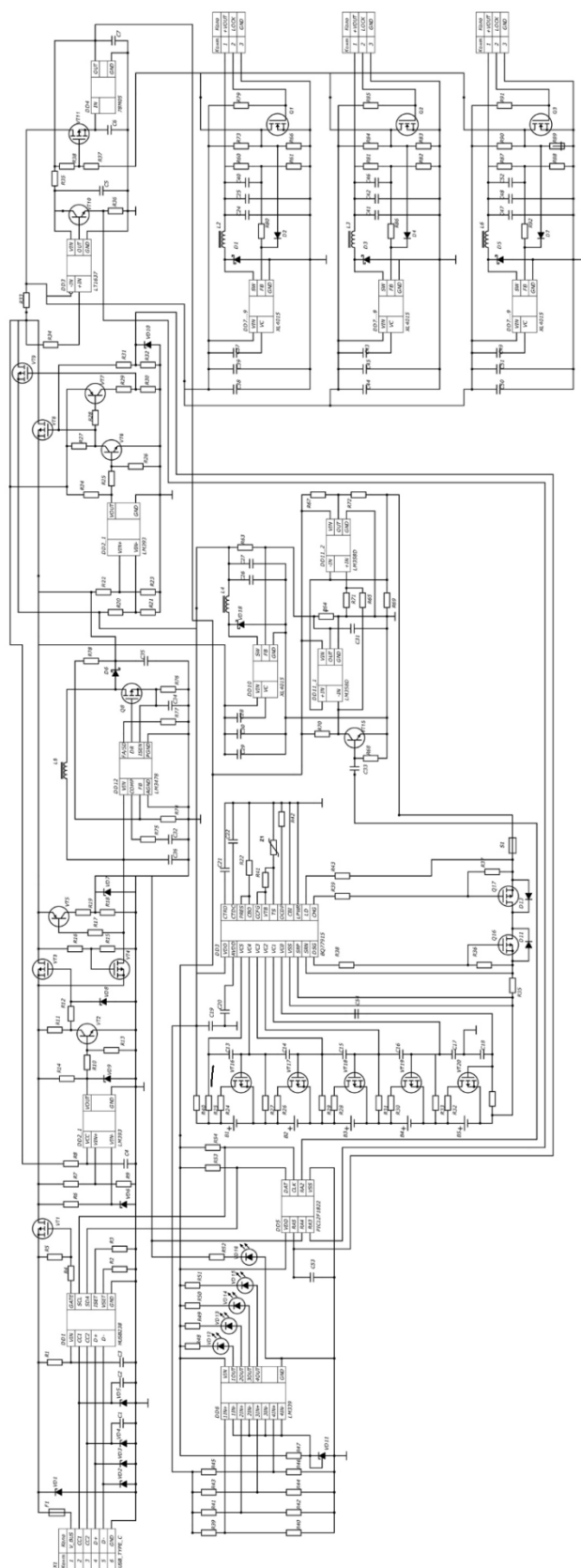
№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	РЕз21.464419.001.ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	РЕз21.464419. 001 ПЗ	Пояснювальна записка	51	
3	A1	РЕз21.464419. 001Е1	Схема структурна	1	
4	A1	РЕз21.464419.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
5	A4	РЕз21.464419.001ПЕ	Перелік елементів	7	

				РЕз21.464419.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Джерело безперебійного живлення апаратури зв’язку	Лист	Листів
Розробн.	Зорін. А.С				51	51
Керівн.	Мовчанюк А.В				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ ,Гр. РЕЗ-21	
Н/контр.						
Зав.каф.						



Номер	Шифр	Тлумачення
1	X1	Роз'єм USB TYPE C
2	X2...X6	Роз'єм DC 2,5 x 5 з індикацією підключення
3	СПДЖ	Селектор профілю джерела живлення
4	СВТ	Селектор вхідного тракту
5	СДЖ	Селектор джерела живлення основної шини
6	ПВСП	Підсистема виміру потужності споживання
7	ПБЗ	Роз'єм DC 2,5 x 5 з індикацією підключення
8	ПЗБ	Роз'єм DC 2,5 x 5 з індикацією підключення
9	БЗМ	Блок захисту, балансування
10	ПБЗ	Підсистема балансування заряду
11	ПЗБ	Підсистема захисту батареї
12	Б...Б5	Балансирі розсіювання надлишкової потужності
13	БК1...БК5	Батареїні комірки LiFePO4 6Ah
14	ПП1	Вхідні підвищуючі перетворювач
15	ПП2	Понижуючий перетворювач заряду батарей
16	ПОСЗ	Підсистема обмеження зарядного струму
17	ППЗ	Роз'єм DC 2,5 x 5 з індикацією підключення
18	ПП4	Понижуючий перетворювач 12В
19	ПП5	Понижуючий перетворювач 9В
20	ПП6	Понижуючий перетворювач 5В
21	ПМУ	Підсистема моніторингу, управління
22	Б1	Блок індикації

[illegible]



1. Виходи *CTRD*, *CTDS* – підключені до мінусу живлення схеми конденсаторами 1 мкФ
2. F1, 63 – 6,3А обноразового застосування, SMD корпус 1206
4. VT16...VT18 – A004148A

[illegible]

Додаток В

[illegible]

Поз.	Назва	Кіл.	Примітки
R14, R15	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R21, R23	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R24, R27	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R30, R32	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R32, R36	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R41, R43	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R45	10K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R53, R54	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R62-R67	10K 0603 0,1w 5%	6	KOME
R9, R78	10K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R1,R8,R35	10R 0603 0,1w 5%	1	KOME
R75	13,8K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R48-R51	180R 0603 0,1w 5%	4	KOME
R55-R61	18K 0603 0,1w 5%	7	KOME
R68-R70	1K 0603 0,1w 5%	3	KOME
		</	

Поз.	Назва	Кіл.	Примітки
R74, R77	1K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R79, R80	1K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R82	20K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R52	270R 0603 0,1w 5%	1	KOME
R35, R81	2K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R4, R37	33K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R71	3K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R86	4,7K 0603 0,1w 1%	1	KOME
R84	40K 0603 0,1w 1%	1	KOME
R40	44,2K 0603 0,1w 1%	1	KOME
R13	47K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R20-R26	47K 0603 0,1w 5%	3	KOME
R42	49,9K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R44	56K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R72	6,2K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R16, R29	6,8K 0603 0,1w 5%	2	KOME
Зм.	Анк.	№ локум	Підпис
			Лата
PE321.464419.001ПЕ			
Анк.			

Поз.	Назва	Кіл.	Примітки
R85	60K 0603 0,1w 1%	1	KOME
R46	61,9K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R6	64,9K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R19	7,5K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R31	7,5K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R10, R25	8,2K 0603 0,1w 5%	2	KOME
R73	8,6K 0603 0,1w 5%	1	KOME
R76	98,9K 0603 0,1w 1%	1	KOME
<u>Конденсатори</u>			
C23-C29	1 μ F 50V X7R 0805	7	
C32	10 μ F 50V X7R 0805	1	
C13	100 μ F 50V EZV	1	HITANO
C7, C14	100 nF 50V X7R 0603	2	
C10, C11	22 nF 50V X7R 0603	2	
C12, C15	220 μ F 50V EZV	2	HITANO
C17, C19	220 μ F 50V EZV	2	HITANO
Зм.	Арк.	№ локум	Підпис
			Лата
PE321.464419.001ПЕ			
Арк.			

Поз.	Назва	Кіл.	Примітки
С21	220 μ F 50V EZV	1	HITANO
С16, С18	330 μ F 25V EZV	2	HITANO
С20, С22	330 μ F 25V EZV	2	HITANO
С6, С9	330 nF 50V X7R 0603	2	
С1, С2	330pF 50V X7R 0603	2	
С33-С36	33nF 50V X7R 0603	4	
С3,С4	1 μ F 50V X7R 0603	2	
С30, С31	1 μ F 50V X7R 0603	2	
С8	1 μ F 50V X7R 0603	1	
	Індуктивності		
Л1	10 μ H 7A HPS	1	
Л2-Л5	HPS1265-330MT	4	
	<u>Діоди</u>		
VD21-23	1N4148W-TP	1	
VD8	BZX84-С12 SOT-23-2	1	
VD7,	BZX84-С5V1 SOT-23-3	2	
Зм.	Арк.	№ локум	Підпис
			Лата
РЕз21.464419.001ПЕ			
			Арк.

Поз.	Назва	Кіл.	Примітки
VD9	BZX84-C8V2 SOT-23-3	1	
VD12-16	KT-SMD0603-G 0603	5	
VD18-20	MBR0560-TP SOD-123	3	
VD17	MBRD340	1	
VD2,3	PESD5V0S1BSF SOD962	2	
VD1	SMAJ22A DO-214AC	1	
VD4,5	SMF20CA SOD-123F	2	
VD6,11	TL431 SOT-23-3	2	
	<u>Транзистори</u>		
VT1,VT3	AOD4185 TO-252 P-CHANNEL MOSFET	6	
VT4,VT8			
VT9,VT11			
VT16	IFR7807 SO-8 P-CHANNEL MOSFET	6	
VT2,VT6	MMBT2222 SOT-23-3 PNP	2	
VT5,VT7	MMBT2907A SOT-23-3 NPN	2	
VT10,VT1	MMBT3904 SOT-23-3 NPN	2	
VT15-18	2N7002 N-CHANNEL MOSFET	3	

[illegible]

