

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ПАШКОВСЬКИЙ Ігор Петрович

**ПОРТАТИВНИЙ РЕГУЛЬОВАНИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ
АДАПТИВНИЙ ДО ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ /
PORTABLE REGULATED POWER SUPPLY ADAPTIVE TO THE
PARAMETERS OF THE ELECTRICAL NETWORK**

Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Випускна кваліфікаційна робота за ступенем вищої освіти "бакалавр"

Виконав студент групи МТІР-41
Ігор Пашковський

Науковий керівник:
д.т.н., проф. Н.Я. Возна

Дипломну роботу допущено до захисту:
" ____ " _____ 20__ р.

Завідувач кафедри
_____ А.І.Сегін

Тернопіль 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Ступінь вищої освіти "бакалавр"
Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Пашковському Ігорю Петровичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема роботи

Портативний регульований блок живлення адаптивний до параметрів електричної мережі / Portable regulated power supply adaptive to the parameters of the electrical network

керівник роботи _____ д.т.н., проф. Н.Я. Возна

затверджені наказом по університету від "01" грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої дипломної роботи 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи:

- діапазон вхідної напруги: 9–18 В; діапазон вихідної напруги: 0–24 В; максимальний вихідний струм: до 3 А;
- тип перетворювача: імпульсний DC-DC перетворювач типу buck-boost з частотою комутації 300 кГц;
- система керування: мікроконтролер STM32 з реалізацією цифрового PI-регулятора та вимірюванням напруги, струму і температури;
- функціональні можливості: режими CV/CC, наявність захистів (OVP, OCP, OTP) та передача даних через IoT (ESP32, MQTT).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз джерел живлення та топологій DC-DC перетворювачів
2. Проєктування системи адаптивного живлення
3. Розробка та реалізація портативного регульованого блоку живлення

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна схема портативного регульованого джерела живлення
2. Структурна схема контролера силових кіл джерела живлення
3. Структурна схема системи регулювання
4. Блок-схема алгоритму роботи системи керування
5. Графік перехідної характеристики системи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я.		
2	Возна Н.Я.		
3	Возна Н.Я.		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз джерел живлення та топологій DC-DC перетворювачів	12.2025р. – 01.2026р.	
2	Проектування системи адаптивного живлення	02.2026р. – 03.2026р.	
3	Розробка та реалізація портативного регульованого блоку живлення	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

І.П. Пашковський

д.т.н., проф. Н.Я. Возна

АНОТАЦІЯ

Пашковський І.П. Портативний регульований блок живлення адаптивний до параметрів електричної мережі. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», освітньо-професійна програма «Технології інтернету речей». – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі розроблено портативний регульований блок живлення, адаптивний до параметрів електричної мережі. Запропоновано використання імпульсного DC-DC перетворювача типу buck-boost, що забезпечує широкий діапазон регулювання вихідної напруги. Реалізовано систему керування на базі мікроконтролера STM32 із застосуванням цифрового PI-регулятора. Розроблено вимірювальну підсистему та підсистему передачі даних із використанням IoT-технологій (ESP32, MQTT). Виконано моделювання роботи системи в середовищі Matlab/Simulink та проаналізовано її динамічні характеристики. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень.

Ключові слова: портативний блок живлення, DC-DC перетворювач, buck-boost, імпульсний перетворювач, PI-регулятор, мікроконтролер, аналого-цифровий перетворювач, широтно-імпульсна модуляція, IoT, стабілізація напруги, стабілізація струму.

ABSTRACT

Pashkovskiy I.P. Portable regulated power supply adaptive to the parameters of the electrical network. - Manuscript.

Research for the degree of Bachelor in specialty 152 Metrology and Information and Measuring Technology, educational and professional program - Internet of Things Technologies. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

This thesis presents the development of a portable adjustable power supply adaptable to varying electrical network conditions. The proposed design is based on a buck-boost DC-DC switching converter, which provides a wide range of output voltage regulation.

A control system has been implemented using an STM32 microcontroller with a digital PI controller. Additionally, a measurement subsystem and a data transmission subsystem based on IoT technologies (ESP32, MQTT) have been developed.

The system performance was evaluated through simulation in the Matlab/Simulink environment, and its dynamic characteristics were analyzed. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed solutions.

Keywords: portable power supply, DC-DC converter, buck-boost, switching converter, PI controller, microcontroller, analog-to-digital converter, pulse-width modulation, IoT, voltage regulation, current regulation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ТА ТОПОЛОГІЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	10
1.1 Класифікація джерел живлення.....	11
1.2 Топології перетворювачів постійного струму DC-DC.....	14
1.3 Мостовий перетворювач buck-boost.....	17
1.4 Керування перетворювачем.....	21
2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ЖИВЛЕННЯ.....	23
2.1 Загальна структура пристрою.....	23
2.2 Джерело живлення.....	24
2.3 Основний перетворювач.....	26
2.4 Система захисту.....	28
2.5 Система комунікації.....	28
2.6 Допоміжні вузли.....	30
2.7 Вбудований зарядний пристрій акумулятора.....	30
3. РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОРТАТИВНОГО РЕГУЛЬОВАНОВОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ.....	33
3.1 Структура системи керування блоком живлення.....	33
3.2 Секція живлення.....	34
3.3 Мікроконтролер та периферійні вузли.....	36
3.4 Алгоритм роботи системи.....	44
3.5 Виконавча частина основного перетворювача.....	46
3.6 Вимірювальна підсистема.....	47
3.7 Реалізація регулятора.....	50
3.8 Програмна реалізація системи керування.....	52

					ДП.МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Портативний регульований блок живлення адаптивний до параметрів електричної мережі / Portable regulated power supply adaptive to the parameters of the electrical network	Літ.	Арк.	Акрушіє
Розроб.		Пашковський І.П.						
Перевір.		Возна Н.Я.					5	58
Консульт.		Возна Н.Я.				ЗУНУ.ФКІТ.МТІР-41		
Н. Контр.								
Затверд.		Сегін А.І.						

ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТКИ.....	58

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ADC (Analog-to-Digital Converter) – аналого-цифровий перетворювач;
BMS (Battery Management System) – система керування акумуляторною батареєю;
CC (Constant Current) – режим стабілізації струму;
CV (Constant Voltage) – режим стабілізації напруги;
DC (Direct Current) – постійний струм;
DC-DC – перетворювач постійної напруги;
ESP32 – мікроконтролер із підтримкою бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth;
HRTIM (High Resolution Timer) – таймер високої роздільної здатності;
IoT (Internet of Things) – Інтернет речей;
MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – протокол обміну повідомленнями для IoT;
PWM (Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція;
PI-регулятор (Proportional-Integral Controller) – пропорційно-інтегральний регулятор;
STM32 – сімейство 32-бітних мікроконтролерів на базі ARM Cortex;
UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний приймач-передавач;
USB (Universal Serial Bus) – універсальна послідовна шина;
 V_{in} – вхідна напруга;
 V_{out} – вихідна напруга;
 I_{out} – вихідний струм;
 f_{sw} – частота комутації;
D – коефіцієнт заповнення PWM.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток електронних систем, вбудованих пристроїв та технологій Інтернету речей (IoT) зумовлює зростання вимог до джерел живлення, які повинні забезпечувати стабільні параметри електроенергії в умовах змінного навантаження та нестабільних параметрів вхідної мережі. Особливої актуальності набувають портативні джерела живлення, здатні працювати автономно та адаптуватися до змін вхідної напруги, забезпечуючи при цьому високі показники енергоефективності та точності вимірювання параметрів.

Додатково, інтеграція вимірювальних функцій і засобів передавання даних у таких пристроях відкриває можливості для їх використання як елементів розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Це дозволяє здійснювати віддалений моніторинг, аналіз та керування параметрами електроживлення в реальному часі. У зв'язку з цим розробка адаптивного портативного джерела живлення з функціями вимірювання та передавання даних є актуальною науково-технічною задачею.

Метою роботи є розробка портативного регульованого блоку живлення, адаптивного до параметрів електричної мережі, з реалізацією функцій вимірювання, стабілізації та передавання даних на основі мікроконтролерного керування та технологій Інтернету речей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз існуючих типів джерел живлення та топологій перетворювачів напруги;
- обґрунтувати вибір структурної схеми та елементної бази пристрою;
- розробити електричну схему джерела живлення на основі перетворювача типу buck-boost;
- реалізувати алгоритм керування, що забезпечує стабілізацію вихідних параметрів та адаптацію до змін вхідної напруги;

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- виконати моделювання роботи пристрою в середовищі Matlab/Simulink та проаналізувати його характеристики;
- реалізувати підсистему збору, обробки та передачі вимірювальних даних із використанням IoT-технологій.

Об’єкт дослідження. Процес перетворення, стабілізації та адаптивного керування параметрами електричної енергії в портативних джерелах живлення.

Предмет дослідження. Адаптивний портативний блок живлення на основі buck-boost перетворювача з цифровим керуванням.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблене портативний адаптивний блок живлення може бути використаний для живлення, налагодження та тестування електронних пристроїв у нестандартних умовах. Завдяки реалізації функцій стабілізації напруги та струму, а також наявності вимірювальних каналів, пристрій може застосовуватись як універсальне джерело живлення з функціями контролю параметрів електричної енергії.

Інтеграція технологій Інтернету речей забезпечує можливість віддаленого моніторингу та керування параметрами пристрою, що розширює сферу його застосування у складі розподілених інформаційно-вимірювальних систем. Реалізовані алгоритми адаптації до параметрів вхідної мережі дозволяють підвищити ефективність і надійність роботи пристрою в умовах нестабільного електроживлення.

Апробація. Наталія Возна. Адаптивні системи електроживлення з інтегрованими інформаційно-вимірювальними засобами контролю та діагностики / Н.Возна, І.Пашковський, С.Луцишин / Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026). - Тернопіль, 2026. – С.83-86.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ТА ТОПОЛОГІЙ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Дослідження у галузі виробництва та використання електричної енергії сприяли розвитку електротехніки та електроніки, а також появі перших споживчих електричних приладів. Важливою подією у 1940-х роках було створення першого транзистора, який пізніше став основним елементом для побудови складних логічних схем, зокрема мікропроцесорів. Це дало змогу створити перші комп'ютери.

Розвиток електроніки також вплинув на промисловий сектор, забезпечивши повну автоматизацію, а згодом і роботизацію виробничих процесів. Незалежно від класу, типу чи конструкції, кожен новий електронний пристрій повинен відповідати певним вимогам. Для цього на першому етапі створюють прототип, який надалі удосконалюють, поступово розширюючи його можливості та функціонал. Особливо важливу роль під час удосконалення прототипу відіграє процес тестування, у ході якого перевіряється правильність функціонування та безпечність роботи пристрою.

Важливим елементом цих дій є належне живлення перевірюваної конструкції. Точний контроль параметрів джерела живлення є необхідним, оскільки він знижує ризик пошкодження пристрою у разі помилок, допущених на етапі проєктування або експлуатації. Подібні вимоги стосуються також живлення вже функціонуючих пристроїв.

Контроль значень напруги, струму або потужності, що споживається навантаженням, а також моніторинг цих параметрів зазвичай здійснюється за допомогою лабораторних джерел живлення. Такі пристрої забезпечують можливість регулювання параметрів та оснащені засобами захисту, що гарантує надійність і безпечність їх використання.

Однак основним недоліком традиційних лабораторних джерел живлення є необхідність постійного підключення до електромережі. Це ускладнює використання таких пристроїв на віддалених об'єктах.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

З огляду на сучасні тенденції розвитку інформаційно-вимірювальних систем та технологій Інтернету речей, актуальним є створення портативних джерел живлення, здатних не лише забезпечувати стабілізовані параметри електроенергії, але й здійснювати вимірювання, обробку та передачу даних у режимі реального часу.

Вирішенням зазначених обмежень є розробка портативного адаптивного блоку живлення, яке поєднує можливість автономної роботи, точного регулювання параметрів та інтелектуального керування на основі аналізу вхідних і вихідних електричних величин. Використання акумуляторів як основного джерела енергії дозволяє забезпечити мобільність пристрою та незалежність від стаціонарної електромережі.

У даній роботі розглянуто питання розробки та дослідження портативного регульованого блоку живлення з адаптацією до параметрів електричної мережі. Проведено моделювання роботи пристрою та аналіз його характеристик. Результати дослідження наведено в наступних розділах роботи.

У даному розділі використано літературні джерела [1-9].

1.1 Класифікація джерел живлення

Джерело живлення є невід'ємною складовою будь-якого електронного пристрою, оскільки забезпечує його необхідною електричною енергією для функціонування. Залежно від призначення, умов експлуатації та технічних вимог існує кілька підходів до класифікації джерел живлення.

За первинним джерелом енергії вони поділяються на:

- джерела живлення змінного струму (AC-DC), що працюють від електричної мережі;

- джерела живлення постійного струму (DC-DC), які використовують акумулятори або інші джерела постійної напруги.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Іншим важливим критерієм є наявність стабілізації вихідної напруги. Відповідно до цього джерела поділяються на:

- стабілізовані, що забезпечують постійне значення вихідної напруги незалежно від змін навантаження або вхідної напруги;
- нестабілізовані, у яких вихідна напруга залежить від зовнішніх факторів.

Залежно від принципу роботи елементів регулювання джерела живлення поділяються на:

- лінійні;
- імпульсні.

Лінійні джерела живлення характеризуються простотою реалізації та низьким рівнем пульсацій вихідної напруги, проте мають низьку енергоефективність через значні втрати потужності на регулюючих елементах. Потужність втрат у лінійному стабілізаторі визначається виразом:

$$P_{\text{втр}} = I(U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}),$$

де: $U_{\text{вх}}$ – нестабілізована вхідна напруга,

$U_{\text{вих}}$ – стабілізована вихідна напруга,

I – струм, що споживається навантаженням.

На рисунку 1.1 зображено схему регулятора напруги з лінійним принципом роботи.

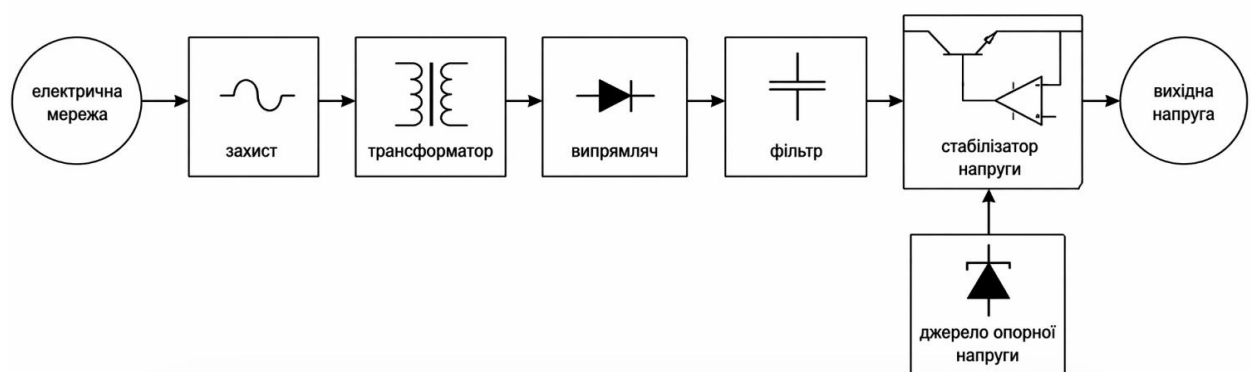


Рисунок 1.1 – Схема секції безперервного живлення

Імпульсні джерела живлення працюють за принципом перетворення енергії з використанням ключових елементів. Імпульсні системи

регулювання характеризуються іншим принципом дії. Вони функціонують на основі перетворення електричної енергії в інший вид енергії з метою тимчасового накопичення її надлишку.

Такий підхід дозволяє значно підвищити коефіцієнт корисної дії (до 80–95%). Завдяки цьому вони широко застосовуються у сучасних електронних пристроях, зокрема в портативних системах.

На рисунку 1.2 показано схему регулятора напруги з імпульсним принципом роботи.

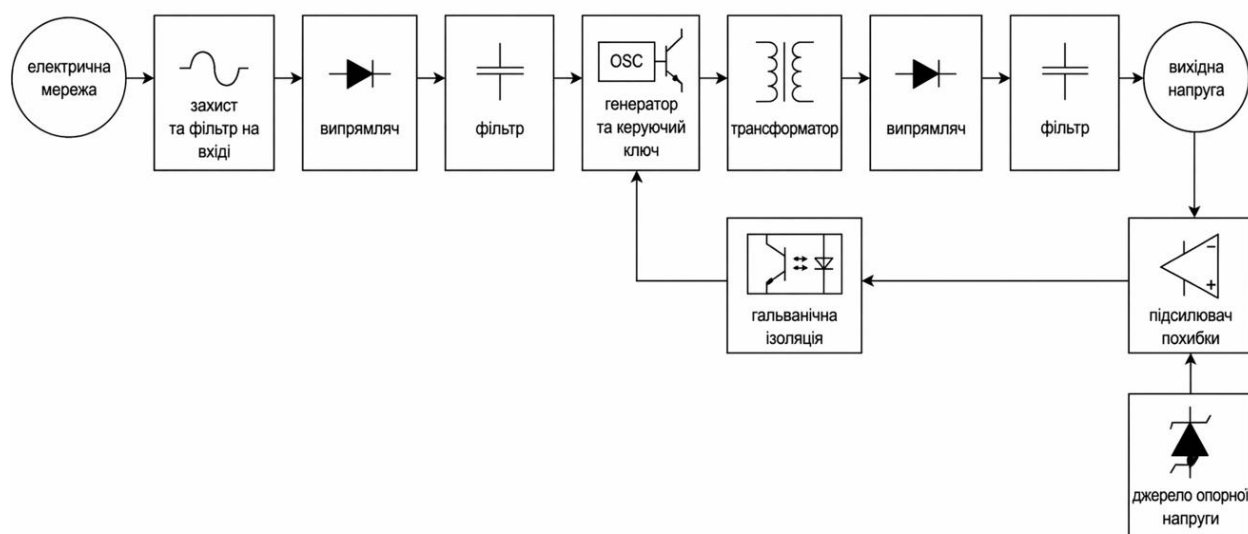


Рисунок 1.2 - Схема секції живлення з імпульсним режимом роботи

З точки зору інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) важливою характеристикою джерел живлення є можливість контролювати їх параметри. Сучасні джерела живлення все частіше оснащуються засобами вимірювання напруги, струму та температури, що дозволяє здійснювати моніторинг режимів роботи та підвищувати надійність функціонування електронних пристроїв.

У таких системах вимірювання параметрів реалізується за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) мікроконтролерів.

Крім того, сучасні джерела живлення можуть інтегруватися до складу інформаційно-комунікаційних систем, що забезпечує можливість передачі вимірювальних даних та дистанційного контролю параметрів. Це особливо

актуально для портативних та автономних пристроїв, які використовуються в умовах обмеженого доступу до стаціонарної інфраструктури.

Таким чином, аналіз класифікації джерел живлення показує доцільність використання імпульсних перетворювачів постійного струму у поєднанні з мікроконтролерним керуванням та засобами вимірювання параметрів, що є основою для побудови сучасних адаптивних джерел живлення.

1.2 Топології перетворювачів постійного струму DC-DC

На відміну від лінійних стабілізаторів, імпульсні перетворювачі постійного струму (DC-DC) забезпечують високу ефективність перетворення енергії та є основою сучасних систем живлення, особливо в портативних і вбудованих пристроях.

Принцип роботи імпульсних перетворювачів ґрунтується на періодичному перемиканні ключового елемента, що дозволяє накопичувати енергію в реактивних елементах (індуктивностях або конденсаторах) та передавати її до навантаження з мінімальними втратами. Регулювання вихідної напруги здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення (duty cycle) сигналу широтно-імпульсної модуляції (PWM).

Залежно від характеру перетворення напруги, розрізняють основні топології DC-DC перетворювачів:

- понижуючі (buck);
- підвищуючі (boost);
- понижувально-підвищуючі (buck-boost).

Понижуючий перетворювач (buck) призначений для зменшення рівня вхідної напруги до заданого значення. Його робота базується на періодичному відкриванні та закриванні ключового елемента, що дозволяє регулювати середнє значення вихідної напруги.

Коли ключ замкнений, струм протікає як через навантаження, так і через індуктивний елемент. Під час розмикання ключа індуктивний елемент

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

передає накопичену в магнітному полі енергію до навантаження через напівпровідниковий діод. За фільтрацію пульсацій вихідної напруги відповідає конденсатор, підключений до вихідних клем схеми.

Спрощену схему цієї топології наведено на рисунку 1.3. Існуюча структура перетворювача включає U – джерело напруги, S – ключ, L – індуктивність, D – діод, C – конденсатор та R – навантаження.

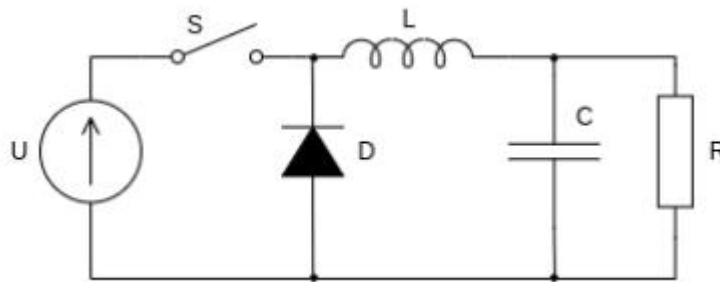


Рисунок 1.3 – Схема понижуючого перетворювача (buck)

У сталому режимі ідеального перетворювача виконується співвідношення:

$$U_{\text{out}} = D \cdot U_{\text{in}},$$

де D - коефіцієнт заповнення PWM (від 0 до 1).

Підвищуючий перетворювач (boost) використовується для збільшення вхідної напруги до необхідного рівня. Принцип його роботи полягає у накопиченні енергії в індуктивності під час замкнутого стану ключа та передачі цієї енергії до навантаження при його розмиканні.

У випадку підвищуючих перетворювачів ключовий елемент також керується за допомогою сигналу PWM. Коли ключ замкнений, енергія накопичується в магнітному полі індуктивної котушки. Під час розмикання ключа накопичена енергія віддається завдяки явищу самоіндукції.

Напруга самоіндукції, що виникає при цьому, додається до напруги джерела, підвищуючи вихідну напругу стабілізатора. Діод, підключений послідовно з навантаженням, запобігає зворотному протіканню струму до джерела. Пульсації напруги згладжує фільтруючий конденсатор.

Спрощену схему перетворювача такого типу показано на **рисунку 1.4.**

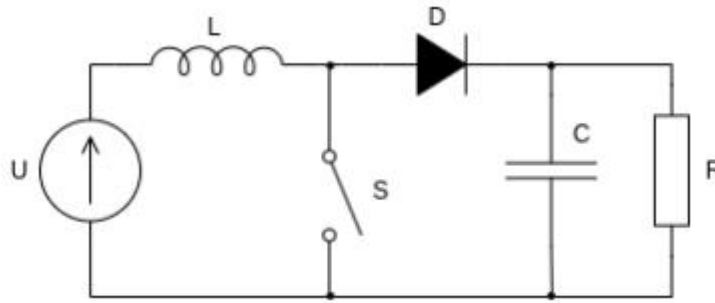


Рисунок 1.4 – Схема підвищуючого перетворювача (boost)

Для ідеального випадку без урахування втрат вихідна напруга визначається як:

$$U_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вх}}}{1-D}.$$

Понижувально-підвищуючий перетворювач (buck-boost) поєднує властивості двох попередніх топологій і дозволяє як зменшувати, так і збільшувати вхідну напругу.

Це особливо важливо для портативних пристроїв, у яких напруга джерела живлення (наприклад, акумулятора) може змінюватися в широкому діапазоні.

Існує кілька типів перетворювачів, які працюють у режимі buck-boost. З огляду на їхні параметри, невеликі розміри та простоту реалізації було вирішено виділити синхронні конструкції, що базуються на каскадному поєднанні топологій buck і boost. Термін «синхронна робота» означає заміну напівпровідникових діодів додатковими ключами [10].

У такому випадку необхідно узгодити часові інтервали поперемінної роботи обох ключів у межах кожного каскаду. Приклад реалізації каскадного перетворювача показано на **рисунку 1.5**.

Для ідеального випадку:

$$U_{\text{вих}} = \frac{D}{1-D} \cdot U_{\text{вх}}.$$

З точки зору ІВС важливо, що робота DC-DC перетворювачів супроводжується змінами електричних параметрів у часі, що потребує їх

постійного контролю. Для цього використовуються вимірювальні канали напруги та струму, сигнали з яких надходять на аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера.

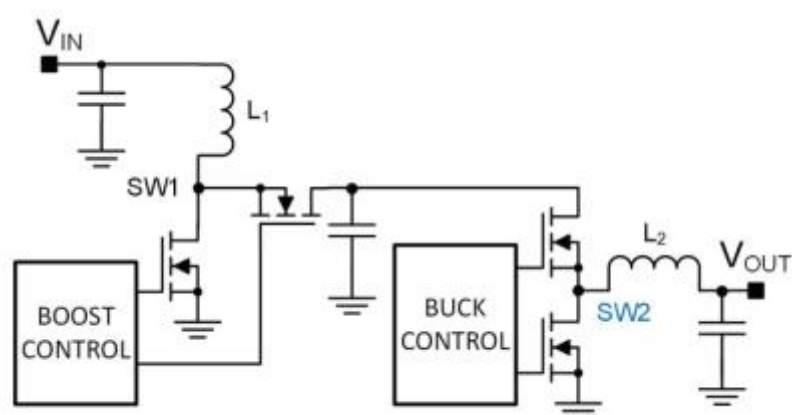


Рисунок 1.5 – Схема перетворювача buck-boost

Отримані цифрові дані можуть бути використані для реалізації зворотного зв'язку, що забезпечує стабілізацію вихідних параметрів, а також для передачі в інформаційні системи моніторингу.

1.3 Мостовий перетворювач buck-boost

Усунути обмеження каскадної топології, розглянутої в попередньому підрозділі, дозволяє її перетворення у мостову структуру. Реалізацію такого перетворення здійснено шляхом об'єднання двох індуктивних елементів та усунення фільтруючих конденсаторів у місці з'єднання каскадних ланок.

Керування таким перетвореним каскадним колом може бути реалізоване за допомогою одного керуючого пристрою. Перетворення каскадної схеми на мостову показано на рисунку 1.6.

Керування мостовим перетворювачем у такому випадку здійснюється в трьох режимах (buck, boost, buck-boost) [12].

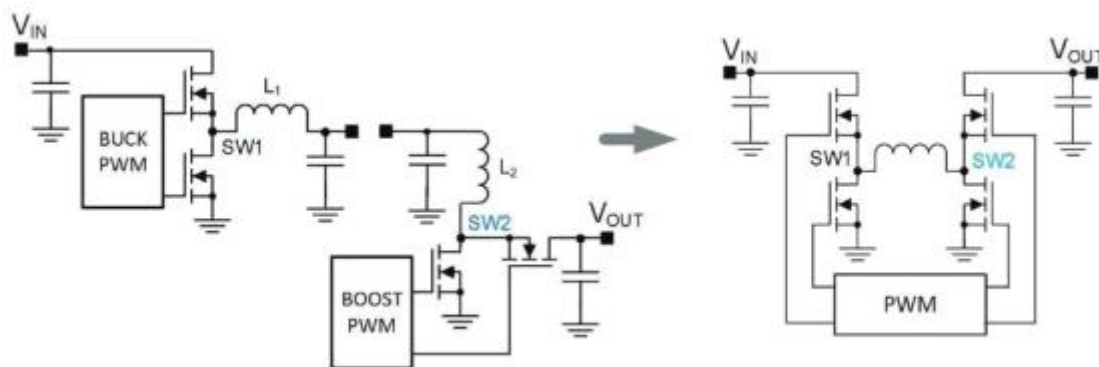


Рисунок 1.6 - З'єднання двох каскадних імпульсних стабілізаторів у мостову конструкцію [3]

У режимі buck вихідна напруга V_{out} є меншою за вхідну напругу V_{in} . Робота в цьому режимі базується на функціонуванні понижувального каскаду, на ключі якого подається сигнал PWM. При цьому елементи підвищувального каскаду забезпечують безперервність струму до навантаження.

Верхній ключ підвищувального каскаду при цьому залишається замкненим, що забезпечує протікання струму до навантаження. Керування в режимі buck показано на рисунку 1.7.

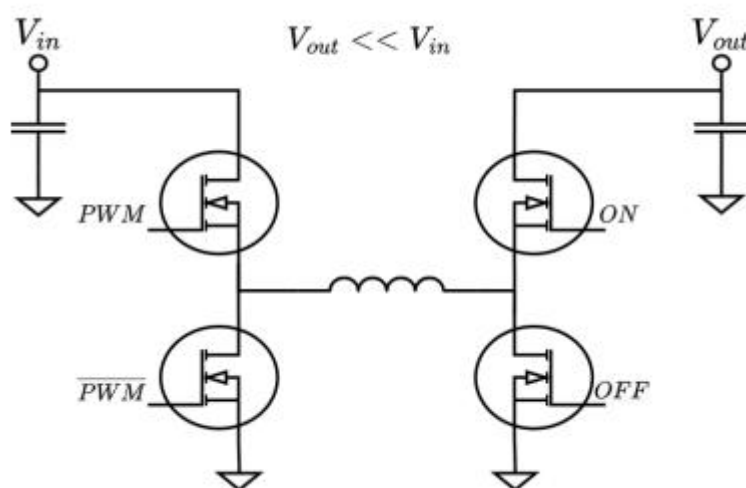


Рисунок 1.7 - Керуючі сигнали мостового перетворювача в режимі buck

Режим boost базується на роботі підвищувального каскаду. Активні елементи цього каскаду керуються PWM-сигналом. Ключі понижувального

каскаду забезпечують протікання струму від джерела живлення до всієї схеми. Керування в режимі boost показано на рисунку 1.8.

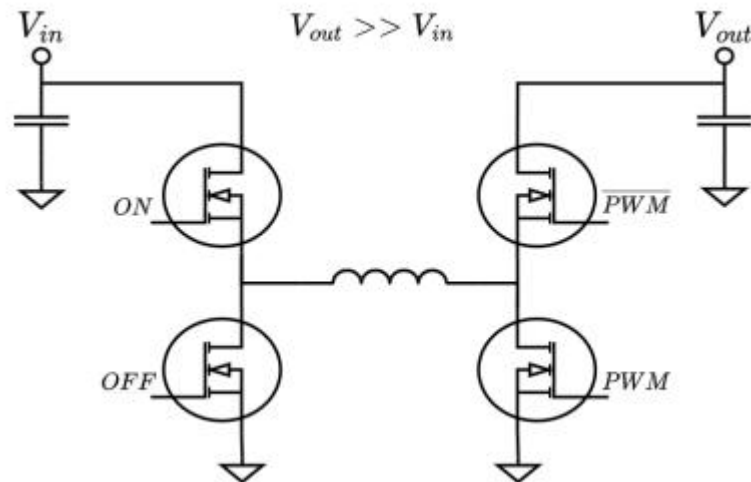


Рисунок 1.8 - Керуючі сигнали мостового перетворювача в режимі boost

Введення режиму buck-boost для мостового перетворювача є необхідним тоді, коли задану вихідну напругу неможливо досягти жодним із раніше описаних режимів. Така ситуація виникає, коли значення вихідної напруги V_{out} вхідної напруги V_{in} є близькими.

У цьому режимі обидва каскади працюють одночасно, що дозволяє плавно регулювати напругу в усьому робочому діапазоні.

Керування виконавчою частиною перетворювача в цьому режимі показано на рисунку 1.9.

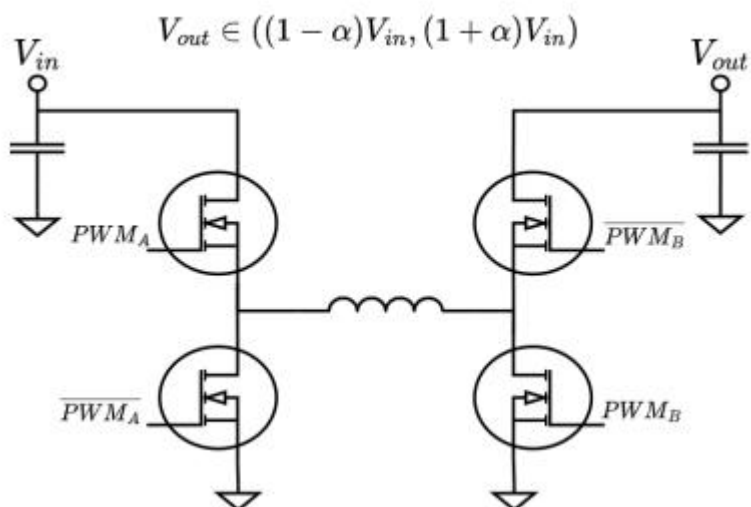


Рисунок 1.9 - Керуючі сигнали мостового перетворювача в режимі buck-boost

Діапазон роботи режиму buck-boost визначається коефіцієнтом (α), який обирається таким чином, щоб забезпечити перекриття робочих областей усіх режимів. Це дозволяє реалізувати безперервне регулювання вихідної напруги без стрибків і розривів і забезпечується повний діапазон вихідних напруг. Діапазони роботи окремих режимів перетворювача зображено на рисунку 1.10.

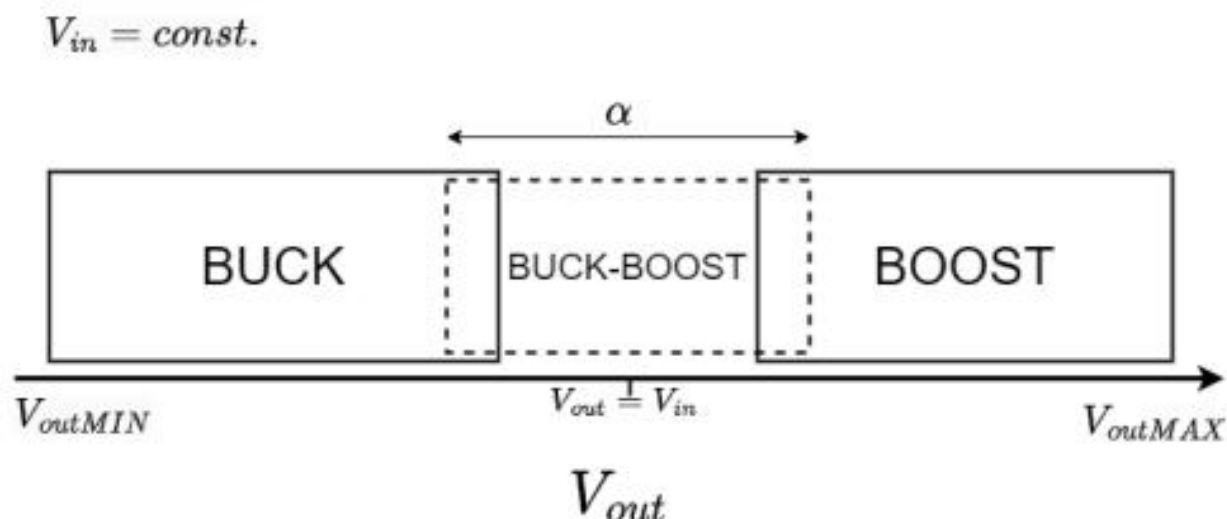


Рисунок 1.10 - Діапазони роботи окремих режимів мостового перетворювача buck-boost

З точки зору ІВС, робота мостового перетворювача потребує постійного контролю параметрів, таких як вхідна та вихідна напруга, струм навантаження та температура силових елементів. Отримані вимірювальні дані використовуються для реалізації зворотного зв'язку та забезпечення адаптивного керування режимами роботи перетворювача.

Таким чином, застосування мостової топології перетворювача buck-boost дозволяє забезпечити широкий діапазон регулювання напруги, високу ефективність та можливість реалізації інтелектуального керування, що є визначальними факторами для використання цієї архітектури в даному проєкті.

1.4 Керування перетворювачем

Першим етапом у процесі проєктування розроблюваного перетворювача є визначення параметрів індуктивного елемента. Значення цих параметрів визначають частоту роботи перетворювача.

Першим із визначених параметрів є мінімальна індуктивність, що дозволяє обрати робочу частоту перетворювача. Для перетворювачів типу buck-boost вона визначається за виразом: (1.1) [3].

$$L_{MIN} = \frac{V_{IN(min)}^2 (V_{OUT(max)} - V_{IN(min)})}{I_{RIPPLE} F_{SW} V_{OUT(max)}^2}, \quad (1.1)$$

де: $V_{in(min)}$ – мінімальна вхідна напруга,

- $V_{out(max)}$ – максимальна вихідна напруга,
- I_{ripple} – струм пульсацій індуктора, зазвичай $I_{ripple} = (0.2-0.4) \cdot I_{out(max)}$,
- F_{sw} – частота роботи перетворювача.

Другим параметром є струм насичення індуктивного елемента, що разом із визначеною індуктивністю дозволяє встановити габарити індуктора, які в проєкті мінімізуються з огляду на особливості конструкції.

Мінімальне значення струму насичення, яке повинен забезпечувати обраний індуктор, визначається за формулою (1.2):

$$I_{L(SAT)} = 1.3 \cdot \left(\frac{V_{OUT(max)} I_{OUT(max)}}{0.9 V_{IN(min)}} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} \right), \quad (1.2)$$

де: $I_{out(max)}$ – максимальний вихідний струм.

Розрахунок зазначених параметрів виконувався на основі прийнятих робочих характеристик перетворювача, наведених у таблиці 1.1.

Зазначені параметри індуктивного елемента були обчислені на основі прийнятих робочих характеристик перетворювача, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Прийняті робочі параметри перетворювача

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Параметр	Значення
$V_{IN(MIN)}$	10.8V
$V_{OUT(MAX)}$	24V
$I_{OUT(MAX)}$	3A
I_{RIPPLE}	1.2A
F_{SW}	300kHz

Після підстановки значень із таблиці 1.1 у формули (1.1) та (1.2) отримано такі результати:

$$L_{MIN} = 8.49\mu\text{H}, \quad I_{L(SAT)} = 16.73\text{A}.$$

На основі цих розрахунків обрано індуктивний елемент із параметрами, наведеними в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Параметри обраного індуктивного елемента

Параметр	Значення
Індуктивність	10 μ H
Допуск	$\pm 20\%$
Опір DC	10.6m Ω
Максимальний струм DC	21A
Струм насичення	22A
Габарити	17.8mm $\times$ 16.9mm $\times$ 6.7mm
Тип монтажу	SMD/SMT

З огляду на відносно високу частоту роботи, застосований контролер повинен забезпечувати відповідну швидкодію регулювання. Це означає, що керуючий пристрій має мати можливість генерації прямокутного сигналу високої частоти зі змінним коефіцієнтом заповнення (PWM) та достатньою роздільною здатністю. Крім того, необхідною є можливість швидкого збору та обробки вимірювальної інформації.

2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ЖИВЛЕННЯ

2.1 Загальна структура пристрою

У роботі розроблено схему перетворювача з регульованою вихідною напругою, керовану за допомогою мікроконтролера. Виконавчу частину основного перетворювача джерела живлення побудовано на основі топології, описаної в попередньому розділі. Паралельно проводилась розробка підсистеми керування та інтерфейсу користувача. Такий підхід дозволяє реалізувати не лише перетворення енергії, але й функції контролю, налаштування та моніторингу параметрів роботи пристрою.

У даному розділі використано літературні джерела [10-18].

Структурну організацію розробленої системи керування та перетворення енергії наведено на рисунку 2.1. Розроблений пристрій розглядається як інтегрована система, що включає виконавчу частину, підсистему керування, вимірювальну підсистему та інтерфейс користувача.

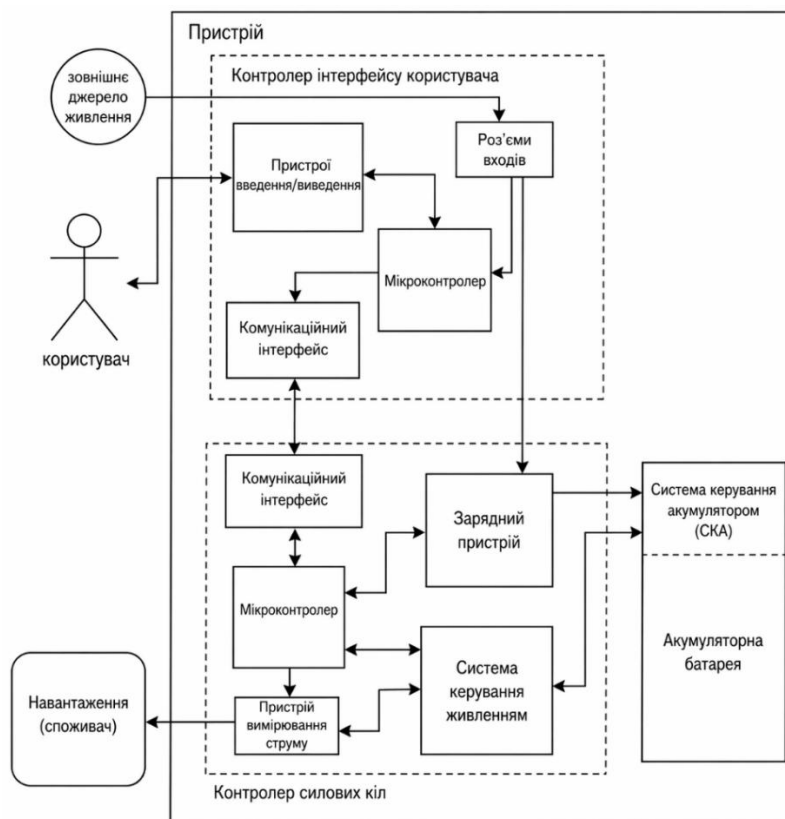


Рисунок 2.1 – Структурна схема портативного блоку живлення

Враховуючи вимоги та припущення, сформульовані в попередніх розділах, а також з урахуванням обраної топології виконавчої частини, визначено основні параметри та функціональні характеристики системи.

З точки зору інформаційно-вимірювальної техніки, структура пристрою передбачає наявність вимірювальних каналів напруги, струму та температури, сигнали з яких надходять до мікроконтролера для подальшої обробки. Отримані дані використовуються для реалізації зворотного зв'язку та забезпечення стабілізації вихідних параметрів.

Крім того, архітектура системи передбачає можливість передачі вимірювальної інформації через комунікаційний інтерфейс, що забезпечує інтеграцію пристрою до сучасних інформаційно-вимірювальних систем та реалізацію функцій віддаленого моніторингу.

2.2 Джерело живлення

З огляду на вимоги до мобільності пристрою, як первинне джерело живлення обрано акумулятор. Технологія виготовлення накопичувача енергії повинна забезпечувати відповідний рівень напруги та струмову віддачу.

Ці параметри повинні бути підібрані таким чином, щоб забезпечити максимальний час роботи пристрою при одночасному збереженні мінімальних габаритів і маси.

На рисунку 2.2 наведено значення енергетичної щільності для найпоширеніших типів акумуляторних елементів.

На основі аналізу рисунку 2.2 прийнято рішення використовувати джерело живлення на основі літій-іонних елементів. Ці елементи пропонують найвищу енергетичну щільність.

Застосування літій-іонних елементів у конструкції акумулятора для розроблюваного пристрою дозволяє забезпечити тривалий час роботи, зберегти невелику масу та компактні габарити пристрою, одночасно підвищуючи ефективність акумулятора.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

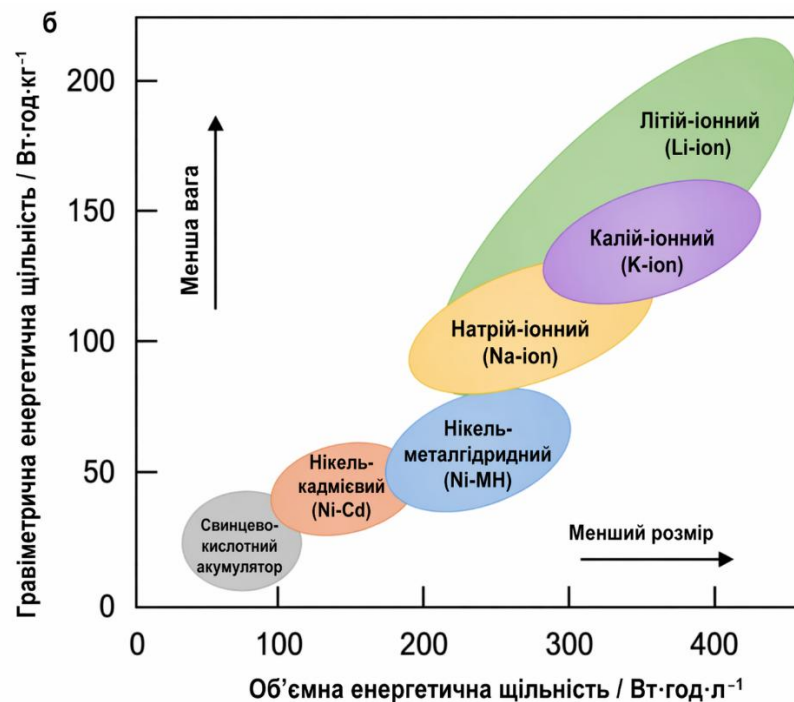


Рисунок 2.2 - Порівняння енергетичної щільності різних типів акумуляторів

У результаті сформовано акумуляторну батарею, що складається з 12 елементів у конфігурації 4S2P. Це означає, що виконано чотири послідовні з'єднання між елементами, причому кожне послідовне з'єднання містить два елементи, з'єднані паралельно. Використано літій-іонні елементи LG INR18650 MJ1.

Вихідні затискачі батареї елементів підключено до системи керування батареєю (Battery Management System – BMS), яка забезпечує контроль напруги, струму та температури, а також реалізує функції захисту від перезаряду, перерозряду та перевантаження. Основні параметри використаної акумуляторної батареї наведено в таблиці 2.1 [7].

Таблиця 2.1 - Параметри використаної батареї елементів

Параметр	Значення
Мінімальна вихідна напруга	10 В
Номінальна напруга	14,4 В
Максимальна напруга	16,8 В
Максимальний струм заряджання	6,8 А

Максимальний струм розрядження	20 А
Ємність	6800 мА·год
Енергія	97,92 Вт·год
Габарити	85,5 мм × 70 мм × 50,5 мм

Параметри акумулятора підлягають постійному контролю за допомогою вимірювальних каналів, сигнали з яких обробляються мікроконтролером. Це дозволяє реалізувати моніторинг стану джерела живлення та підвищити надійність функціонування пристрою в цілому.

2.3 Основний перетворювач

Під час проектування виконавчого вузла регульованого джерела живлення необхідно визначити певний набір параметрів, які забезпечуватиме готовий пристрій.

У таблиці 2.2 наведено проєктні параметри роботи основного перетворювача. Обрані значення параметрів дозволяють оптимізувати вартість виготовлення пристрою відносно його продуктивності та забезпечити універсальність його застосування. Робочі параметри перетворювача обрано на основі розрахунків, виконаних у попередньому розділі. Зокрема, діапазон вхідної напруги 9–18 В відповідає робочому діапазону акумуляторної батареї, що забезпечує стабільну роботу перетворювача в усіх режимах експлуатації.

Таблиця 2.2 - Параметри роботи основного перетворювача

Параметр	Значення
Діапазон вхідної напруги	9 В – 18 В
Діапазон вихідної напруги	0 В – 24 В
Діапазон вихідного струму	0 А – 3 А
Роздільна здатність встановлення вихідної	100 мВ

напруги	
Роздільна здатність встановлення вихідного струму	10 мА
Максимальна вихідна потужність	72 Вт
Робоча частота	300 кГц
Коефіцієнт корисної дії при $P_{\max}$	80 %

Заданий діапазон вихідної напруги (0–24 В) та струму (до 3 А) дозволяє використовувати пристрій для живлення широкого спектру електронних навантажень. При цьому максимальна вихідна потужність становить 72 Вт, що відповідає вимогам до портативних джерел живлення середньої потужності.

Встановлена роздільна здатність регулювання напруги (100 мВ) та струму (10 мА) забезпечує достатню точність налаштування параметрів, що є важливим для інформаційно-вимірювальних застосувань та тестування електронних пристроїв.

Робоча частота перетворювача обрана на рівні 300 кГц, що дозволяє зменшити габарити індуктивних елементів та підвищити швидкодію системи керування. При цьому коефіцієнт корисної дії на рівні 80% при максимальному навантаженні підтверджує доцільність використання імпульсної топології.

Крім того, передбачено, що пристрій підтримуватиме три режими роботи основного перетворювача:

- CV (Constant Voltage) - режим стабілізації вихідної напруги;
- CC (Constant Current) - режим стабілізації вихідного струму;
- BP (ByPass) - режим прямого підключення до напруги акумулятора.

Реалізація зазначених режимів здійснюється на основі аналізу вимірюваних значень напруги та струму, що дозволяє забезпечити адаптивне керування роботою перетворювача залежно від умов навантаження та параметрів джерела живлення.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.4 Система захисту

Конструкція, що проєктується оснащена низкою захистів, що забезпечують безпечну та надійну роботу пристрою в різних режимах експлуатації, а саме:

- захист від перенапруги (OverVoltage Protection – OVP) запобігає пошкодженню пристрою у разі надмірного підвищення вхідної або вихідної напруги;
- захист від перевантаження за струмом (Overcurrent Protection – OCP) запобігає пошкодженню пристрою у разі перевищення максимального струму, який споживається з його виходів;
- захист від перегріву (OverTemperature Protection – OTP) запобігає пошкодженню пристрою у разі перевищення допустимої температури внутрішніх елементів конструкції.

Спрацювання хоча б одного з описаних захистів під час роботи джерела живлення приведе до автоматичного припинення роботи основного перетворювача. Таким чином, будуть вимкнені всі його додаткові функції, а пристрій перейде в аварійний режим.

Вимкнення виконавчих модулів реалізується за допомогою схем апаратного та програмного блокування, що забезпечує швидку реакцію системи та підвищує загальну надійність пристрою.

Час спрацювання захистів визначається швидкодією вимірювальної підсистеми та алгоритмом обробки даних.

2.5 Система комунікації

Передбачено, що контролер силових кіл здійснює зв'язок з іншими модулями пристрою за допомогою асинхронної послідовної шини UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Обмін даними організовано у

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

двосторонньому режимі, що забезпечує можливість як передавання, так і прийому інформації.

Застосування UART дозволяє реалізувати моніторинг стану пристрою, встановлення користувачем необхідних вихідних параметрів, а також керування додатковими функціями. Для підвищення ефективності обробки даних передбачено використання неблокуючого режиму обміну, що забезпечує високу швидкодію системи керування перетворювачем.

З точки зору інформаційно-вимірювальної системи, через комунікаційний інтерфейс передаються результати вимірювання напруги, струму та температури, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг параметрів пристрою.

Для розширення функціональних можливостей системи передбачено використання додаткового комунікаційного модуля на базі мікроконтролера ESP32, який забезпечує бездротову передачу даних через мережу Wi-Fi. Обмін інформацією між основним контролером та модулем ESP32 здійснюється через інтерфейс UART зі швидкістю 115200 бод.

Передача даних у мережу реалізується за протоколом MQTT, що дозволяє інтегрувати пристрій до інформаційно-вимірювальних систем та здійснювати моніторинг його параметрів у режимі реального часу. Передавання вимірювальної інформації виконується з періодом 1с у вигляді структурованих повідомлень.

Крім того, передбачено використання додаткових засобів діагностики, зокрема світлодіодних індикаторів та окремого каналу UART, що застосовуються під час розробки програмного забезпечення та налагодження пристрою. Це дозволяє вчасно виявляти та усувати можливі помилки в роботі системи.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.6 Допоміжні вузли

Під час проєктування пристрою передбачено реалізацію додаткових функцій, що розширюють його можливості та підвищують зручність експлуатації.

Однією з таких функцій є можливість підключення зовнішніх споживачів через інтерфейс USB. Завдяки використанню відповідних схемотехнічних рішень забезпечується швидке заряджання підключених пристроїв відповідно до стандарту USB Quick Charge 3.0.

Параметри процесу заряджання, зокрема напруга та струм, що узгоджуються з підключеним пристроєм, перебувають під постійним контролем за допомогою вимірювальних вузлів. Це дозволяє забезпечити безпечний режим роботи та оптимальні умови заряджання.

До допоміжних підсистем також належать вузли контролю температури та системи охолодження. Вимірювання температури здійснюється за допомогою відповідних сенсорів, сигнали з яких обробляються мікроконтролером.

На основі отриманих даних реалізується керування роботою вентиляторів, що дозволяє підтримувати допустимий температурний режим пристрою при змінних навантаженнях. Такий підхід забезпечує підвищення надійності та довговічності елементної бази.

З точки зору інформаційно-вимірювальної системи допоміжні вузли забезпечують додатковий контроль параметрів та розширюють функціональність пристрою, інтегруючи його в комплексну систему моніторингу та керування.

2.7 Вбудований зарядний пристрій акумулятора

У проєкті передбачено реалізацію вбудованого зарядного пристрою для акумулятора, який забезпечує живлення всієї конструкції. У зв'язку з цим

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

визначено тип та параметри джерел енергії, що можуть використовуватись для заряджання.

З метою вибору оптимальних характеристик зарядного вузла проведено аналіз поширених зовнішніх джерел живлення. Результати аналізу наведено в таблиці 2.3, де представлено найбільш типові джерела енергії, що використовуються в побутових умовах.

Таблиця 2.3 - Популярні зовнішні джерела живлення

Джерело живлення	Напруга / діапазон напруг	Максимальний струм
Зовнішній стабілізований блок живлення	5 В – 24 В	5 А
Зарядний пристрій, сумісний із USB BC1	5 В	5 А
Зарядний пристрій, сумісний із USB QC 3.0	5 В – 12 В	3 А
Зарядний пристрій, сумісний із USB PD2	5 В – 20 В	5 А
Зарядний пристрій для ноутбука	15 В – 20 В	7 А
Гелевий акумулятор	9 В – 14,4 В	10 А

На основі проведеного аналізу визначено параметри зарядного пристрою та способи підведення енергії до системи. Передбачено два незалежні канали живлення:

- роз'єм USB Type-C (забезпечує подачу напруги в діапазоні 5–20 В від джерел, що підтримують стандарти USB BC, USB Quick Charge та USB Power Delivery);

- роз'єм DC 5.5 мм (дозволяє подавати напругу в діапазоні 5–24 В від універсальних зовнішніх джерел живлення).

Такий підхід забезпечує високу універсальність пристрою та можливість заряджання акумулятора від широкого спектру доступних джерел енергії.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отже, для формування необхідних параметрів заряджання використано синхронний перетворювач типу buck-boost, реалізований на базі спеціалізованої інтегральної мікросхеми. Це дозволяє забезпечити стабільні умови заряджання акумулятора при змінних параметрах вхідної напруги.

Секція зарядного пристрою оснащена системою захисту від перевантаження за струмом, а також засобами апаратного відключення у разі виникнення аварійних режимів.

З точки зору інформаційно-вимірювальної системи, зарядний вузол включає вимірювальні канали напруги та струму, що дозволяють контролювати процес заряджання в реальному часі. Отримані дані обробляються мікроконтролером і можуть використовуватись для оптимізації режимів заряджання та передачі інформації у систему моніторингу.

Таким чином, реалізація вбудованого зарядного пристрою підвищує автономність, універсальність та функціональні можливості розробленого джерела живлення.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОРТАТИВНОГО РЕГУЛЬОВАНОГО БЛОКУ ЖИВЛЕННЯ

У даному розділі використано літературні джерела [19-26]

3.1 Структура системи керування блоком живлення

На основі викладених припущень розроблено загальну архітектуру системи керування джерелом живлення. Структурну схему блоку керування наведено на рисунку 3.1.

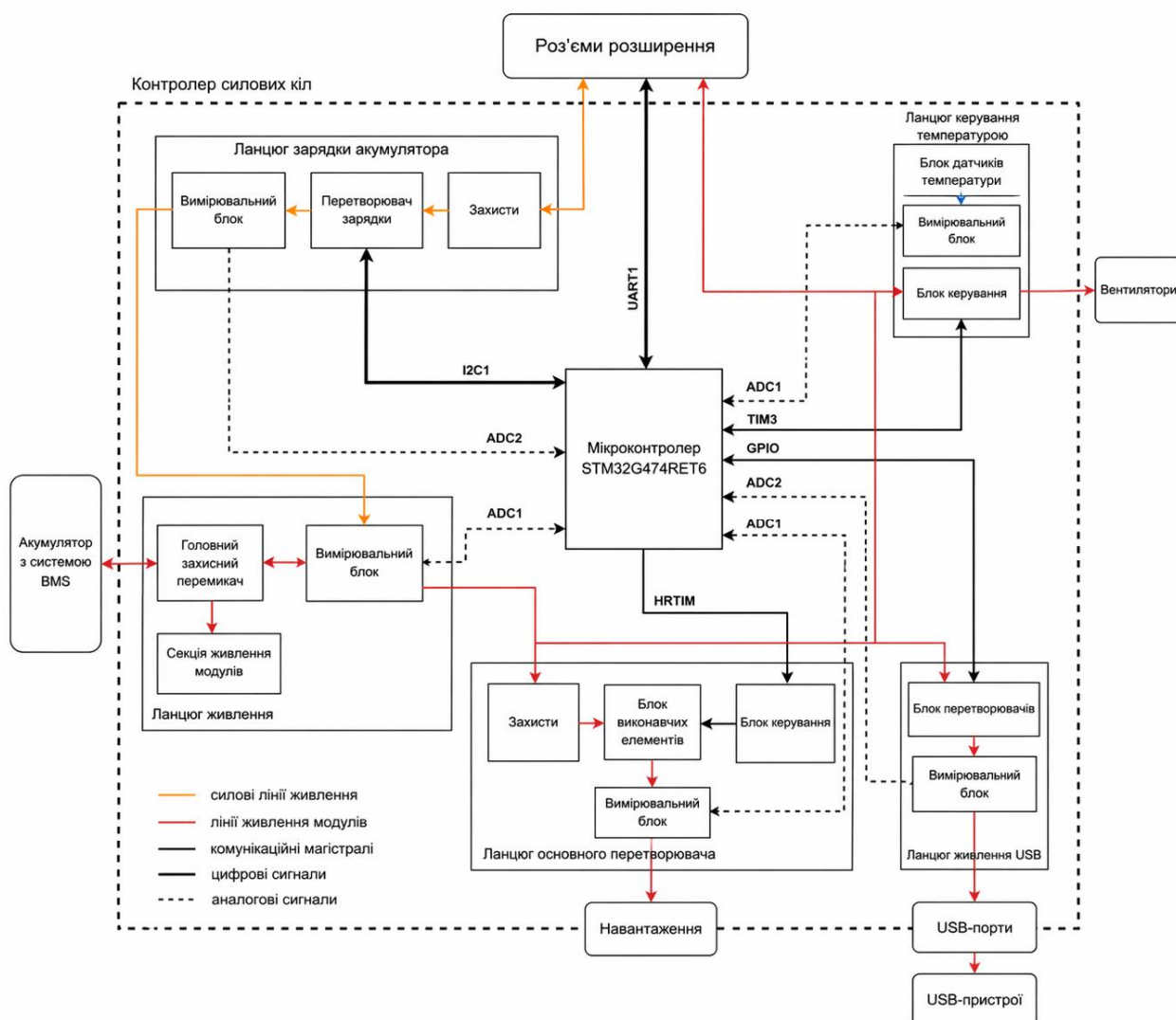


Рисунок 3.1 - Структурна схема системи керування блоком живлення

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Розроблена схема (рисунок 3.1) містить інформацію про з'єднання між окремими функціональними блоками. Також позначено інформаційні та керуючі потоки у системі.

Структура містить вимірювальні канали, мікроконтролер обробки даних та підсистеми формування керуючих сигналів. Це забезпечує можливість реалізації замкненого контуру керування з використанням зворотного зв'язку.

3.2 Секція живлення

Секція живлення забезпечує формування необхідних рівнів напруги для функціонування всіх модулів пристрою та виконує функції захисту і контролю параметрів електроживлення. До складу секції входить вхідне коло, схема формування напруг живлення та вузол генерації опорної напруги. Структуру вхідного кола наведено на рисунку 3.2.

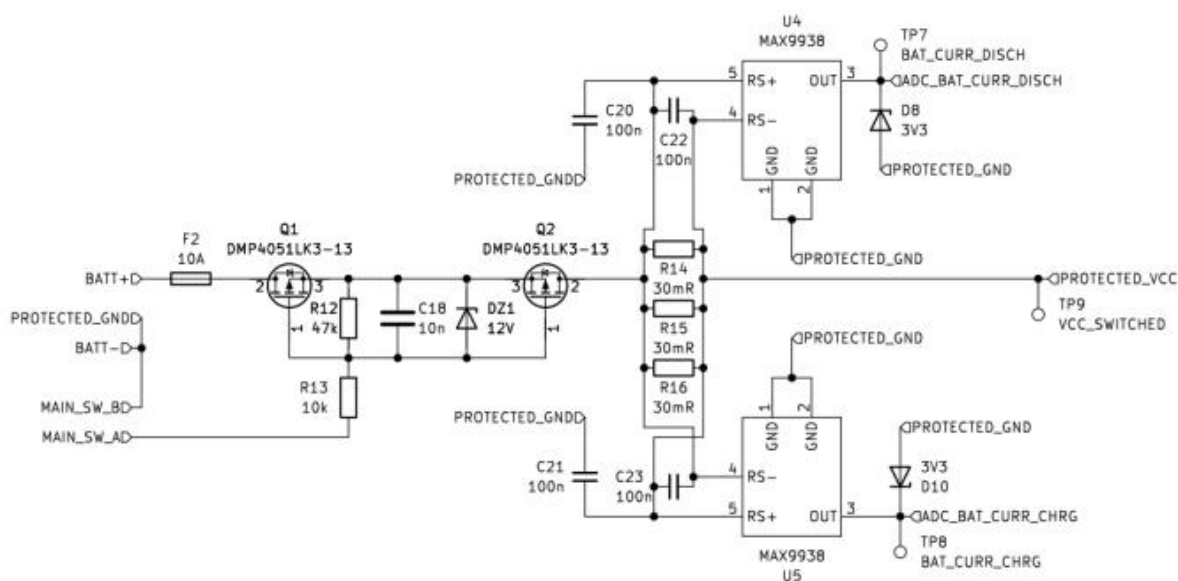


Рисунок 3.2 – Схема вхідного кола живлення

Основною функцією вхідного кола є реалізація електронного вимикача живлення, захист від зворотної полярності та від перевантаження за струмом.

Важливою складовою є вимірювання струму, що дозволяє контролювати як споживання енергії пристроєм, так і процес заряджання акумулятора. Для цього використовується шунтовий метод вимірювання з підсиленням сигналу, що надходить до мікроконтролера.

Вихідна напруга акумулятора подається на схему формування ліній живлення, представлену на рисунку 3.3.

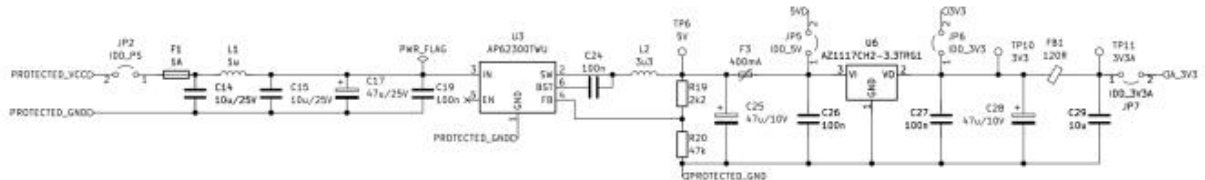


Рисунок 3.3 – Схема формування напруг живлення

У даному вузлі реалізовано двоступеневе перетворення напруги: спочатку формується проміжна напруга 5 В, яка далі стабілізується до рівня 3,3 В. Отримана напруга використовується для живлення цифрових компонентів пристрою.

Для забезпечення стабільної роботи вимірювальних каналів передбачено окрему аналогову лінію живлення, що формується шляхом додаткової фільтрації сигналу.

З метою підвищення точності вимірювань у системі реалізовано вузол генерації опорної напруги, схема якого наведена на рисунку 3.4.

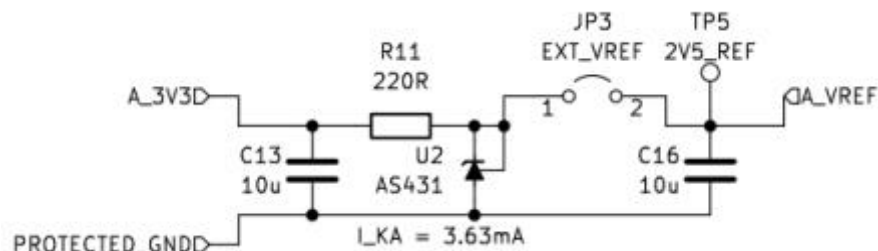


Рисунок 3.4 - Схема формування опорної напруги

Застосування зовнішнього джерела опорної напруги дозволяє підвищити точність роботи аналого-цифрового перетворювача та зменшити

вплив завад від цифрових кіл. Значення опорної напруги становить 2,5 В і додатково стабілізується за допомогою фільтруючих елементів.

Таким чином, секція живлення забезпечує не лише енергопостачання пристрою, але й формує умови для коректної роботи вимірювальної підсистеми та системи керування.

3.3 Мікроконтролер та периферійні вузли

З огляду на високий рівень інтеграції аналогових і цифрових периферійних модулів, у проєкті застосовано мікроконтролер STM32G474RE, який виконує функції центрального керуючого елемента системи.

До основних задач, що реалізуються мікроконтролером, належать:

- генерування керуючих сигналів для виконавчої частини перетворювача;
- регулювання вихідної напруги та струму;
- вимірювання електричних параметрів пристрою;
- керування допоміжними перетворювачами живлення USB-інтерфейсів;
- керування процесом заряджання акумуляторної батареї;
- реалізація комунікації з користувачем або зовнішніми системами.

Живлення мікроконтролера здійснюється від стабілізованої напруги 3,3 В. Як джерело тактового сигналу використано зовнішній кварцовий резонатор із частотою 16 МГц. За допомогою вбудованої системи фазового автопідстроювання частоти (PLL) основна тактова частота мікроконтролера встановлена на рівні 170 МГц, що забезпечує необхідну швидкодію для обробки сигналів та реалізації алгоритмів керування в реальному часі.

З точки зору інформаційно-вимірювальної системи, мікроконтролер виконує функції збору, обробки та аналізу вимірювальних даних, а також формування керуючих впливів на основі отриманої інформації.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Конфігурацію виводів мікроконтролера, визначену у середовищі STM32CubeMX, наведено на рисунку 3.5.

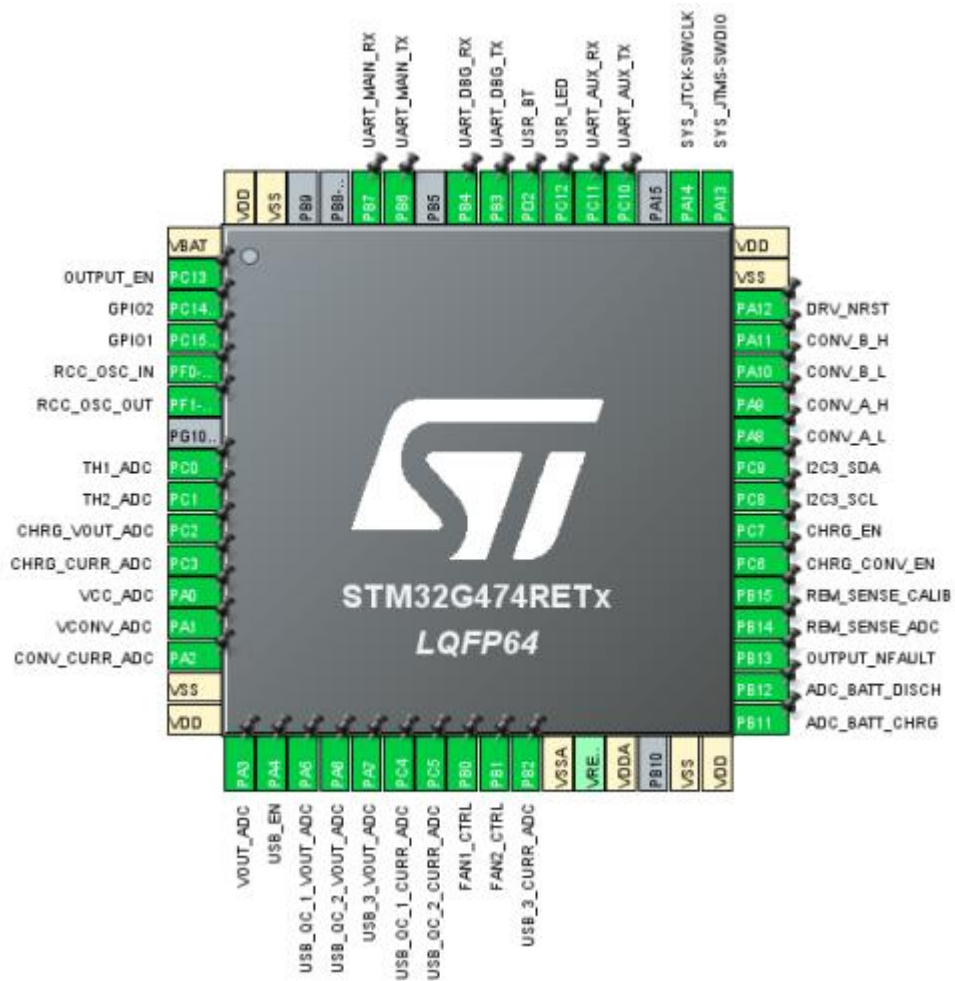


Рисунок 3.5 – Конфігурація виводів мікроконтролера

3.3.1 Формування PWM-сигналів (високочастотний таймер)

Генерація керуючих сигналів у системі здійснюється за допомогою високороздільного таймера HRTIM (High Resolution Timer), вбудованого в мікроконтролер STM32G474RE.

Особливістю цього модуля є наявність окремої PLL-петлі, яка дозволяє підвищити ефективну частоту лічильника до значень, що значно перевищують частоту основного тактового сигналу. Це забезпечує високу роздільну здатність формування PWM-сигналів, необхідну для точного керування перетворювачем.

Тактова частота HRTIM визначається як:

$$f_{HRCK} = \frac{SYSCLK}{AHB_{PRESC}} \cdot \frac{HRTIM_{MULT}}{APB2_{PRESC}} = 170\text{MHz} \cdot 32 = 5.44\text{GHz},$$

де SY SCLK - частота роботи основного годинникового сигналу, тут:
SYSCLK=170 МГц;

AHB_{PRESC} - подільник такту шини АНВ, тут: AHB_{PRESC}=1;

APB2_{PRESC} - подільник такту шини APB2, тут: APB2_{PRESC}=1;

HRTIM_{MULT} - множник PLL для лічильника HRTIM, тут:
HRTIM_{MULT}=32.

У даній роботі використано два канали таймера для керування виконавчими ключами основного перетворювача. Схему підключення каналів до виконавчої частини наведено на рисунку 3.6.

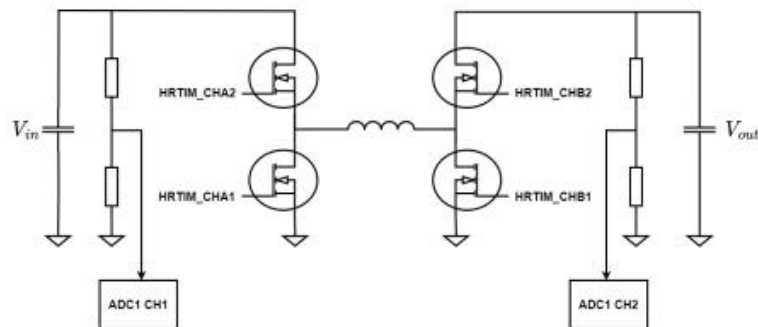


Рисунок 3.6 – Підключення PWM-каналів до виконавчої частини

Частота PWM-сигналу визначається значенням параметра Period:

$$f_{PWM} = \frac{f_{HRCK}}{Period + 1},$$

де f_{HRCK} – тактова частота каналу таймера,

Period – значення, до якого рахує даний канал таймера.

Отримане значення використовується при конфігурації таймера.

Коефіцієнт заповнення PWM-сигналу визначається параметром CMP1, який змінюється в межах від 0 до значення Period. Це забезпечує високу

роздільну здатність керування, що є особливо важливим для стабілізації вихідних параметрів перетворювача.

Значення $СМР1$ оновлюється в кожному циклі регулювання на основі результатів вимірювання та обчислення керуючого впливу. Таким чином реалізується замкнений контур керування системою.

Часові діаграми роботи одного з каналів таймера наведено на рисунку 3.7.

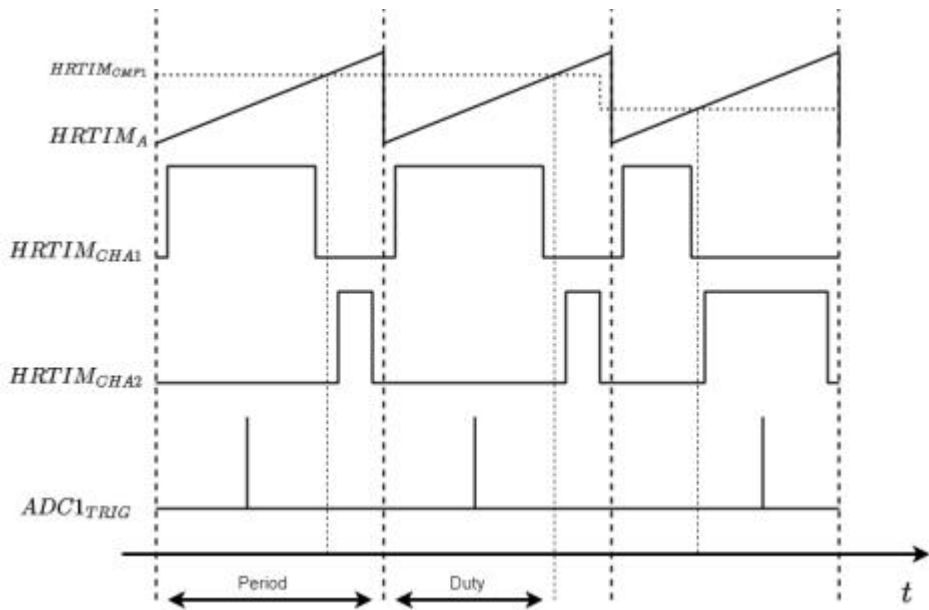


Рисунок 3.7 – Часові діаграми PWM-сигналу

3.3.2 Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)

Застосований мікроконтролер STM32G474RE містить кілька незалежних АЦП із роздільною здатністю 12 біт, що характеризуються високою швидкістю та підтримкою апаратного підвищення роздільної здатності до 16 біт за рахунок надвибірки.

У роботі використано два АЦП для реалізації вимірювальної підсистеми.

Перший АЦП призначений для вимірювання основних параметрів перетворювача: вихідної напруги та вихідного струму.

Робота цього перетворювача синхронізована з таймером HRTIM, що забезпечує виконання вимірювань у визначені моменти часу. Такий підхід дозволяє уникнути спотворень сигналу, які виникають під час перемикання силових ключів, коли в системі присутні значні імпульсні завади.

Для реалізації синхронізації використовується механізм ін'єкційної конверсії, при якому запуск АЦП здійснюється за допомогою тригерного сигналу від таймера. Моменти запуску вимірювання обираються таким чином, щоб забезпечити максимальне віддалення від перехідних процесів у силовій частині перетворювача.

Положення тригерних сигналів визначено за результатами моделювання часових процесів роботи перетворювача. Приклад часових діаграм наведено на рисунках 3.8 та 3.9.

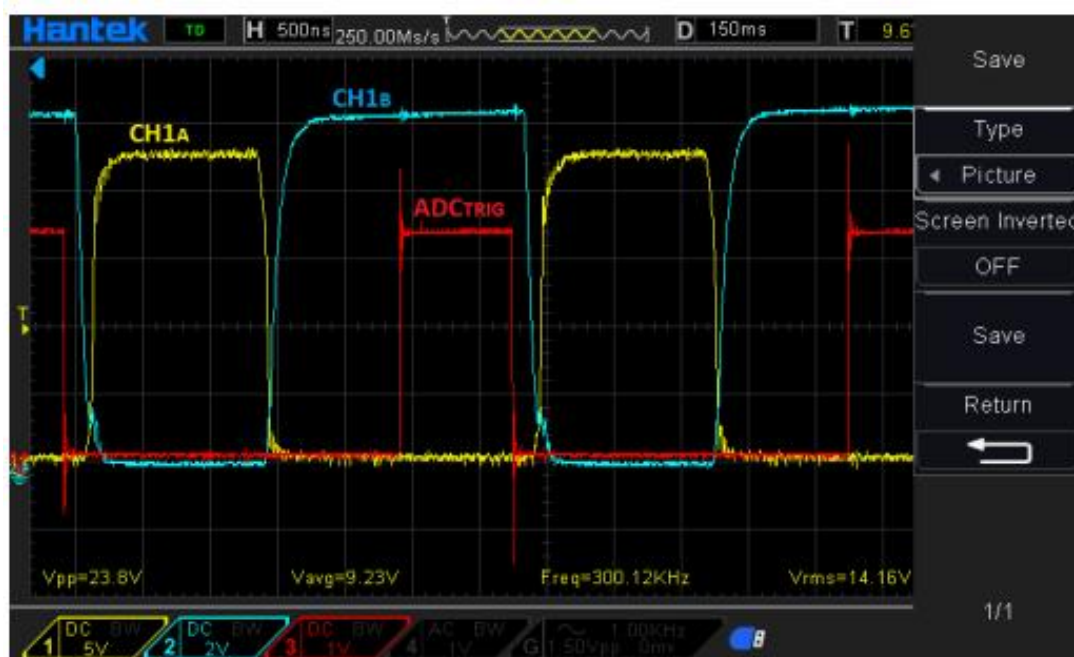


Рисунок 3.8 – Часові діаграми при малому коефіцієнті заповнення

Другий АЦП використовується для вимірювання допоміжних параметрів системи, зокрема:

- напруги акумулятора;
- струму заряду та розряду;
- параметрів зарядного пристрою;

- параметрів USB-перетворювачів;
- температури всередині пристрою.

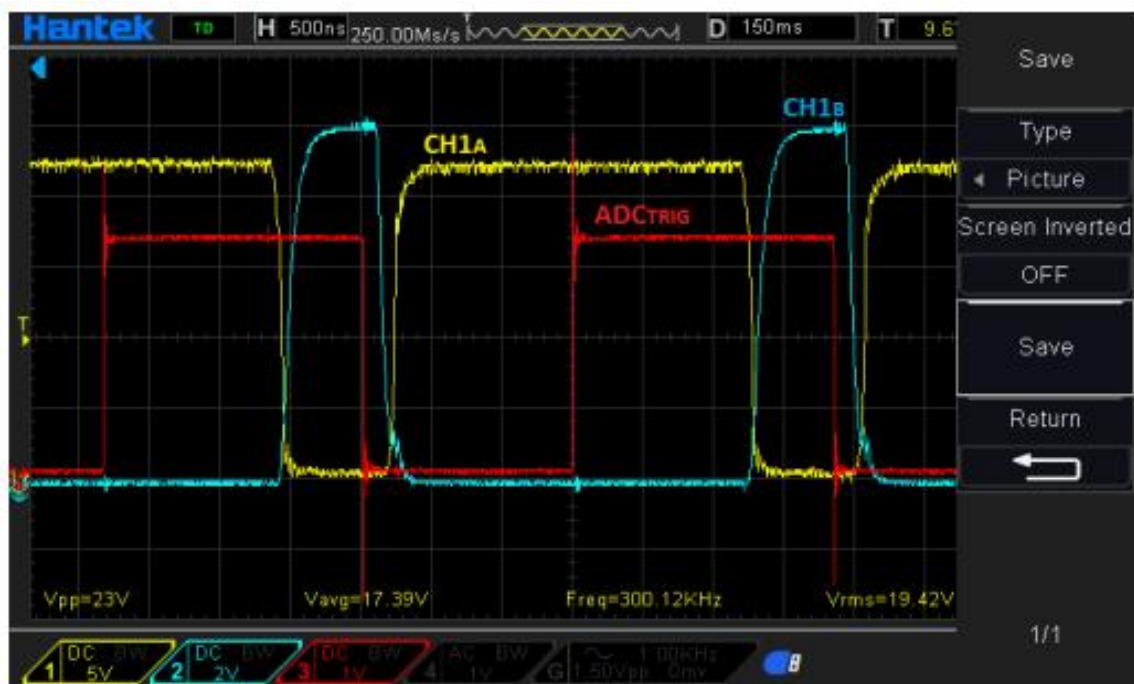


Рисунок 3.9 – Часові діаграми при великому коефіцієнті заповнення

Цей перетворювач працює в асинхронному режимі та використовує механізм прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє виконувати збір даних без залучення центрального процесора. Це підвищує ефективність обробки інформації та зменшує навантаження на систему керування.

Таким чином, застосована архітектура вимірювальної підсистеми забезпечує високу точність, швидкодію та завадостійкість вимірювань, що є важливим критерієм для реалізації адаптивного керування перетворювачем.

3.3.3 Алгоритм керування та регулююча петля

Алгоритм керування основним перетворювачем реалізовано у вигляді машини станів, що забезпечує гнучке та безпечне функціонування пристрою в різних режимах роботи.

Під час роботи система може перебувати в одному із наступних станів:

- OFF - початковий стан після ввімкнення пристрою;
- FAULT - аварійний режим при спрацюванні захистів;

- IDLE - режим очікування при відсутності навантаження;
- BUCK, BUCK-BOOST, BOOST - робочі режими перетворювача;
- DEENERGIZE - перехідний режим розсіювання енергії.

У станах OFF та IDLE генерація PWM-сигналів відсутня, а виконавча частина перетворювача деактивована. У стані FAULT система переходить у безпечний режим із повним вимкненням виконавчих елементів.

Робочі стани BUCK, BUCK-BOOST та BOOST визначаються співвідношенням вхідної та заданої вихідної напруги. Вибір режиму здійснюється автоматично, що забезпечує адаптацію системи до змін умов роботи.

Особливу роль відіграє стан DEENERGIZE, який використовується під час переходу між режимами для розсіювання енергії, накопиченої в індуктивному елементі. Це дозволяє уникнути перенапруги та забезпечити безпечне перемикання режимів.

Стан активних ключів перетворювача в різних режимах наведено на рисунку 3.10.

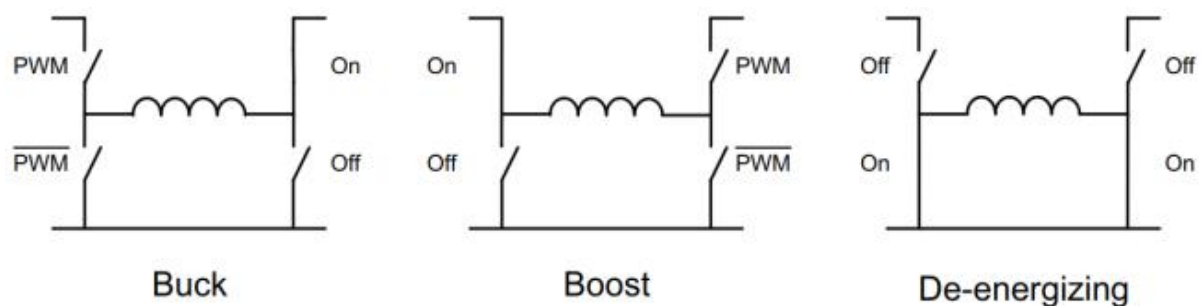


Рисунок 3.10 – Активність ключів у різних режимах роботи

Крім того, реалізовано механізм динамічного перемикання режимів залежно від умов навантаження. Перехід між режимами відбувається у випадку, якщо у поточному режимі не вдається забезпечити задане значення вихідної напруги.

Регулювання вихідних параметрів здійснюється за допомогою цифрового PI-регулятора, який формує керуючий сигнал для генератора PWM.

Математичний опис регулятора має вигляд:

$$p_V(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(t) d\tau,$$

де K_P – постійна, коефіцієнт підсилення пропорційної складової;

$e(t)$ – поточне відхилення, функція різниці між виміряною та заданою вихідною напругою;

K_I – постійна, коефіцієнт підсилення інтегральної складової;

t – час;

τ – час між послідовними вимірюваннями.

Вимірювання необхідних параметрів здійснюється за допомогою АЦП, синхронізованого з роботою перетворювача. Отримані дані використовуються для обчислення керуючого впливу та оновлення коефіцієнта заповнення PWM-сигналу.

Залежно від режиму роботи джерела живлення реалізуються два основні алгоритми регулювання:

- CV (Constant Voltage) - стабілізація вихідної напруги;
- CC (Constant Current) - обмеження вихідного струму.

Перемикання між режимами здійснюється автоматично на основі порівняння виміряного струму із заданим граничним значенням. У випадку перевищення струму система переходить у режим CC, забезпечуючи захист навантаження та джерела живлення.

Структуру регулюючої петлі наведено на рисунку 3.11.

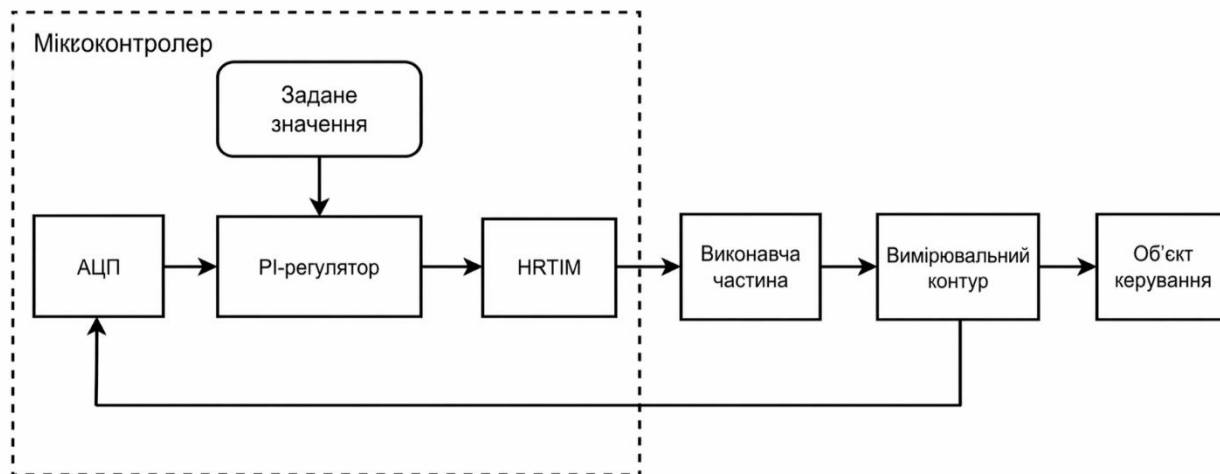


Рисунок 3.11 – Структурна схема регулювання

3.4 Алгоритм роботи системи

Алгоритм роботи системи керування перетворювачем реалізовано у вигляді циклічного процесу, що забезпечує безперервний контроль параметрів та формування керуючих впливів.

На рисунку 3.12 наведено блок-схему алгоритму роботи системи керування.

На початковому етапі виконується ініціалізація периферійних модулів мікроконтролера, зокрема таймерів, аналого-цифрових перетворювачів та інтерфейсів обміну даними.

У процесі роботи системи здійснюється періодичне зчитування вимірюваних параметрів, таких як вихідна напруга, струм навантаження та інші допоміжні величини. На основі отриманих даних визначається похибка регулювання як різниця між заданим та виміряним значенням.

Далі виконується вибір режиму роботи перетворювача (BUCK, BOOST або BUCK-BOOST) залежно від співвідношення вхідної та вихідної напруг.

Після визначення режиму роботи обчислюється керуючий вплив за допомогою PI-регулятора. Отримане значення використовується для оновлення коефіцієнта заповнення PWM-сигналу, що формує керуючі імпульси для силових ключів.



Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритму роботи системи керування

Паралельно здійснюється контроль аварійних станів. У разі виявлення перевищення допустимих значень напруги, струму або температури система переходить у стан FAULT із вимкненням виконавчої частини.

Циклічність розробленого алгоритму забезпечує адаптивне керування перетворювачем у реальному часі.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

3.5 Виконавча частина основного перетворювача

Виконавча частина основного перетворювача призначена для реалізації процесу перетворення енергії відповідно до сформованих керуючих сигналів.

До складу цього вузла входять:

- силові ключі на основі польових транзисторів типу N (MOSFET);
- драйвери керування затворами транзисторів.

Силові ключі забезпечують комутацію струму через індуктивний елемент відповідно до обраного режиму роботи перетворювача.

Для підвищення ефективності перетворення використано N-MOSFET транзистори, які характеризуються малим опором відкритого каналу $R_{DS(on)}$, що зменшує втрати потужності.

Керування силовими ключами здійснюється за допомогою спеціалізованих драйверів, які формують необхідні рівні напруги для відкривання та закривання транзисторів. Для коректної роботи верхніх ключів (high-side) застосовано драйвери з вбудованим зарядовим насосом (bootstrap), що дозволяє формувати напругу керування, вищу за напругу джерела живлення.

Схему виконавчої частини перетворювача наведено на рисунку 3.13.

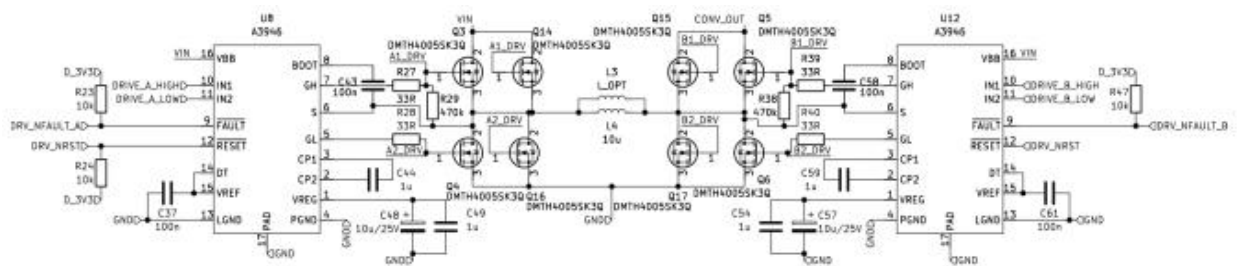


Рисунок 3.13 – Виконавча частина перетворювача

Драйвери затворів оснащені вбудованими захисними механізмами, зокрема:

- захист від зниження напруги живлення;
- захист від перегріву;
- контроль працездатності зарядового насоса.

У разі виникнення аварійної ситуації драйвери формують діагностичні сигнали, які передаються до мікроконтролера. Це дозволяє оперативно зупинити роботу перетворювача та перевести систему у безпечний режим.

Таким чином, виконавча частина забезпечує ефективне перетворення енергії та інтегрується у загальну систему керування з урахуванням вимог безпеки та надійності.

3.6 Вимірювальна підсистема

Вбудована вимірювальна підсистема забезпечує перетворення фізичних величин у електричні сигнали, придатні для подальшої обробки аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера.

У межах даної роботи реалізовано вимірювання напруги, струму, температури.

Вимірювання напруги здійснюється за допомогою резистивного дільника, який масштабує вхідний сигнал до діапазону 0–2,5 В. Для узгодження з АЦП використовується буферний повторювач.

Значення напруги визначається за формулою:

$$U = \frac{ADC_N \cdot ADC_{VREF}}{2^{ADC_{RES}}} \cdot \frac{(R_U + R_L)}{R_L},$$

де: ADC_N – значення, зчитане АЦП,

ADC_{VREF} – опорна напруга АЦП, тут 2,5 В,

ADC_{RES} – розрядність АЦП у бітах, тут 16,

R_U – верхній резистор у дільнику напруги,

R_L – нижній резистор у дільнику напруги.

Вимірювання струму реалізовано за допомогою шунтових резисторів та підсилювачів. Напруга, що виникає на шунті, підсилюється та подається на вхід АЦП.

Значення струму визначається за формулою:

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$I = \frac{ADC_N}{2^{ADC_{RES}}} \cdot \frac{ADC_{VREF}}{R_S \cdot G},$$

де: ADC_N – цифрове значення з АЦП,

ADC_{VREF} – опорна напруга АЦП (2,5 В),

ADC_{RES} – розрядність АЦП (16 біт),

R_S – опір вимірювального резистора,

G – коефіцієнт підсилення підсилювача.

У роботі застосовано два підходи до вимірювання струму: висока точність (high-side відносно лінії живлення) та простота реалізації (low-side відносно загальної шини). Схеми відповідних вимірювальних кіл наведено на рисунках 3.14 та 3.15.

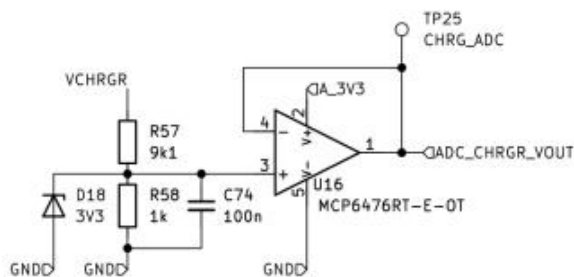


Рисунок 3.14 - Принципова схема однієї зі схем вимірювання напруги

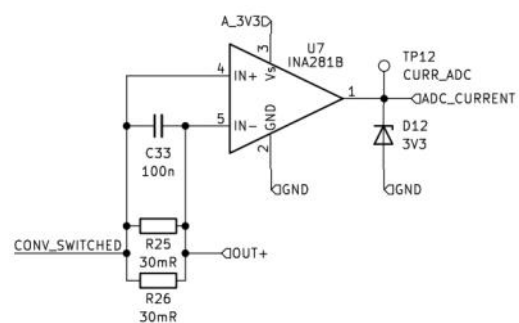


Рисунок 3.15 - Фрагмент схеми кола вимірювання струму відносно лінії живлення

Для контролю температури використано термістори типу NTC. Їх опір залежить від температури за експоненціальним законом:

$$R = R_0 \cdot e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})},$$

де R₀ - опір термістора при температурі відліку;

B - коефіцієнт зміни опору залежно від температури;

T₀ - температура відліку для термістора;

T - поточна температура термістора.

Температура визначається за перетвореною залежністю:

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$T = \frac{T_0 \cdot B}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \cdot T_0 + B}$$

Принципову схему цього вузла наведено на рисунку 3.17.

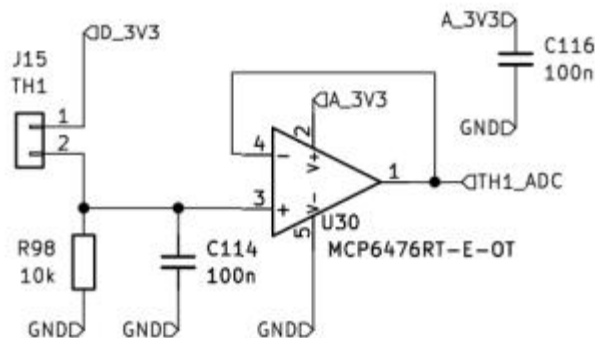


Рисунок 3.17 - Схема кола вимірювання температури

Перетворення опору в напругу здійснюється за допомогою дільника напруги з подальшим буферуванням сигналу. Значення опору термістора визначається через вимірювання АЦП:

$$R = R_L \cdot \frac{V_{in} \cdot 2^{ADC_{RES}}}{ADC_N \cdot ADC_{VREF}} - R_L,$$

де R_L - опір нижнього резистора подільника напруги, тут: $R_L=10$ кОм;

V_{in} - вхідна напруга подільника, тут: $V_{in}=3,3$ В;

ADC_N - значення, виміряне аналого-цифровим перетворювачем;

ADC_{VREF} - опорна напруга АЦП, тут: $ADC_{VREF}=2,5$

ADC_{RES} - роздільна здатність АЦП у бітах, тут: $ADC_{RES}=16$.

Такі перетворення дозволяють отримати значення температури на основі цифрового сигналу.

Датчики температури можуть розміщуватись у критичних точках пристрою (силові елементи, індуктивності, драйвери), що забезпечує ефективний тепловий контроль.

Таким чином, вимірювальна підсистема забезпечує точне визначення електричних та теплових параметрів, необхідних для реалізації алгоритмів керування та захисту пристрою.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3.7 Реалізація регулятора

У системі керування блоком живлення реалізовано цифровий регулятор, призначений для стабілізації вихідних параметрів джерела живлення. Його основною задачею є формування керуючого впливу на основі різниці між заданим та вимірним значенням контрольованої величини.

У роботі використано пропорційно-інтегральний (PI) регулятор, який забезпечує необхідну швидкодію та відсутність статичної похибки у сталому режимі. Математична модель регулятора має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де $e(t)$ - похибка регулювання, що визначається як різниця між заданим значенням та результатом вимірювання;

K_p - коефіцієнт пропорційної складової;

K_i - коефіцієнт інтегральної складової.

У цифровій реалізації регулятора інтегральна складова обчислюється дискретно з урахуванням періоду дискретизації системи. Значення керуючого сигналу формується у кожному циклі обробки даних та використовується для оновлення коефіцієнта заповнення PWM-сигналу.

Вхідними даними для регулятора є результати вимірювання напруги або струму, отримані з АЦП. Вихідним сигналом регулятора є значення, яке визначає параметр СМР таймера HRTIM, що безпосередньо впливає на коефіцієнт заповнення PWM.

Залежно від режиму роботи джерела живлення регулюється вихідна напруга чи вихідний струм.

На рисунку 3.18 наведено характер перехідного процесу системи з PI-регулятором. Видно, що система забезпечує швидкий вихід на задане значення з незначним перерегулюванням, що свідчить про ефективність обраного алгоритму керування.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

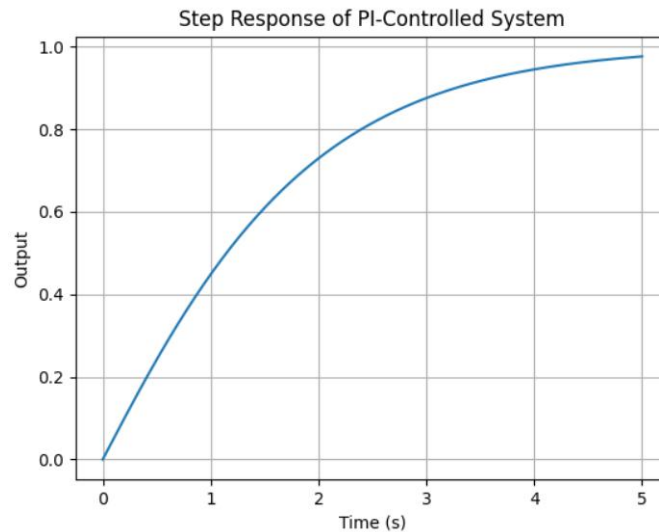


Рисунок 3.18 – Перехідна характеристика системи з РІ-регулятором

Для аналізу роботи цифрового регулятора виконано моделювання системи з РІ-регулятором.

У моделі використано наступні значення коефіцієнтів: $K_p = 2.0$; $K_i = 10.0$.

На рисунку 3.19 наведено перехідну характеристику системи після перерегулювання. Видно, що система забезпечує швидкий вихід на задане значення з незначним перерегулюванням.

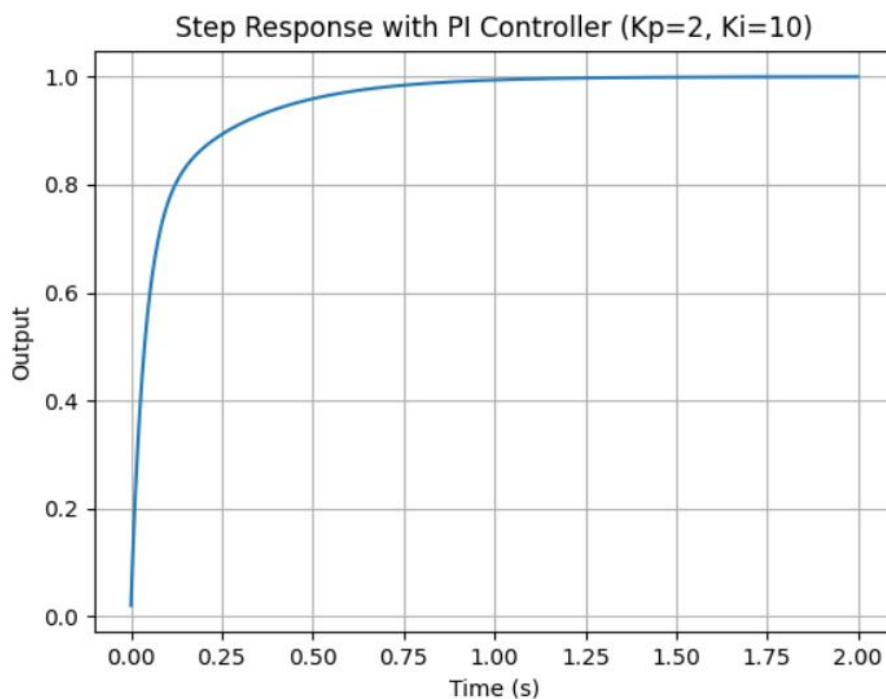


Рисунок 3.19 – Перехідна характеристика системи з РІ-регулятором

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Отримані результати демонструють вплив коефіцієнтів регулятора на динамічні властивості системи та підтверджують ефективність застосування PI-регулятора для керування перетворювачем.

Перемикання між режимами здійснюється автоматично на основі порівняння виміряного струму із заданим граничним значенням. У випадку перевищення допустимого струму система переходить у режим СС, що забезпечує захист навантаження та елементів перетворювача.

Для забезпечення стабільної роботи регулятора передбачено обмеження вихідного сигналу, що запобігає виходу системи за допустимі межі керування. Крім того, враховується насичення виконавчого механізму, що дозволяє уникнути нестійких режимів роботи.

Таким чином, реалізований PI-регулятор забезпечує точне та стабільне керування параметрами джерела живлення в умовах змінного навантаження та вхідної напруги.

3.8 Програмна реалізація системи керування

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізовано мовою C із використанням бібліотеки HAL. Основний алгоритм побудований у вигляді циклу керування, що включає зчитування даних із АЦП, обчислення керуючого впливу за допомогою PI-регулятора та оновлення коефіцієнта заповнення PWM-сигналу.

Структура програмного забезпечення передбачає використання машини станів для керування режимами роботи перетворювача (BUCK, BOOST, FAULT). Це забезпечує адаптивну роботу пристрою залежно від вхідних умов.

Фрагмент програмного коду, що реалізує основний цикл керування, наведено тут:

```
void ControlLoop(void)
{
    /* Зчитування вихідної напруги */
```

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

float V_out = ReadVoltage();

/* Обчислення похибки */
float error = V_ref - V_out;

/* PI-регулятор */
integral += error * Ts;
float control = Kp * error + Ki * integral;

/* Обмеження сигналу */
if (control > 0.95f) control = 0.95f;
if (control < 0.05f) control = 0.05f;

/* Оновлення PWM */
UpdatePWM(control);
}

```

Наведений фрагмент коду реалізує основний цикл керування перетворювачем. У кожній ітерації здійснюється зчитування значення вихідної напруги, обчислення похибки та формування керуючого сигналу за допомогою PI-регулятора. Отримане значення використовується для зміни коефіцієнта заповнення PWM-сигналу, що забезпечує стабілізацію вихідної напруги.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання даної роботи розроблено портативне регульоване джерело живлення, адаптивне до параметрів електричної мережі, із реалізацією функцій вимірювання, стабілізації та передачі даних.

У першому розділі проведено аналіз існуючих типів джерел живлення та топологій перетворювачів постійного струму. Обґрунтовано доцільність використання імпульсної топології buck-boost, яка забезпечує можливість як пониження, так і підвищення напруги, що є важливим для роботи з акумуляторними джерелами живлення. Також показано перспективність інтеграції джерел живлення до складу інформаційно-вимірювальних систем.

У другому розділі виконано проєктування структури пристрою та обґрунтовано вибір елементної бази. Визначено основні параметри роботи перетворювача, розроблено схему живлення, систему захистів та допоміжні вузли. Запропоновано використання мікроконтролера STM32 як центрального елемента керування, що забезпечує реалізацію алгоритмів регулювання та обробку вимірювальних даних. Також реалізовано підсистему комунікації з використанням IoT-технологій (ESP32, MQTT), що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг параметрів пристрою.

У третьому розділі розроблено програмно-апаратну реалізацію системи керування. Реалізовано алгоритм роботи на основі машини станів, що забезпечує адаптивний вибір режимів роботи перетворювача. Для стабілізації вихідних параметрів використано PI-регулятор, який забезпечує нульову статичну похибку та достатню швидкодію системи. Розроблено вимірювальну підсистему з використанням аналого-цифрових перетворювачів та реалізовано синхронізацію вимірювань із процесами комутації для підвищення точності.

У роботі виконано моделювання системи в середовищі Matlab/Simulink, що дозволило дослідити динамічні характеристики перетворювача та оцінити ефективність застосованих алгоритмів керування. Отримані результати

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підтверджують працездатність запропонованої структури та ефективність використання PI-регулятора.

Розроблений пристрій характеризується такими перевагами:

- можливість роботи в широкому діапазоні вхідних напруг;
- реалізація режимів стабілізації напруги та струму;
- наявність вбудованих систем захисту;
- інтеграція вимірювальної підсистеми;
- можливість віддаленого моніторингу та керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого пристрою як універсального портативного джерела живлення для налагодження, тестування та живлення електронних систем, а також як елемента інформаційно-вимірювальних систем.

Отримані результати можуть бути використані при подальшій розробці інтелектуальних джерел живлення, вбудованих систем керування та IoT-пристроїв.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. – 2nd ed. – New York: Springer, 2001. – 883 p.
2. Rashid M. H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. – 4th ed. – Pearson, 2014. – 1360 p.
3. Hart D. W. Power Electronics. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 477 p.
4. Бойко В. С., Жуйков В. Я. Силовая електроніка: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 312 с.
5. Кузнецов Ю. П., Сандлер А. І. Перетворювальна техніка: підручник. – Київ: Вища школа, 2003. – 400 с.
6. Чернявський В. М. Джерела вторинного електроживлення: навчальний посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 256 с.
7. DC/DC Book of Knowledge. – RECOM Power, 2013. Електронний ресурс – Режим доступу: https://www.recom-power.com/pdf/Book_of_Knowledge.pdf
8. Buck–boost converter // Wikipedia. Електронний ресурс – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter
9. Shukir S. S. Buck, Boost and Buck–Boost Converters Analysis: A Review // International Journal of Modern Electrical Engineering and Intelligent Automation. – 2025.
10. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. – 2nd ed. – New York: Springer, 2001. – 883 p.
11. Rashid M. H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. – 4th ed. – Pearson, 2014. – 1360 p.
12. Pressman A. I., Billings K., Morey T. Switching Power Supply Design. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2009. – 768 p.
13. Бойко В. С., Жуйков В. Я. Силовая електроніка: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 312 с.

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

14. Чернявський В. М. Джерела вторинного електроживлення: навчальний посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – 256 с.
15. Texas Instruments. Buck-Boost Converter Design Guide. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.ti.com>
16. STMicroelectronics. STM32G4 Series Reference Manual. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.st.com>
17. Analog Devices. Battery Management System (BMS) Overview. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.analog.com>
18. Linden D., Reddy T. B. Handbook of Batteries. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 2011. – 1232 p.
19. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton: Princeton University Press, 2008. – 408 p.
20. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – Prentice Hall, 2010. – 894 p.
21. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Pearson, 2017. – 790 p.
22. STMicroelectronics. STM32G474 Reference Manual. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.st.com>
23. STMicroelectronics. STM32CubeMX Software Tool. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.st.com>
24. Espressif Systems. ESP32 Technical Reference Manual. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.espressif.com>
25. Banks A., Gupta R. MQTT Version 3.1.1. – OASIS Standard, 2014. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/>
26. Texas Instruments. Analog-to-Digital Converter (ADC) Fundamentals. Електронний ресурс – Режим доступу: <https://www.ti.com>

					ДП. МТІР.10663242.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		