

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту
(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО DC-
DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ НА
БАЗІ STM32**

**DESIGN AND RESEARCH OF A DIGITALLY CONTROLLED
PULSED DC-DC CONVERTER BASED ON STM32**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)
освітня програма «Електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЛ-41
Корнійчук Артем Вадимович

(підпис)

Керівник: к.ф.-м.н., доцент
Хвищун Микола Вячеславович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» червня 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Галузь знань: 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Спеціальність: 171 «Електроніка»

Освітня програма: «Електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Корнійчуку Артему Вадимовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Проектування та дослідження імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32*

керівник роботи: *к.ф.-м.н., доцент Хвищун М.В.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 559/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *топология перетворювача – синхронний Buck DC-DC перетворювач; мікроконтролер керування – STMicroelectronics STM32F303/STM32G4*

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

Вступ

Розділ 1. Аналітичний огляд імпульсних перетворювачів та систем керування

Розділ 2. Схемне проектування та принцип роботи DC-DC перетворювача

Розділ 3. Розрахункова апаратно-програмна частина

Розділ 4. Охорона праці та безпека

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація POWERPOINT (12 слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1. Аналітичний огляд імпульсних перетворювачів та систем керування</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 2. Схемне проєктування та принцип роботи DC-DC перетворювача</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3. Розрахункова апаратно-рограмна частина</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4. Охорона праці та безпека</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	<i>%</i>		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Хвищун М. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «31» грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1. Аналітичний огляд імпульсних перетворювачів та систем керування</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2. Схемне проєктування та принцип роботи DC-DC перетворювача</i>	до 15.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3. Розрахункова апаратно-рограмна частина</i>	до 01.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4. Охорона праці та безпека</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.04.2026 р.	
7.	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 30.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Артем КОРНІЙЧУК

Керівник роботи _____ Микола ХВИЩУН

АНОТАЦІЯ

Корнійчук А. В. Проектування та дослідження імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32. Рукопис. Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Електроніка» спеціальності «Електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. 69 с.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел.

У першому розділі проведено аналіз імпульсних DC-DC перетворювачів та систем цифрового керування, розглянуто основні топології (Buck, Boost, Buck-Boost), принципи роботи імпульсних джерел живлення та сучасні мікроконтролери STMicroelectronics STM32. Обґрунтовано вибір структури та топології перетворювача.

У другому розділі виконано схемне проектування DC-DC перетворювача, розроблено структурну, функціональну та принципову схеми, описано роботу силової частини та реалізовано цифрове керування на базі STM32 із PWM та зворотним зв'язком.

У третьому розділі проведено розрахунок параметрів перетворювача, вибір силових компонентів, розроблено алгоритм цифрового керування та програмне забезпечення для STM32. Виконано моделювання роботи системи та досліджено характеристики перетворювача: ККД, стабільність і пульсації.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці, електробезпеки, теплових режимів, захисту від електромагнітних завад.

У висновках підсумовано результати роботи, підтверджено досягнення поставленої мети та визначено практичну цінність розробленого імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням.

Ключові слова: DC-DC перетворювач, імпульсне джерело живлення, цифрове керування, STMicroelectronics STM32, PWM, PID-регулятор, MOSFET, ККД, Buck-перетворювач.

ABSTRACT

Korniichuk A. Design And Research Of A Digitally Controlled Pulsed DC-DC Converter Based on STM32. Manuscript. Qualification work for bachelor's degree in the Educational Program «Electronics», specialty «Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026. 69 p.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references.

In the first chapter, an analysis of pulse DC-DC converters and digital control systems was carried out. The main converter topologies (Buck, Boost, Buck-Boost), operating principles of switching power supplies, and modern STMicroelectronics STM32 microcontrollers were considered. The choice of converter structure and topology was substantiated.

In the second chapter, the circuit design of the DC-DC converter was developed. Structural, functional, and schematic diagrams were created, the operation of the power stage was described, and a digital control system based on STM32 with PWM and feedback was implemented.

The third chapter presents the calculation of converter parameters, the selection of power components, the development of a digital control algorithm, and software implementation for STM32. Simulation of the system operation was performed, and the converter characteristics such as efficiency, stability, and ripple level were investigated.

The fourth chapter considers occupational safety issues, electrical safety, thermal operating conditions, and protection against electromagnetic interference. The conclusions summarize the obtained results, confirm the achievement of the research objective, and determine the practical significance of the developed pulse DC-DC converter with digital control.

Keywords: DC-DC Converter, Switching Power Supply, Digital Control, STM32, PWM, PID Controller, MOSFET, Efficiency, Buck Converter.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ	10
1.1 Класифікація DC-DC перетворювачів (Buck, Boost, Buck-Boost)	10
1.2 Принцип роботи імпульсних джерел живлення	11
1.3 Аналогове та цифрове керування перетворювачами	14
1.4 Огляд сучасних мікроконтролерів STM32 для цифрового керування. 21	
1.5 Аналіз існуючих технічних рішень і вибір структури перетворювача	24
РОЗДІЛ 2 СХЕМНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ DC–DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	29
2.1 Структурна схема DC-DC перетворювача.....	29
2.2 Вибір топології DC-DC перетворювача.....	32
2.3 Розробка функціональної схеми імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням.....	38
2.4 Розробка принципової електричної схеми імпульсного DC-DC перетворювача	42
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНКОВА АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ЧАСТИНА.....	48
3.1 Розрахунок основних параметрів DC-DC перетворювача.....	48
3.2 Розрахунок індуктивності дроселя та параметрів LC-фільтра.....	50
3.3 Дослідження ефективності та теплових режимів роботи DC-DC перетворювача	53
3.4 Розробка алгоритму цифрового керування перетворювачем.....	
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА	61
4.1 Аналіз небезпечних факторів при роботі з силовою електронікою	61
4.2 Ергономіка та безпечна організація робочого місця.....	64
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку електроніки, телекомунікаційних систем, вбудованих пристроїв та систем Інтернету речей (IoT) особливої актуальності набуває підвищення енергоефективності та стабільності систем електроживлення. Ефективність функціонування сучасних електронних пристроїв значною мірою залежить від якості перетворення електричної енергії, стабільності вихідної напруги та мінімізації втрат потужності

У більшості сучасних електронних систем використовуються імпульсні DC-DC перетворювачі, які забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, компактність та можливість стабілізації вихідної напруги у широкому діапазоні навантажень. На відміну від лінійних стабілізаторів, імпульсні джерела живлення працюють у ключовому режимі, що дозволяє суттєво зменшити теплові втрати та підвищити енергетичну ефективність системи [1].

Сучасні імпульсні перетворювачі реалізуються за різними топологіями, серед яких найбільш поширеними є Buck, Boost та Buck-Boost перетворювачі. Вибір топології залежить від співвідношення вхідної та вихідної напруги, необхідного рівня стабілізації, режиму навантаження та вимог до коефіцієнта корисної дії. Найбільш доцільною для систем пониження напруги є Buck-топологія, яка забезпечує високий ККД, простоту реалізації та низькі втрати потужності [2].

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасної силової електроніки є впровадження цифрових методів керування імпульсними перетворювачами. Особливо ефективними для таких задач є мікроконтролери сімейства STMicroelectronics STM32, які містять високошвидкісні PWM-модулі, аналого-цифрові перетворювачі, таймери та апаратну підтримку математичних операцій [3]. У роботі розглянуто цифрове керування імпульсним DC-DC перетворювачем на базі мікроконтролера STM32, який забезпечує реалізацію PWM-керування, PID-регулювання та системи зворотного зв'язку.

Використання цифрового PID-регулятора дозволяє підтримувати стабільну вихідну напругу при зміні навантаження або вхідної напруги, зменшити рівень пульсацій та покращити динамічні характеристики системи. Крім того, використання інтерфейсів UART, USB, CAN, I²C та SPI забезпечує можливість інтеграції перетворювача у сучасні вбудовані та IoT-системи [1-4].

Метою кваліфікаційної роботи є проєктування та дослідження імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі мікроконтролера STMicroelectronics STM32.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні типи імпульсних DC–DC перетворювачів та систем цифрового керування;
- обґрунтувати вибір топології перетворювача;
- розробити структурну, функціональну та принципову схеми пристрою;
- реалізувати цифрову систему керування на базі STM32;
- розробити алгоритм PWM-керування та PID-регулювання;
- виконати розрахунок параметрів силової частини;
- реалізувати програмне забезпечення для STM32.

Об'єктом дослідження є імпульсний DC-DC перетворювач як електронний пристрій перетворення та стабілізації електричної енергії.

Предметом дослідження є методи цифрового керування імпульсними DC- DC перетворювачами на базі мікроконтролерів STMicroelectronics STM32.

Практичне значення роботи полягає у розробці енергоефективного імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32, який може бути використаний у вбудованих системах, телекомунікаційному обладнанні, IoT-пристроях, системах промислової автоматизації та сучасних електронних системах живлення.

Під час виконання роботи інструменти штучного інтелекту використовувалися лише як допоміжний засіб для редагування тексту та опрацювання літературних джерел. Усі отримані результати були самостійно перевірені автором із дотриманням вимог академічної доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1 Класифікація DC-DC перетворювачів (Buck, Boost, Buck-Boost)

Імпульсні DC-DC перетворювачі є основою сучасних енергоефективних систем живлення та широко використовуються у телекомунікаційній техніці, вбудованих системах, промисловій автоматизації, транспортній електроніці та системах відновлюваної енергетики. Основними перевагами таких перетворювачів є високий коефіцієнт корисної дії, можливість стабілізації напруги та зменшення втрат енергії порівняно з лінійними стабілізаторами [1, 2].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється підвищенню ефективності DC-DC перетворювачів, зменшенню електромагнітних завад, оптимізації режимів перемикавання та впровадженню цифрових методів керування на базі мікроконтролерів STMicroelectronics STM32 [3].

Залежно від співвідношення вхідної та вихідної напруги DC-DC перетворювачі поділяються на три базові типи:

- понижувальні (Buck);
- підвищувальні (Boost);
- понижувально-підвищувальні (Buck-Boost).

Саме ці топології є основою більшості сучасних силових електронних систем [1].

Розглянемо понижувальний перетворювач Buck. Buck-перетворювач призначений для зниження рівня постійної напруги. Його робота базується на імпульсному керуванні силовим ключем, накопиченні енергії в дроселі та згладжуванні вихідної напруги LC-фільтром. У режимі безперервного струму вихідна напруга прямо пропорційна коефіцієнту заповнення PWM-сигналу, що забезпечує простоту цифрового керування [2]. Дані перетворювачі широко застосовуються у джерелах живлення мікроконтролерів, телекомунікаційних пристроїв, сенсорних вузлів та цифрових систем керування. Основними перевагами є високий ККД, простота реалізації та невеликі втрати потужності.

До недоліків належать обмеження при великих коефіцієнтах перетворення та необхідність зменшення електромагнітних завад при високочастотному перемиканні [4].

Розглянемо підвищувальний перетворювач Boost. Boost-перетворювач використовується для підвищення вхідної напруги. Принцип його роботи полягає у накопиченні енергії в індуктивності під час замкненого стану ключа та передачі енергії до навантаження після його розмикання.

Такі перетворювачі широко використовуються у системах із низьковольтними джерелами живлення: сонячних батареях, акумуляторних системах, паливних елементах та автономних IoT-пристроях [5]. Перевагами Boost-топології є простота структури та можливість отримання високої вихідної напруги. Водночас при значному коефіцієнті підвищення збільшуються втрати енергії, рівень пульсацій та електромагнітних завад [1].

Розглянемо понижувально-підвищувальний перетворювач Buck-Boost. Buck-Boost-перетворювач поєднує функції пониження та підвищення напруги. Це дозволяє підтримувати стабільну вихідну напругу при зміні вхідної у широкому діапазоні. У класичних схемах вихідна напруга має інверсну полярність, однак сучасні неінвертувальні структури позбавлені цього недоліку [6]. Buck-Boost-перетворювачі є перспективними для акумуляторних систем, електромобілів та автономних джерел живлення. Основними перевагами є універсальність та широкий діапазон роботи, тоді як недоліками залишаються складність алгоритмів керування, більша кількість компонентів та підвищені вимоги до систем стабілізації [6].

Проведемо порівняльний аналіз топологій. Аналіз наукових джерел показує, що кожна із розглянутих топологій має власну сферу ефективного застосування. Buck-перетворювачі найбільш доцільні для пониження напруги з високим ККД, Boost – для систем із низьковольтним живленням, а Buck-Boost – для універсальних застосувань зі змінною вхідною напругою [1, 5].

Сучасні тенденції розвитку силової електроніки пов'язані з використанням цифрового керування, адаптивних алгоритмів регулювання та інтеграції

перетворювачів у інтелектуальні енергетичні системи, що підтверджує актуальність даної тематики [2, 3].

Таким чином, топології Buck, Boost та Buck-Boost є базовими структурами сучасних DC-DC перетворювачів. Вибір конкретного типу залежить від вимог до системи живлення, діапазону вхідної напруги, режиму навантаження та необхідного рівня стабілізації. Найбільш перспективним напрямом розвитку є використання цифрового керування на базі мікроконтролерів STM32, що дозволяє підвищити ефективність, стабільність та функціональні можливості імпульсних перетворювачів.

1.2 Принцип роботи імпульсних джерел живлення

Імпульсні джерела живлення (Switching Mode Power Supply, SMPS) є основою сучасних систем електроживлення електронних пристроїв. Їх застосовують у телекомунікаційному обладнанні, комп'ютерних системах, промисловій автоматизації, вбудованих пристроях та системах Інтернету речей [1].

На відміну від лінійних стабілізаторів, імпульсні джерела живлення працюють у ключовому режимі, де силові транзистори (MOSFET або IGBT) перебувають у станах насичення або відсічки. Такий принцип роботи дозволяє суттєво зменшити втрати потужності та забезпечити ККД на рівні 85...98 % залежно від топології й режиму роботи [2].

Регулювання вихідної напруги здійснюється шляхом зміни тривалості імпульсів керування силовим ключем.

Загальний принцип роботи імпульсного джерела живлення можна подати як послідовність кількох процесів:

- комутація енергії силовим ключем;
- накопичення енергії в індуктивному елементі або трансформаторі;
- передавання накопиченої енергії до навантаження; фільтрація вихідної напруги LC-фільтром;

– стабілізація вихідних параметрів за допомогою зворотного зв'язку.

Під час відкритого стану ключа енергія надходить до накопичувального елемента, а після його закриття передається до навантаження через діод або синхронний випрямляч. Вихідний конденсатор зменшує пульсації напруги, а дросель забезпечує плавність зміни струму. Саме поєднання ключового режиму, накопичення енергії та фільтрації формує основу роботи більшості DC-DC перетворювачів.

Імпульсні перетворювачі можуть працювати у режимі безперервного струму (CCM) або режимі переривчастого струму (DCM). У режимі CCM струм через дросель не знижується до нуля протягом періоду перемикавання, що забезпечує менші пульсації та стабільніший режим роботи. У режимі DCM струм дроселя періодично падає до нуля, що характерно для малих навантажень або недостатньої індуктивності.

На рисунку 1.1 наведено часові діаграми роботи імпульсного перетворювача у режимах CCM та DCM.

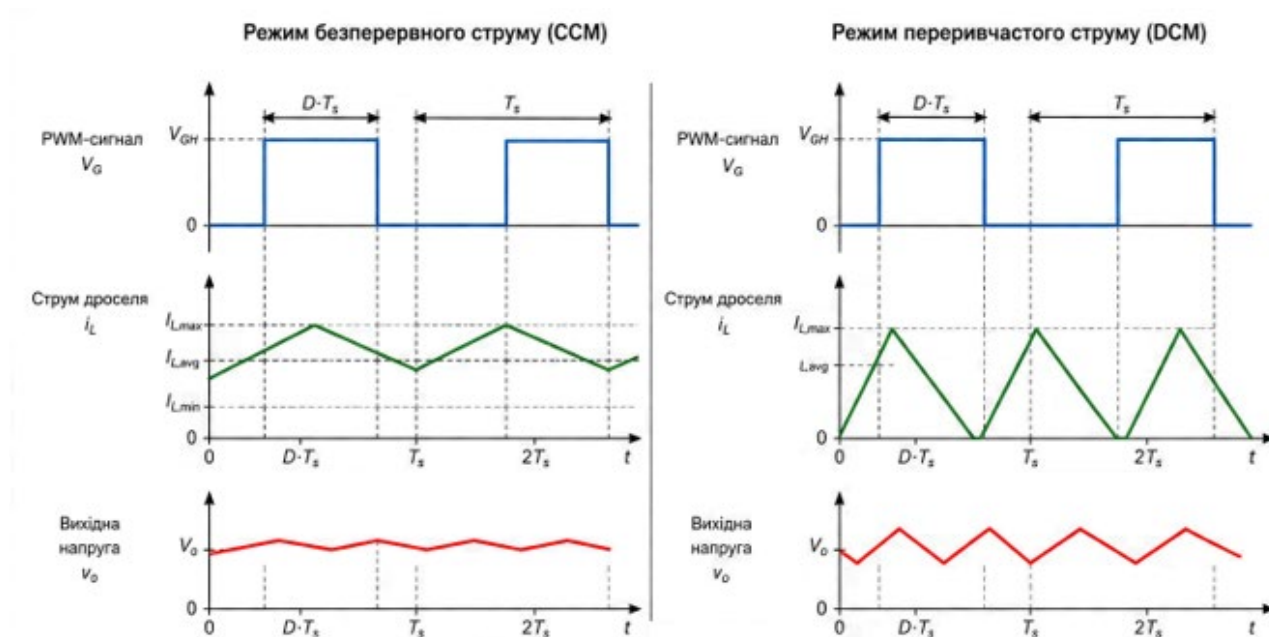


Рисунок 1.1 – Часові діаграми роботи імпульсного перетворювача [6]

На діаграмах показано PWM-сигнал керування, струм через дросель та вихідну напругу. У режимі CCM струм дроселя змінюється навколо середнього значення і не переривається, тому пульсації вихідної напруги є меншими. У режимі DCM струм дроселя в частині періоду дорівнює нулю, що може збільшувати амплітуду пульсацій і знижувати ефективність роботи перетворювача.

Основним методом регулювання в імпульсних джерелах живлення є широтно-імпульсна модуляція (PWM). Зміна коефіцієнта заповнення імпульсів дає змогу змінювати середнє значення енергії, яка передається до навантаження, а отже - підтримувати задану вихідну напругу.

У таблиці 1.1 подано порівняння імпульсних і лінійних джерел живлення.

Таблиця 1.1 – Порівняння імпульсних і лінійних джерел живлення

Параметр	Імпульсні джерела живлення	Лінійні стабілізатори
ККД	85...98 %	30...60 %
Габарити	Малі	Великі
Тепловиділення	Низьке	Високе
Складність	Вища	Нижча
Пульсації	Наявні	Мінімальні

Таблиця 1.1 демонструє, що імпульсні джерела живлення мають значно вищий ККД та менші габарити порівняно з лінійними стабілізаторами.

В таблиці 1.2 розглянемо режими роботи імпульсних перетворювачів.

Таблиця 1.2 – Режими роботи імпульсних перетворювачів

Режим	Позначення	Особливості	Переваги	Недоліки
Безперервний	CCM	Струм $\neq 0$	Високий ККД	Складніше керування
Переривчастий	DCM	Струм = 0	Простота реалізації	Пульсації

Отже, у даному підпункті розглянуто загальні фізичні принципи роботи імпульсних джерел живлення: ключовий режим силового транзистора, накопичення та передавання енергії, фільтрацію вихідної напруги, PWM-регулювання та режимами CCM/DCM.

1.3 Аналогове та цифрове керування перетворювачами

Система керування є одним із основних елементів імпульсних DC-DC перетворювачів, оскільки саме вона забезпечує стабілізацію вихідної напруги, регулювання режимів роботи та підвищення енергоефективності системи. У сучасній силовій електроніці застосовуються два основні підходи до керування: аналогове та цифрове [2].

Аналогові системи керування тривалий час були основою більшості імпульсних джерел живлення завдяки простоті реалізації та високій швидкодії. Проте розвиток мікроконтролерної техніки та цифрової обробки сигналів сприяв широкому впровадженню цифрового керування на базі сучасних платформ, зокрема STMicroelectronics STM32 [3].

Аналогове керування базується на використанні операційних підсилювачів, компараторів, генераторів пилоподібної напруги та аналогових PWM-контролерів. Основним принципом є порівняння сигналу зворотного зв'язку із опорною напругою для формування керуючого PWM-сигналу [2].

На рис. 1.2 показано типову структуру аналогової системи керування, яка включає джерело опорної напруги, підсилювач похибки, генератор пилоподібного сигналу, компаратор та драйвер силового ключа.

Основними методами аналогового керування є:

- керування за напругою (Voltage Mode Control);
- керування за струмом (Current Mode Control).

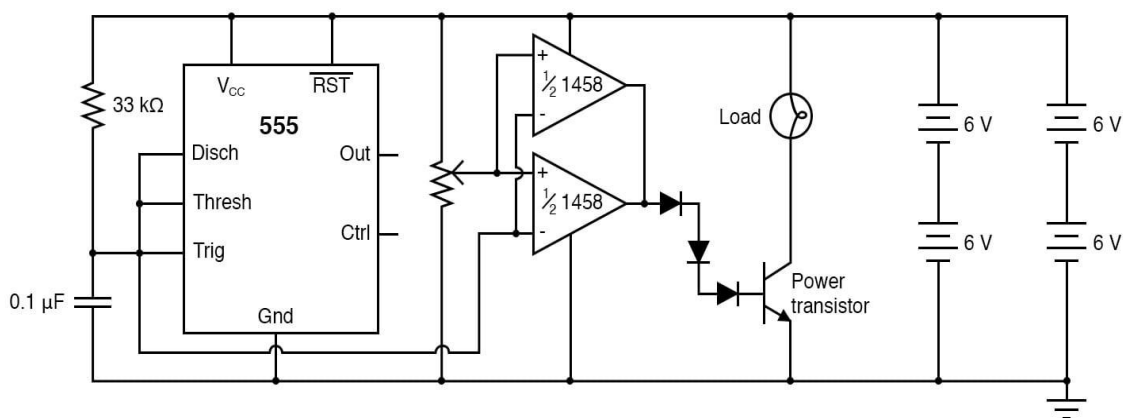


Рисунок 1.2 – Структурна схема аналогового керування імпульсним перетворювачем [3]

Перевагами аналогового керування є:

- висока швидкодія;
- простота реалізації;
- невелика вартість.

До недоліків належать:

- обмежена гнучкість;
- складність переналаштування;
- залежність параметрів від температури та старіння елементів [2].

Цифрове керування реалізується за допомогою мікроконтролерів або цифрових сигнальних процесорів (DSP). Аналогові сигнали напруги та струму перетворюються за допомогою АЦП у цифрову форму, після чого обробляються програмними алгоритмами [7].

Сучасні цифрові системи дозволяють реалізовувати складні алгоритми стабілізації, адаптивного регулювання та моніторингу параметрів у реальному часі.

На рисунку 1.3 подано структурну схему цифрового керування імпульсним перетворювачем.

Дана структура цифрової системи керування включає:

- АЦП для вимірювання напруги та струму;

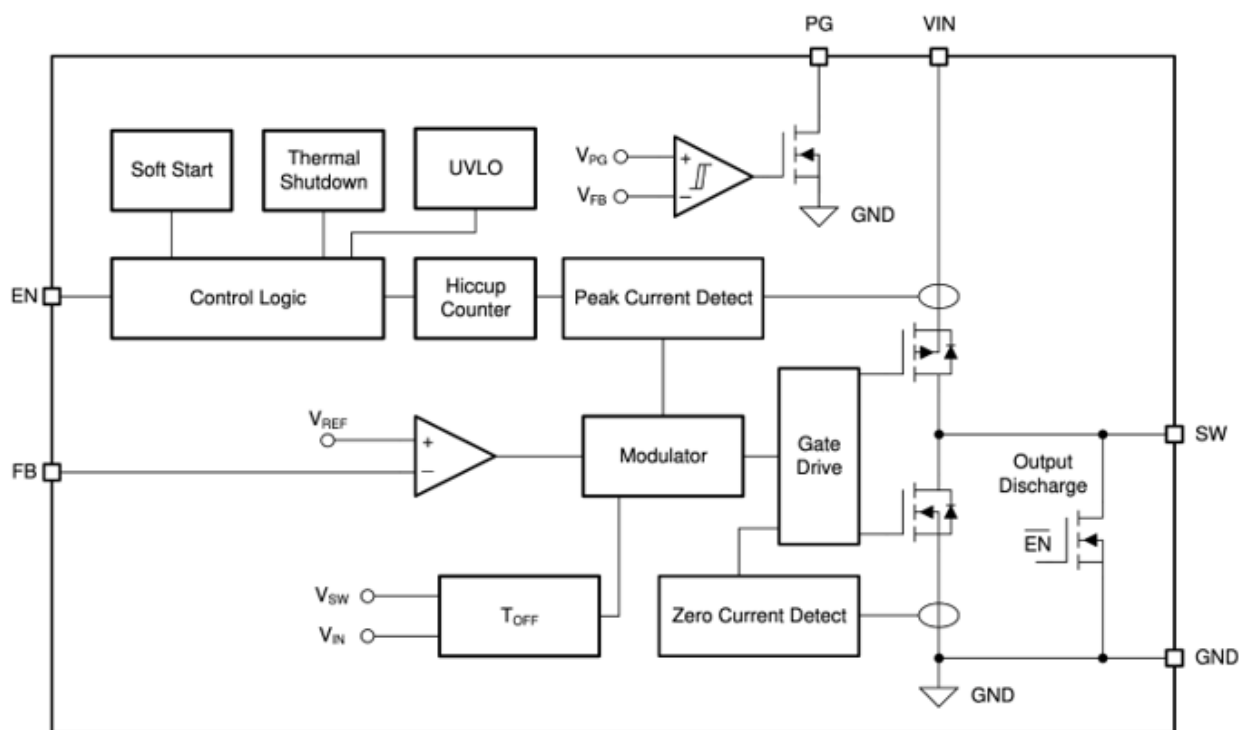


Рисунок 1.3 – Структурна схема цифрового керування імпульсним перетворювачем [7]

- мікроконтролер STM32;
- програмний PID-регулятор;
- PWM-модуль;
- драйвер силового MOSFET-транзистора.

Основними перевагами цифрового керування є:

- гнучкість налаштування;
- реалізація складних алгоритмів;
- адаптивність до зміни режимів роботи;
- інтеграція з IoT-системами та засобами моніторингу [3, 7].

Недоліками є:

- складність програмної реалізації;
- затримки цифрової обробки;
- необхідність налагодження програмного забезпечення.

Одним із найпоширеніших методів цифрового регулювання є PID-керування, яке враховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові

сигналу похибки (рисунок 1.4).

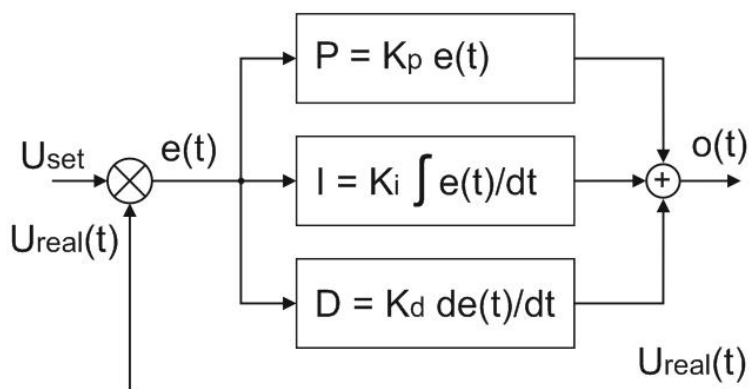


Рисунок 1.4 – Блок-схема PID-регулятора у системі керування перетворювачем [10]

PID-регулятор забезпечує:

- швидку реакцію на зміну навантаження;
- зменшення перерегулювання;
- стабілізацію вихідної напруги;
- покращення динамічних характеристик системи.

У сучасних дослідженнях також використовуються адаптивні, нечіткі та предиктивні алгоритми керування, які забезпечують ще вищу ефективність систем живлення [10].

У сучасній силовій електроніці спостерігається активний перехід до цифрових систем керування, особливо у:

- телекомунікаційних системах;
- електромобілях;
- IoT-пристроях;
- промисловій автоматизації;
- автономних системах живлення.

Таблиця 1.3 демонструє, що цифрові системи керування мають значно ширші функціональні можливості порівняно з аналоговими системами.

Мікроконтролери STM32 є одними з найбільш поширених платформ для

реалізації цифрового керування завдяки наявності вбудованих PWM-модулів, АЦП, таймерів та високої продуктивності.

Таблиця 1.3 – Порівняння аналогового та цифрового керування

Параметр	Аналогове керування	Цифрове керування
Швидкодія	Висока	Середня
Гнучкість	Низька	Висока
Складність	Низька	Вища
Надійність	Висока	Висока
Адаптивність	Низька	Вища
Реалізація алгоритмів	Висока	Висока

Отже, аналогове керування характеризується простотою та високою швидкодією, тоді як цифрове забезпечує гнучкість, адаптивність і можливість реалізації складних алгоритмів стабілізації. У сучасних умовах найбільш перспективним є цифрове керування на базі STM32, що забезпечує високу ефективність та функціональність імпульсних DC-DC перетворювачів.

Підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) та забезпечення стабільності роботи є ключовими завданнями при проєктуванні імпульсних DC-DC перетворювачів. Високий ККД дозволяє зменшити втрати енергії та тепловиділення, а стабільність – гарантує надійність роботи системи при зміні навантаження та вхідної напруги. У сучасних дослідженнях основна увага приділяється оптимізації схемних рішень, вибору елементної бази та застосуванню цифрових методів керування [11].

Розглянемо основні джерела втрат у перетворювачах. Втрати енергії в імпульсних перетворювачах виникають у таких елементах:

- силові ключі (MOSFET) – втрати на перемикування та провідність;
- індуктивності – втрати в обмотках і магнітопроводах;
- діоди – прямі втрати напруги;
- конденсатори – еквівалентний послідовний опір (ESR) [2].

Розглянемо методи підвищення ККД:

1. Використання синхронного випрямлення. Заміна діодів на керовані MOSFET-транзистори дозволяє суттєво зменшити втрати на прямому спаду напруги, що особливо важливо при низьких вихідних напругах [3].

2. Застосування сучасних напівпровідникових матеріалів. Використання транзисторів на основі SiC (карбід кремнію) та GaN (нітрид галію) дозволяє:

- зменшити втрати на перемикання;
- підвищити частоту роботи;
- знизити тепловиділення [1].

3. Оптимізація частоти перемикання. Підвищення частоти зменшує розміри індуктивностей і конденсаторів, але збільшує втрати на перемикання. Тому необхідно знаходити компроміс між ККД та габаритами [2].

Методи м'якого перемикання. Методи Zero Voltage Switching (ZVS) та Zero Current Switching (ZCS) дозволяють зменшити втрати при перемиканні силових ключів [1].

Стабільність перетворювача визначається здатністю підтримувати постійні параметри вихідної напруги при зміні умов роботи.

Розглянемо методи забезпечення стабільності:

1. Використання зворотного зв'язку. Замкнена система керування дозволяє компенсувати вплив зовнішніх факторів і стабілізувати вихідну напругу [4].

2. Компенсація частотних характеристик. Для забезпечення стійкості системи використовуються:

- PI/PID-регулятори;
- фазова компенсація;
- корекція передатної функції.

3. Цифрові алгоритми керування. Сучасні системи використовують:

- адаптивні алгоритми;
- предиктивне керування;
- цифрові фільтри [3].

На рисунку 1.5 подана схем системи керування зі зворотним зв'язком та забезпечення стабільності

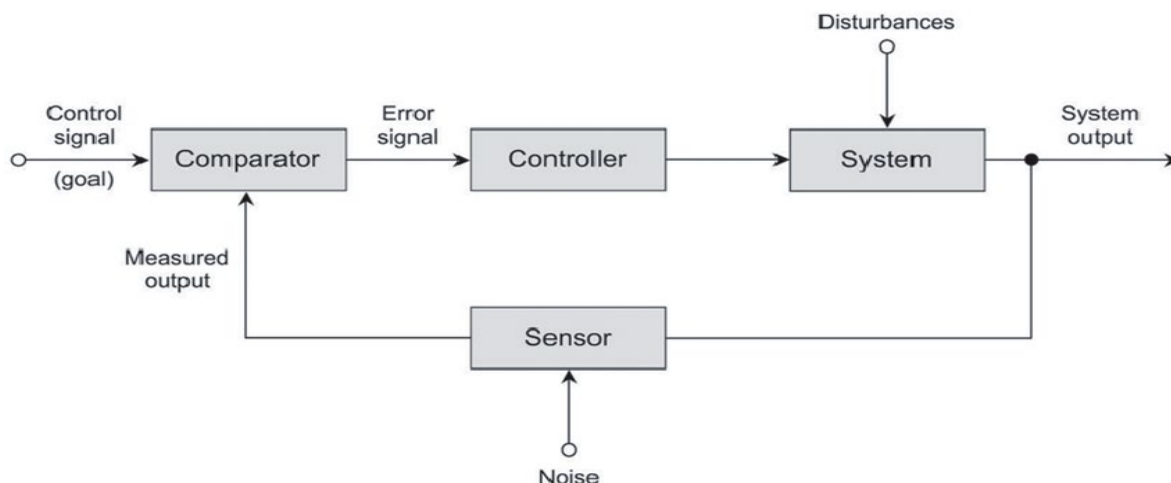


Рисунок 1.5 – Система керування зі зворотним зв'язком та забезпечення стабільності [10]

Таким чином, підвищення ККД імпульсних перетворювачів досягається за рахунок оптимізації силових елементів, застосування сучасних матеріалів та використання ефективних режимів перемикавання.

У таблиці 1.4 розглянемо порівняльний аналіз методів.

Таблиця 1.4 – Методи підвищення ККД та стабільності

Метод	Вплив на ККД	Вплив на стабільність	Складність
Синхронне випрямлення	Високий	Середній	Середня
SiC / GaN	Дуже високий	Середній	Висока
ZVS / ZCS	Високий	Високий	Висока
PID-керування	Середній	Високий	Середня
Цифрове керування	Високий	Дуже високий	Висока

Забезпечення стабільності реалізується шляхом використання систем зворотного зв'язку та цифрових алгоритмів керування. Найбільш перспективним напрямом є поєднання високоефективної силової частини з цифровим керуванням на базі мікроконтролерів STM32, що дозволяє досягти оптимальних енергетичних та динамічних характеристик.

1.4 Огляд сучасних мікроконтролерів STM32 для цифрового керування

Сучасні імпульсні DC-DC перетворювачі все частіше використовують цифрові системи керування, що дозволяє реалізувати складні алгоритми регулювання, підвищити точність стабілізації та забезпечити адаптивність до змін навантаження. Ключову роль у таких системах відіграють мікроконтролери, серед яких особливе місце займає сімейство STM32 від компанії STMicroelectronics [3]. Мікроконтролери STM32 базуються на ядрах ARM Cortex-M та поєднують високу продуктивність, енергоефективність і широкий набір периферійних модулів, що робить їх оптимальними для застосування у силовій електроніці та системах цифрового керування [4].

Сімейство STM32 включає декілька серій (STM32F0, F1, F3, F4, G4, H7 тощо), які відрізняються продуктивністю, енергоспоживанням та набором периферії. Для задач керування імпульсними перетворювачами найбільш придатними є серії STM32F3, STM32G4 та STM32F4, що мають розширені можливості для роботи з аналоговими сигналами та ШІМ [3].

На рисунку 1.9 подано узагальнену архітектуру мікроконтролера STM32.

Як показано на рисунку 1.6, типова структура STM32 включає:

- ядро ARM Cortex-M;
- оперативну та флеш-пам'ять;
- системні шини (AHB, APB);
- периферійні модулі (АЦП, ЦАП, таймери, UART, SPI);
- модулі ШІМ та апаратні компаратори.

Для реалізації цифрового керування імпульсними джерелами живлення STM32 мають такі важливі апаратні можливості:

- таймери з підтримкою ШІМ – забезпечують генерацію сигналів;
- керування силовими ключами з високою роздільною здатністю;
- аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) – використовуються для вимірювання напруги та струму в системі;
- апаратні компаратори – дозволяють реалізувати швидкий захист від

перевантаження;

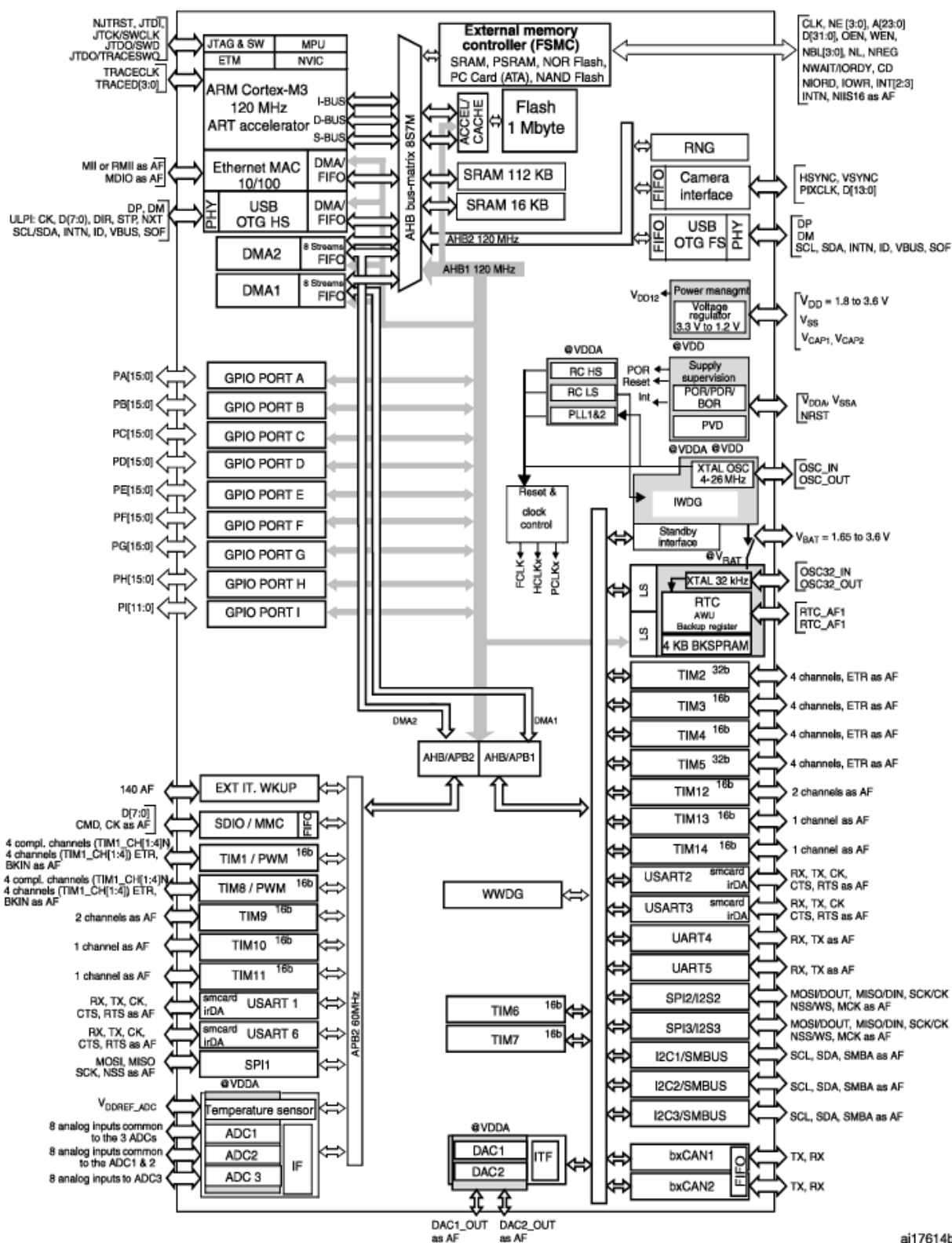


Рисунок 1.9 – Узагальнена архітектура мікроконтролера STM32 [3]

- DMA (Direct Memory Access) – забезпечує швидкий обмін даними без

навантаження на процесор;

– інтерфейси зв'язку (UART, SPI, I2C) – використовуються для моніторингу та інтеграції системи [10].

Ці модулі дозволяють реалізувати повноцінну систему керування DC–DC перетворювачем без використання додаткових спеціалізованих контролерів.

У типовій системі STM32 виконує такі функції:

- зчитування сигналів із датчиків (напруга, струм);
- обробка даних за допомогою алгоритмів керування (PID);
- генерація ШІМ-сигналів;
- реалізація захистів (перенапруга, перевантаження);
- обмін даними з користувачем або іншими системами.

Згідно з сучасними дослідженнями, цифрове керування на базі STM32 дозволяє підвищити точність стабілізації напруги, зменшити пульсації та покращити динамічні характеристики перетворювачів [3].

Основними перевагами мікроконтролерів STM32 у задачах керування імпульсними перетворювачами є:

- висока продуктивність (до сотень МГц);
- інтегровані периферійні модулі для силової електроніки;
- низьке енергоспоживання;
- підтримка цифрових алгоритмів керування;
- можливість масштабування системи [10].

Особливо важливим є наявність спеціалізованих серій (наприклад, STM32G4), які орієнтовані саме на силову електроніку та містять високошвидкісні АЦП і вдосконалені таймери [12, 13].

У таблиці 1.5 подано порівняння STM32 з іншими мікроконтролерами.

Отже, мікроконтролери STM32 є ефективною платформою для реалізації цифрового керування імпульсними DC-DC перетворювачами.

Вони поєднують високу продуктивність, розвинену периферію та гнучкість програмування, що дозволяє реалізувати складні алгоритми керування та забезпечити високі енергетичні характеристики систем живлення.

Таблиця 1.5 – Порівняння мікроконтролерів для керування DC-DC перетворювачами

Параметр	STM32	AVR	PIС
Продуктивність	Висока	Середня	Середня
ШІМ	Розширений	Базовий	Базовий
АЦП	Високоточний	Середній	Середній
Частота	До 480 МГц	До 20 МГц	До 64 МГц
Периферія	Розширена	Обмежена	Середня
Придатність до SMPS	Висока	Низька	Середня

Саме тому STM32 є доцільним вибором для реалізації досліджуваного перетворювача у даній роботі.

1.5 Аналіз існуючих технічних рішень і вибір структури перетворювача

Під час вибору структури імпульсного DC-DC перетворювача для цифрового керування насамперед враховують співвідношення вхідної та вихідної напруг, вимоги до стабільності, ККД, складності силової частини та можливостей реалізації алгоритмів керування на мікроконтролері. За рекомендаціями Texas Instruments, якщо вхідна напруга завжди вища за необхідну вихідну, першочерговим вибором є buck-перетворювач; якщо вхідна напруга завжди нижча – boost-перетворювач; якщо ж вхідна напруга може бути як вищою, так і нижчою за потрібну вихідну, доцільно використовувати buck-boost-перетворювач, зокрема чотириключову неінвертувальну структуру [5]. Сучасні оглядові роботи також підтверджують, що buck, boost і buck-boost залишаються базовими неізольованими топологіями, на основі яких будуються більш складні високоефективні рішення [5].

Найпростішим технічним рішенням є понижувальний buck-перетворювач. Його перевагами є проста силова схема, мала кількість компонентів, високий ККД та відносно нескладна реалізація цифрового керування. STMicroelectronics

у своїй прикладній документації для STM32G4 прямо використовує синхронний step-down converter як базовий приклад цифрового силового застосування та окремо описує реалізацію peak-current-mode control на STM32 [3]. Це свідчить про добру придатність buck-структури для навчальних і прикладних проєктів, у яких потрібно реалізувати ШІМ-керування, зворотний зв'язок, захисти та дослідження динамічних характеристик [6].

Другим поширеним рішенням є boost-перетворювач, який доцільно застосовувати тоді, коли необхідно підвищити вхідну напругу. Така топологія є ефективною для систем із низьковольтним джерелом живлення, однак у разі перевищення вхідної напруги над вихідною вона вже не є оптимальною. Крім того, boost-структура ускладнює забезпечення стабільної роботи в ширшому діапазоні режимів, якщо система має змінні умови живлення [5].

Більш універсальним рішенням є buck-boost-перетворювач. У систематичному огляді 2026 року зазначено, що buck-boost-топологія є універсальною, оскільки здатна як підвищувати, так і знижувати напругу, що робить її особливо придатною для систем зі змінними параметрами живлення [2]. Texas Instruments також вказує, що саме 4-switch non-inverting buck-boost підтримує постійну вихідну напругу впродовж розряду батареї та компенсує просідання напруги на джерелі й у вхідному тракті, але при цьому є дорожчим і складнішим за buck або boost-рішення [6]. Отже, перевага buck-boost полягає в універсальності, а недолік – у більшій кількості силових ключів, складнішому алгоритмі керування та вищих вимогах до налагодження [6].

Окрему групу становлять синхронні перетворювачі, у яких діод замінюється керованим MOSFET-транзистором. Для synchronous buck це дозволяє знизити втрати та підвищити ККД. Texas Instruments у прикладному матеріалі з розрахунку ефективності synchronous buck converter показує, що основна частина втрат припадає на ключі та індуктивність, а отже саме синхронна структура є доцільною для підвищення ККД у практичних реалізаціях [6]. Тому при виборі між асинхронним і синхронним варіантами для сучасної мікроконтролерної системи перевагу доцільно віддати саме

синхронному виконанню [6].

За способом керування існуючі технічні рішення можна умовно поділити на три групи:

1. Спеціалізовані аналогові ШІМ-контролери.
2. Мікроконтролерні цифрові системи керування.
3. Гібридні рішення, у яких частина функцій реалізована апаратно, а частина – програмно.

Аналогові рішення мають високу швидкодію, однак поступаються цифровим за гнучкістю зміни параметрів і реалізації складних алгоритмів. Microchip у технічному описі synchronous buck з analog control підкреслює, що аналогова петля має дуже швидку реакцію на зміну навантаження та вхідної напруги [6]. Водночас Microchip в іншому прикладному документі показує, що мікроконтролерне керування buck converter дає вищу гнучкість і дозволяє реалізувати замкнений контур регулювання із залученням периферійних модулів без значного навантаження на ядро процесора [6]. Для бакалаврської роботи, де важливі не лише енергетичні показники, а й можливість програмної модифікації алгоритму, цифровий підхід є більш доцільним [6].

Для цифрового керування імпульсним перетворювачем доцільно використовувати мікроконтролери сімейства STM32G4, оскільки STMicroelectronics прямо позиціонує їх як платформу для digital power. Згідно з user manual для B-G474E-DPOW1, мікроконтролер STM32G474RET6 має HRTimer-орієнтовані функції, математичні апаратні прискорювачі, 5 АЦП до 5 MSPS, компаратори, операційні підсилювачі та інші периферійні модулі, потрібні для побудови цифрового керування перетворювачами [6]. Крім того, екосистема STM32 Digital Power Workbench підтримує аналіз і налаштування кількох топологій з повним цифровим керуванням на STM32G4 [6]. Це підтверджує, що STM32 є не просто універсальним мікроконтролером, а спеціально підготовленою платформою для цифрових джерел живлення [6].

У таблиці 1.6 подано порівняльну оцінку технічних рішень. Дана таблиця узагальнює, що для навчально-дослідної роботи найкращий баланс між

складністю, ефективністю та можливістю експериментального дослідження забезпечує синхронний buck-перетворювач із цифровим керуванням на базі STM32 [6].

З урахуванням теми роботи – найбільш раціональним є вибір неізольованого синхронного buck-перетворювача з цифровим контуром регулювання.

Такий вибір обґрунтовується тим, що:

- buck-топологія є базовою і найпростішою для практичної реалізації, якщо вхідна напруга є вищою за вихідну [5];

- ST має готову прикладну базу саме для synchronous buck та current-mode control на STM32G4 [4, 5];

- синхронне виконання дозволяє підвищити ККД порівняно з асинхронним варіантом [6];

- цифрове керування на STM32 дає змогу реалізувати ШІМ, вимірювання напруги та струму, програмну компенсацію, захисти й подальше розширення алгоритму керування [6].

Водночас слід зазначити, що у випадку, коли для об'єкта проектування очікується широкий діапазон вхідної напруги, за якого вона може бути як вищою, так і нижчою за вихідну, перспективнішою була б структура 4-switch non-inverting buck-boost [8]. Отже, остаточний вибір synchronous buck у межах цієї роботи є технічно доцільним саме для типового варіанта живлення від джерела з вищою постійною напругою, наприклад 12 В, із формуванням стабілізованої нижчої напруги для навантаження та цифрової електроніки [14].

Отже, аналіз існуючих технічних рішень показав, що buck-, boost- і buck-boost-перетворювачі мають різну область раціонального застосування.

Для бакалаврської роботи, орієнтованої на цифрове керування за допомогою STM32, найбільш доцільною є структура синхронного buck-перетворювача, оскільки вона забезпечує простоту силової частини, високий ККД, добру сумісність із периферією STM32G4 та зручність реалізації алгоритмів цифрового регулювання [6, 12].

Таблиця 1.6 – Порівняння існуючих технічних рішень для реалізації DC-DC перетворювача

Технічне рішення	Переваги	Недоліки	Доцільність для роботи
Buck, аналогове керування	Проста схема, висока швидкодія	Менша гнучкість налаштування	Середня
Buck, цифрове керування STM32	Високий ККД, проста топологія, зручне програмне керування	Потрібне програмування та налагодження	Висока
Boost, цифрове керування	Ефективний при $V_{IN} < V_{OUT}$	Не універсальний при змінному V_{IN}	Середня
4-switch buck-boost, цифрове керування	Широкий діапазон V_{IN} , стабільний V_{OUT} , універсальність	Вища складність і вартість	Висока, але для складніших систем
Спеціалізований контролер без МК	Швидкий запуск, готова апаратна база	Менша дослідницька гнучкість	Низька

Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшого схемного проєктування, розрахунку параметрів та реалізації DC-DC перетворювача з цифровим керуванням, що розглядається у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

СХЕМНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧА

2.1 Структурна схема DC-DC перетворювача

На підставі аналітичного огляду для подальшого проєктування обрано неізовльований синхронний понижувальний DC-DC перетворювач (synchronous buck converter) з цифровим керуванням на базі STM32. Такий варіант є доцільним для систем, у яких вхідна напруга вища за вихідну, а також для живлення вбудованих електронних пристроїв, сенсорних вузлів, телекомунікаційних модулів та лабораторних прототипів.

Узагальнена структура імпульсного джерела живлення з цифровим керуванням наведена на рисунку 2.1.

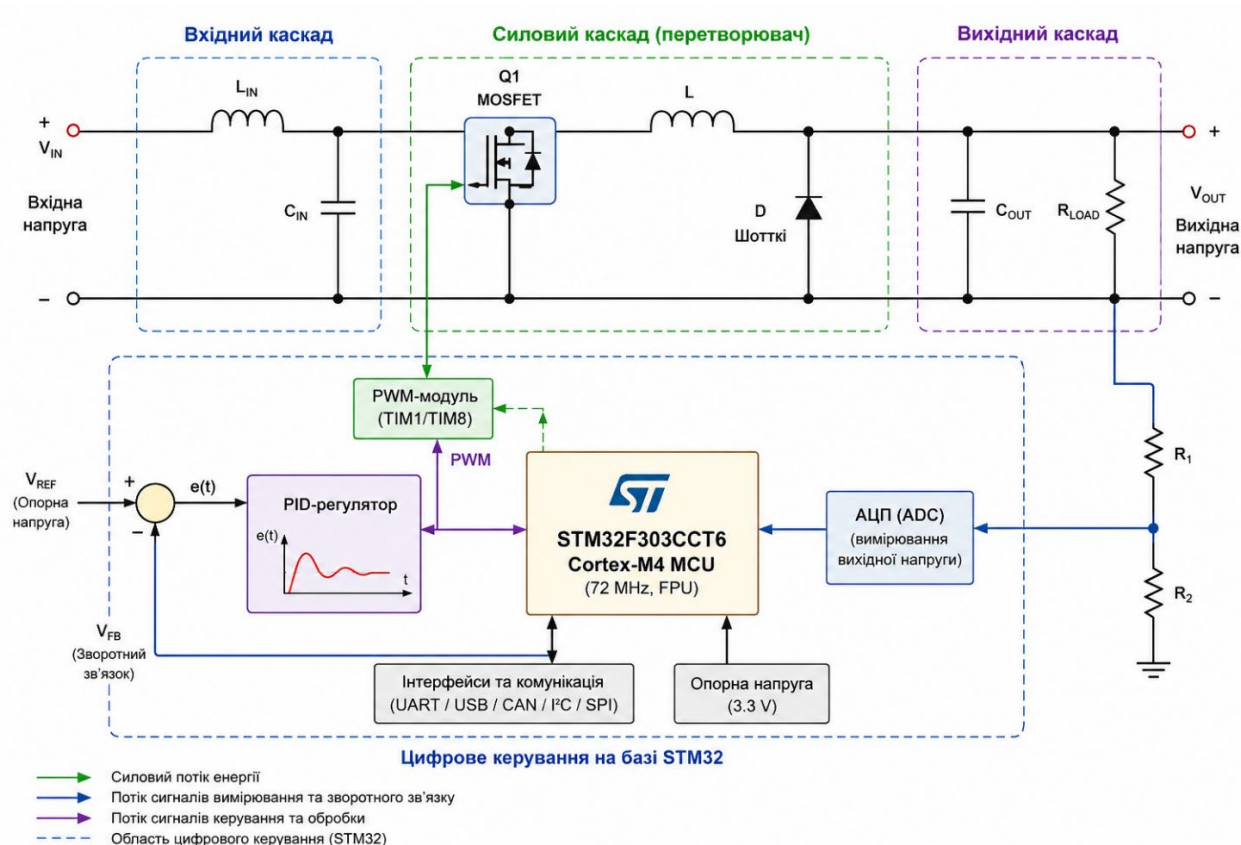


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема імпульсного джерела живлення з цифровим керуванням на базі STM32 [5]

Вона демонструє не лише силовий шлях передавання енергії, а й контур керування, який забезпечує стабілізацію вихідної напруги за рахунок вимірювання параметрів, цифрової обробки сигналів та формування PWM-сигналу [1-3,12].

Узагальнена схема містить вхідний каскад, силову частину, вихідний фільтр, навантаження та блок цифрового керування. Вхідний каскад призначений для подавання постійної напруги та зменшення високочастотних завад. Силова частина виконує перетворення енергії за допомогою MOSFET-ключів, дроселя та випрямного елемента або синхронного ключа. Вихідний LC-фільтр зменшує пульсації та формує стабілізовану вихідну напругу.

Блок цифрового керування реалізується на базі мікроконтролера STM32 і включає PWM-модуль, аналого-цифровий перетворювач, програмний регулятор і канали зворотного зв'язку. Вихідна напруга вимірюється через подільник напруги, оцифровується АЦП та порівнюється з опорним значенням. За результатом цього порівняння регулятор змінює коефіцієнт заповнення PWM-сигналу, що дозволяє підтримувати стабільну вихідну напругу при зміні навантаження.

У цій структурі вхідний фільтр зменшує електромагнітні завади та стабілізує вхідну напругу. Силовий каскад реалізований за понижувальною топологією Buck і містить MOSFET-транзистор, дросель та випрямний елемент. Під час відкритого стану ключа енергія накопичується у дроселі, а після закриття ключа передається до навантаження через діод або синхронний ключ. Вихідний конденсатор згладжує пульсації напруги та забезпечує стабільний режим роботи.

Мікроконтролер STM32 у такій системі виконує три основні функції: вимірювання вихідних параметрів, обчислення керуючої дії та формування PWM-сигналу для силового драйвера. Наявність швидкодіючих АЦП, таймерів, DMA, компараторів і апаратної підтримки математичних операцій робить STM32 придатним для реалізації цифрового керування DC-DC перетворювачами. Окремо слід врахувати, що виходи мікроконтролера не

можуть безпосередньо керувати силовими MOSFET-транзисторами, тому між STM32 і силовою частиною використовується драйвер ключів.

Обрана структура має низку переваг:

- простота силової топології, характерна для buck-перетворювача;
- можливість реалізації цифрового замкненого контуру на базі STM32 [1], [2];
- високий потенційний ККД завдяки синхронній схемі;
- зручність дослідження динамічних процесів, оскільки структура чітко поділена на силову та керуючу частини;
- можливість подальшого розширення, зокрема додавання телеметрії, інтерфейсів зв'язку, захистів і складніших алгоритмів керування.

В таблиці 2.1 подано функціональне призначення блоків структурної схеми.

Таблиця 2.1 – Функціональне призначення блоків структурної схеми

Блок	Основне призначення	Основні елементи
Вхідне коло	Подача та попередня фільтрація енергії	Джерело живлення, Сin, ЕМІ-фільтр
Силова частина	Перетворення вхідної напруги у стабілізовану вихідну	MOSFET, драйвер, дросель, Cout
Вимірювальний вузол	Формування сигналів зворотного зв'язку	Дільник напруги, шунт/датчик струму, фільтри
STM32	Обчислення керуючого впливу	АЦП, PWM/HRTIM, PID/IIR, логіка захисту
Навантаження	Споживання стабілізованої енергії	Активне або активно-індуктивне навантаження

Таблиця 2.1 показує, що структурна схема є логічно завершеною та придатною для подальшого переходу до принципової електричної схеми, розрахунку елементів і опису алгоритму цифрового керування. Такий підхід

відповідає сучасній практиці проєктування цифрових джерел живлення на STM32 [15].

Отже, для подальшого проєктування обрано структурну схему синхронного понижувального DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32. Така структура забезпечує високу енергоефективність, можливість реалізації замкненого контуру регулювання та придатність до дослідження енергетичних і динамічних характеристик перетворювача [15].

2.2 Вибір топології DC-DC перетворювача

У цьому підрозділі виконано практичне обґрунтування вибору топології для подальшого схемного проєктування імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32. Вихідними критеріями є: потрібний напрям перетворення напруги, простота керування через PWM, можливість вимірювання вихідної напруги АЦП мікроконтролера, рівень пульсацій, теплове навантаження силових елементів і доступність готових модулів для порівняльного дослідження [1].

Для навчально-дослідної роботи доцільно розглядати дві базові практичні реалізації: понижуючий модуль на основі LM2596 та підвищуючий модуль на основі MT3608. Такі модулі є поширеними, мають зрозумілу структуру силової частини та дозволяють наочно порівняти поведінку Buck і Boost топологій при зміні коефіцієнта заповнення PWM, навантаження та вхідної напруги. При цьому мікроконтролер STM32 використовується не як заміна силового модуля, а як цифровий вузол вимірювання, керування, регулювання та захисту.

Розглянемо практичний варіант Buck-топології на основі готового модуля LM2596. Понижуючий перетворювач Buck є основним кандидатом для реалізації пристрою, якщо вихідна напруга повинна бути меншою за вхідну. Для прикладного дослідження зручно використати готовий модуль LM2596, оскільки він має на платі основні елементи силової частини: мікросхему імпульсного стабілізатора, дросель, вхідні та вихідні конденсатори, діод Шотткі та

підстроювальний резистор для налаштування вихідної напруги. За даними постачальника, модуль LM2596 S-DIY-0302 працює з вхідною напругою 4,5...30 В, забезпечує регульовану вихідну напругу 1,25...30 В та максимальний вихідний струм до 2 А [6].

Для роботи на базі STM32 цей модуль можна використати у двох режимах. Перший режим – як готовий силовий перетворювач для аналізу стабільності вихідної напруги та пульсацій. Другий режим – як прототип силового каскаду, на основі якого розробляється власна схема з керуванням MOSFET від PWM-модуля STM32. У другому випадку важливо передбачити вимірювання вихідної напруги через подільник напруги та подання сигналу на АЦП мікроконтролера. Для типового випадку живлення цифрової електроніки від джерела 12 В доцільно формувати вихідну напругу 5 В або 3,3 В. В ідеальному режимі для Buck-перетворювача виконується співвідношення $V_{out} = D \cdot V_{in}$. Якщо $V_{in} = 12$ В, а потрібна напруга $V_{out} = 5$ В, то коефіцієнт заповнення становить $D = 5/12 = 0,417$, тобто приблизно 41,7 %. Це значення зручно реалізується таймером STM32 у режимі PWM.

На рисунку 2.2 показано готовий модуль LM2596. Наявність індуктивності, електролітичних конденсаторів і підстроювального резистора дозволяє використати його як наочний зразок для порівняння із розроблюваною схемою, а також для перевірки залежності вихідної напруги від режиму роботи силового ключа.

Розглянемо практичний варіант Boost-топології на основі модуля MT3608. Підвищуючий перетворювач Boost доцільно використовувати тоді, коли вихідна напруга повинна бути більшою за вхідну. Для порівняння із Buck-топологією можна використати готовий модуль MT3608. За технічними даними постачальника, модуль MT3608 працює з вхідною напругою 2...24 В, забезпечує регульовану вихідну напругу 5...28 В та має максимальний вихідний струм до 2 А [5].



Рисунок 2.2 - Готовий понижуючий DC-DC модуль LM2596 для практичного аналізу Buck-топології [5]

На відміну від Buck-перетворювача, у Boost-схемі під час замкненого стану ключа енергія накопичується в дроселі, а під час розмикання ключа передається на вихід разом із входною напругою. Через це залежність вихідної напруги від коефіцієнта заповнення є нелінійною. Для ідеального Boost-перетворювача справедливе співвідношення $V_{out} = V_{in} / (1-D)$.

Boost-топологія може бути корисною для автономних сенсорних вузлів, переносних пристроїв, живлення від Li-ion акумуляторів або сонячних панелей. Проте для бакалаврської роботи, орієнтованої на цифрове керування STM32 і стабілізацію вихідної напруги, ця топологія потребує складнішої компенсації, ретельнішого вибору дроселя та контролю струму.

На рисунку 2.3 показано готовий підвищуючий модуль MT3608. Його доцільно використати як порівняльний зразок для дослідження нелінійної залежності вихідної напруги від коефіцієнта заповнення PWM та оцінювання обмежень Boost-топології.

Зробимо порівняльне обґрунтування вибору топології.

Для вибору структури перетворювача потрібно порівняти не лише напрям перетворення напруги, а й складність цифрового керування.



Рисунок 2.3 – Готовий підвищуючий DC-DC модуль MT3608 для практичного аналізу Boost-топології [6]

Для STM32 важливо, щоб топологія мала передбачувану залежність вихідної напруги від коефіцієнта заповнення, невеликий рівень пульсацій та простий контур зворотного зв'язку. Порівняння наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння Buck та Boost топологій для цифрового керування на базі STM32

Критерій	Buck (LM2596/власна схема)	Boost (MT3608)	Висновок для роботи
Напрямок перетворення	Пониження напруги	Підвищення напруги	Для живлення STM32 та логіки доцільніший Buck
Залежність V_{out} від D	Лінійна: $V_{out} = D \cdot V_{in}$	Нелінійна: $V_{out} = V_{in}/(1-D)$	Buck простіший для налаштування
Рівень пульсацій	Нижчий	Вищий за великих D	Buck легше стабілізувати
Цифрове керування STM32	Простіше PWM + АЦП	Потребує точнішої компенсації	Buck краще для базової реалізації
Готовий модуль	LM2596	MT3608	Обидва доцільні для порівняння
Застосування	Живлення цифрових вузлів	Акумуляторні та автономні системи	Основний вибір - Buck

Проведемо моделювання залежності вихідної напруги від коефіцієнта заповнення PWM. Для кількісного порівняння Buck та Boost топологій використано просту Python-модель. Вона не враховує втрати на ключах, падіння напруги на діоді та активний опір дроселя, однак дозволяє побачити принципову різницю між лінійною та нелінійною залежністю вихідної напруги від коефіцієнта заповнення PWM.

Початково приймемо $V_{in} = 12$ В. Для Buck-перетворювача вихідна напруга зростає пропорційно D , а для Boost – різко збільшується при наближенні D до одиниці.

Це пояснює, чому Boost-топологія потребує більш обережного вибору діапазону керування та ефективного захисту від перенапруги.

Приклад Python-коду подано в лістингу 2.1.

Лістинг 2.1 - Python-код для порівняння Buck та Boost перетворювачів

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
Vin = 12.0
D = np.linspace(0.05, 0.9, 100)
Vout_buck = D * Vin
Vout_boost = Vin / (1 - D)
plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(D, Vout_buck, label="Buck converter")
plt.plot(D, Vout_boost, label="Boost converter")
plt.xlabel("Коефіцієнт заповнення PWM")
plt.ylabel("Вихідна напруга, В")
plt.title("Порівняння Buck та Boost перетворювачів")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()
```

Кінець лістингу 2.1

З рисунка 2.4 видно, що Buck-перетворювач має плавну лінійну характеристику, яка спрощує цифрове регулювання на STM32.

У Boost-перетворювачі при зростанні D напруга зростає нелінійно, тому навіть невелика похибка у PWM може спричинити значну зміну $U_{вих}$.

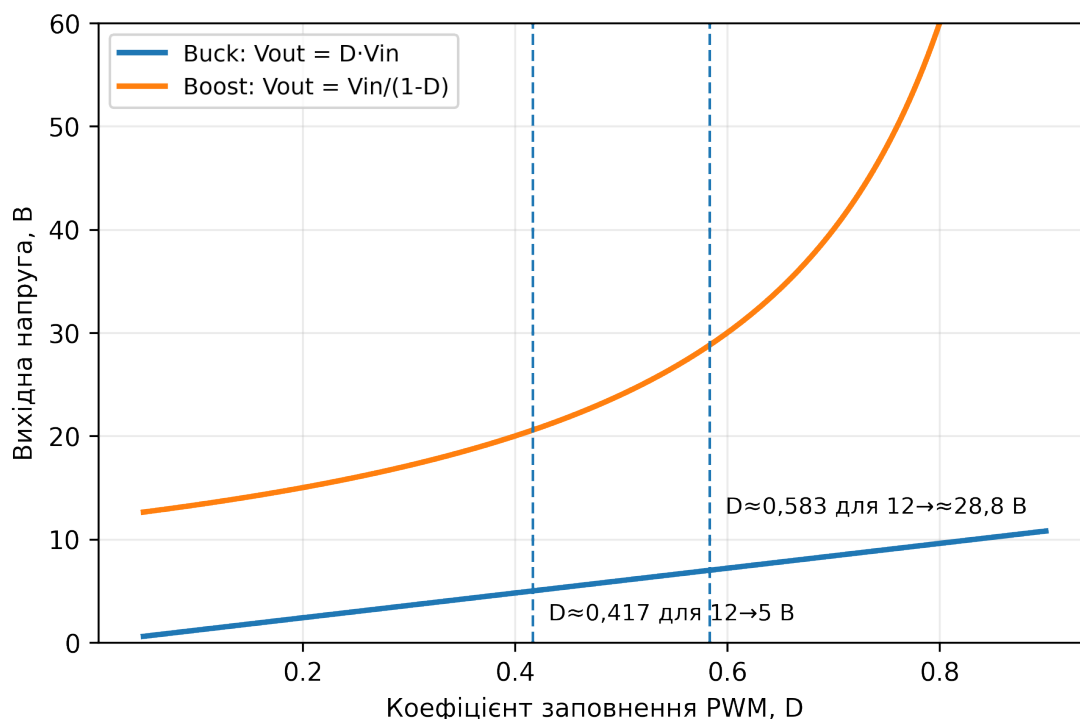


Рисунок 2.4 – Залежність вихідної напруги Buck та Boost перетворювачів від коефіцієнта заповнення PWM

З урахуванням поставленої задачі доцільно обрати Buck-топологію як основну. Вона краще підходить для живлення цифрових електронних вузлів, має простішу реалізацію зворотного зв'язку та дозволяє ефективно використовувати PWM-модуль STM32. Boost-топологія залишається корисною як порівняльна або допоміжна, якщо необхідно реалізувати підвищення напруги від акумуляторного джерела.

У практичній частині роботи готовий модуль LM2596 можна використати як контрольний зразок понижуючого перетворювача, а MT3608 – як зразок підвищуючого перетворювача. Такий підхід дозволяє порівняти реальні модулі з результатами моделювання та обґрунтувати вибір власної схеми на базі STM32 [14].

На рисунку 2.5 подано логіку вибору топології DC –DC-перетворювача для реалізації на базі STM32.

Таким чином, для досліджуваного перетворювача доцільно прийняти понижуючу Buck-топологію.

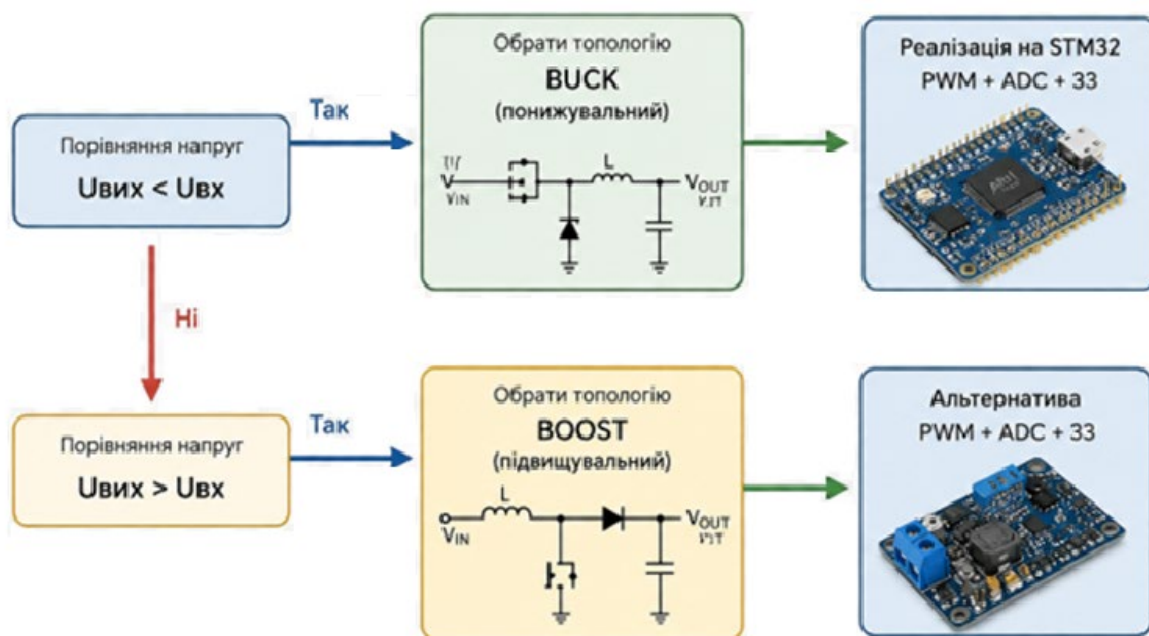


Рисунок 2.5 - Логіка вибору топології DC-DC перетворювача для реалізації на базі STM32 [6]

Вона забезпечує найкраще співвідношення простоти реалізації, енергоефективності, стабільності вихідної напруги та можливості цифрового керування на базі STM32.

2.3 Розробка функціональної схеми імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням

Функціональна схема імпульсного DC-DC BUCK-перетворювача відображає взаємодію між силовою частиною, системою цифрового керування, блоками вимірювання та навантаженням. Для даної роботи використано понижуючу BUCK-топологію, яка забезпечує високий коефіцієнт корисної дії, просте цифрове керування та низький рівень пульсацій вихідної напруги [3]. До складу функціональної схеми входять: вхідний фільтр, MOSFET-драйвер, силовий MOSFET-транзистор, дросель, діод Шотткі, вихідний LC-фільтр, мікроконтролер STM32, PWM-модуль та ADC. Основною функцією цифрової системи є стабілізація вихідної напруги шляхом зміни коефіцієнта заповнення

PWM-сигналу.

Силова частина Виск-перетворювача працює у ключовому режимі. Під час відкритого стану MOSFET енергія накопичується у дроселі, а після закриття ключа передається до навантаження через діод Шотткі. Вихідний конденсатор забезпечує згладжування пульсацій напруги та стабільність роботи системи [10].

Для реалізації цифрового керування використано мікроконтролер STM32F303CCT6, який містить високошвидкісні таймери PWM, 12-бітний ADC, DMA-контролер та апаратний модуль математичних обчислень. Використання STM32 дозволяє реалізувати PID-регулювання та цифровий моніторинг параметрів системи.

Вихідна напруга вимірюється за допомогою ADC через резистивний дільник напруги. Після перетворення сигнал надходить до програмного PID-регулятора, який виконує обчислення похибки між заданою та реальною напругою. На основі отриманого значення формується новий PWM-сигнал для керування MOSFET-транзистором.

У системі також передбачено захист від перевантаження та перенапруги. При перевищенні допустимих параметрів STM32 зменшує коефіцієнт заповнення PWM або повністю вимикає силовий ключ. Це забезпечує підвищення надійності роботи перетворювача.

Для аналізу характеристик системи використано Python-моделювання процесу стабілізації вихідної напруги. Моделювання дозволяє оцінити динаміку регулювання, стабільність системи та поведінку перетворювача при зміні навантаження.

Для аналізу характеристик системи використано Python-моделювання процесу стабілізації вихідної напруги. Моделювання дозволяє оцінити динаміку регулювання, стабільність системи та поведінку перетворювача при зміні навантаження [12, 15].

На рисунку 2.6 показано взаємозв'язок між силовою частиною

перетворювача та цифровим блоком керування на базі STM32.

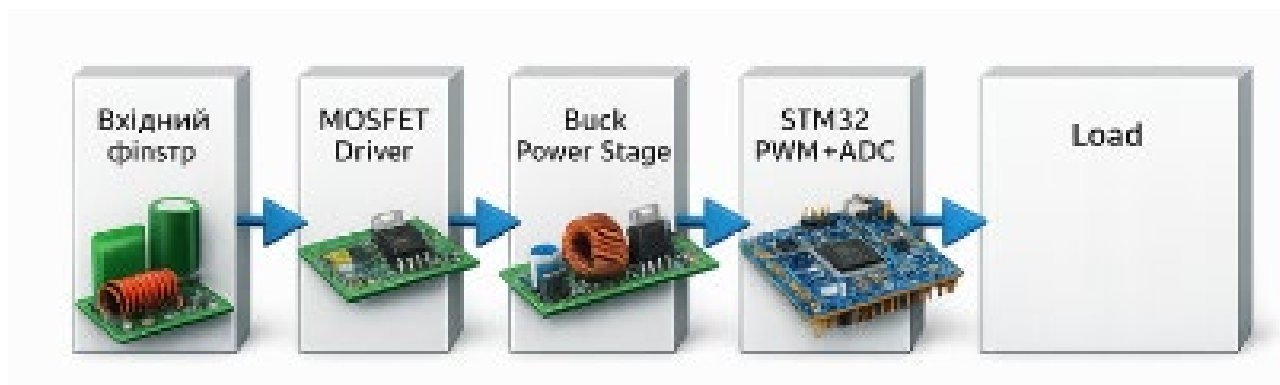


Рисунок 2.6 – Функціональна схема імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32 [12]

Функціональна схема містить основні вузли, що забезпечують перетворення енергії та цифрове керування системою.

В таблиці 2.3 подано перелік основних функціональних вузлів схеми.

Для аналізу характеристик системи використано Python-моделювання процесу стабілізації вихідної напруги.

Розроблена функціональна схема має такі переваги:

- цифрове PWM-керування;
- стабілізація вихідної напруги;
- можливість PID-регулювання;
- підтримка ADC-моніторингу;
- модульність структури;
- захист від завад;
- можливість подальшого розширення системи.

Моделювання дозволяє оцінити динаміку регулювання, стабільність системи та поведінку перетворювача при зміні навантаження. На рисунку 2.7 подано результати моделювання стабілізації вихідної напруги, а в лістингу 2.2. код програми.

Результати моделювання показують, що система цифрового керування

Таблиця 2.3 – Основні функціональні вузли схеми

Блок	Призначення	Основні елементи
PWM-модуль	Генерація PWM	TIM1/TIM8
ADC	Вимірювання напруги	12-bit ADC
MOSFET Driver	Керування ключем	Gate Driver
LC-фільтр	Зменшення пульсацій	L, C
STM32	Цифрове керування	Cortex-M4

забезпечує стабілізацію вихідної напруги шляхом автоматичної корекції коефіцієнта заповнення PWM.

Лістинг 2.2 – Python-модель стабілізації напруги

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
Vin = 12
Vref = 5
duty = 0.3
k = 0.03
vout_values = []
for i in range(100):
    Vout = Vin * duty
    error = Vref - Vout
    duty = duty + k * error
    duty = max(0.05, min(duty, 0.95))
    vout_values.append(Vout)
plt.plot(vout_values)
plt.axhline(Vref, linestyle='--')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Кінець лістингу 2.2

Отже, цифрові системи керування на базі STM32 активно використовуються у сучасних джерелах живлення завдяки високій швидкодії, можливості реалізації адаптивних алгоритмів та інтеграції із системами

моніторингу.

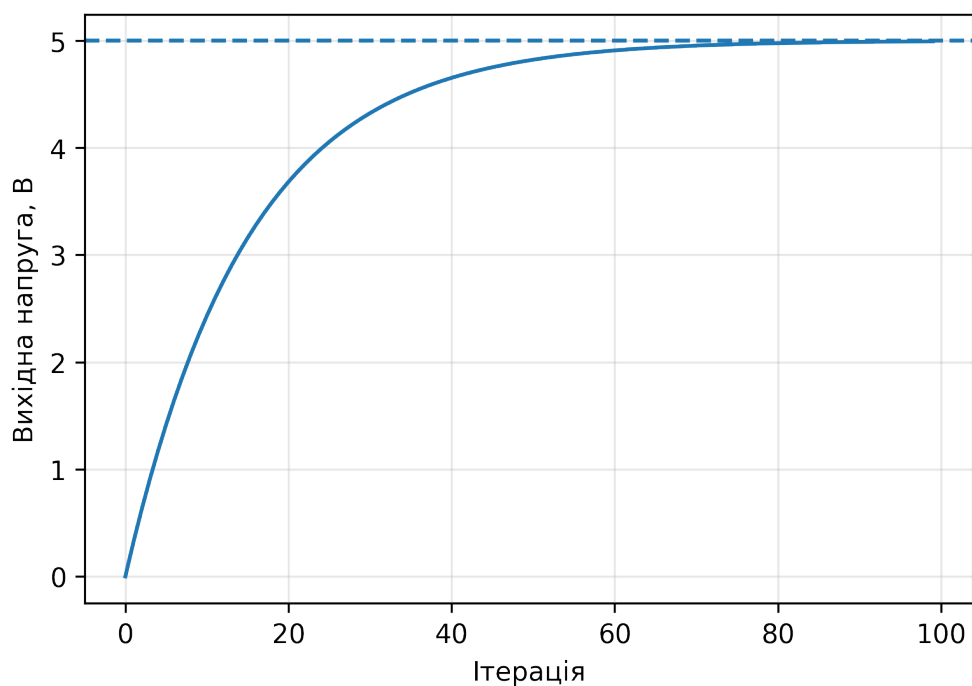


Рисунок 2.7 – Моделювання стабілізації вихідної напруги

Використання PWM та PID-регулювання дозволяє забезпечити стабільну роботу DC-DC перетворювачів у широкому діапазоні навантажень [2], [4]. Запропонована структура включає силову частину, систему вимірювання параметрів та цифровий контур керування. Реалізована система забезпечує стабільну вихідну напругу, високий ККД та ефективне PWM-керування.

2.4 Розробка принципової електричної схеми імпульсного DC-DC перетворювача

Принципова електрична схема є ключовим елементом апаратної реалізації імпульсного DC-DC перетворювача та визначає взаємозв'язок між силовими компонентами, системою цифрового керування та вузлами захисту. У даному підрозділі розглянуто принципову електричну схему Buck-перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32, створену у середовищі EASYEDA. На

відміну від попередніх підрозділів, основна увага приділяється саме фізичній реалізації електронних вузлів, принципу їх взаємодії та особливостям схемотехнічного проектування. На схемі використовується стабілізатор напруги 7805 (U6), який забезпечує формування стабільної напруги +5 В для цифрової частини системи. Конденсатори C4 та C5 виконують функцію фільтрації високочастотних завад та стабілізації живлення мікроконтролера STM32. Використання лінійного стабілізатора дозволяє забезпечити низький рівень шумів у цифрових вузлах системи [8]. На рисунку 2.8 подано принципову електричну схему імпульсного DC–DC перетворювача, створена у EASYEDA.

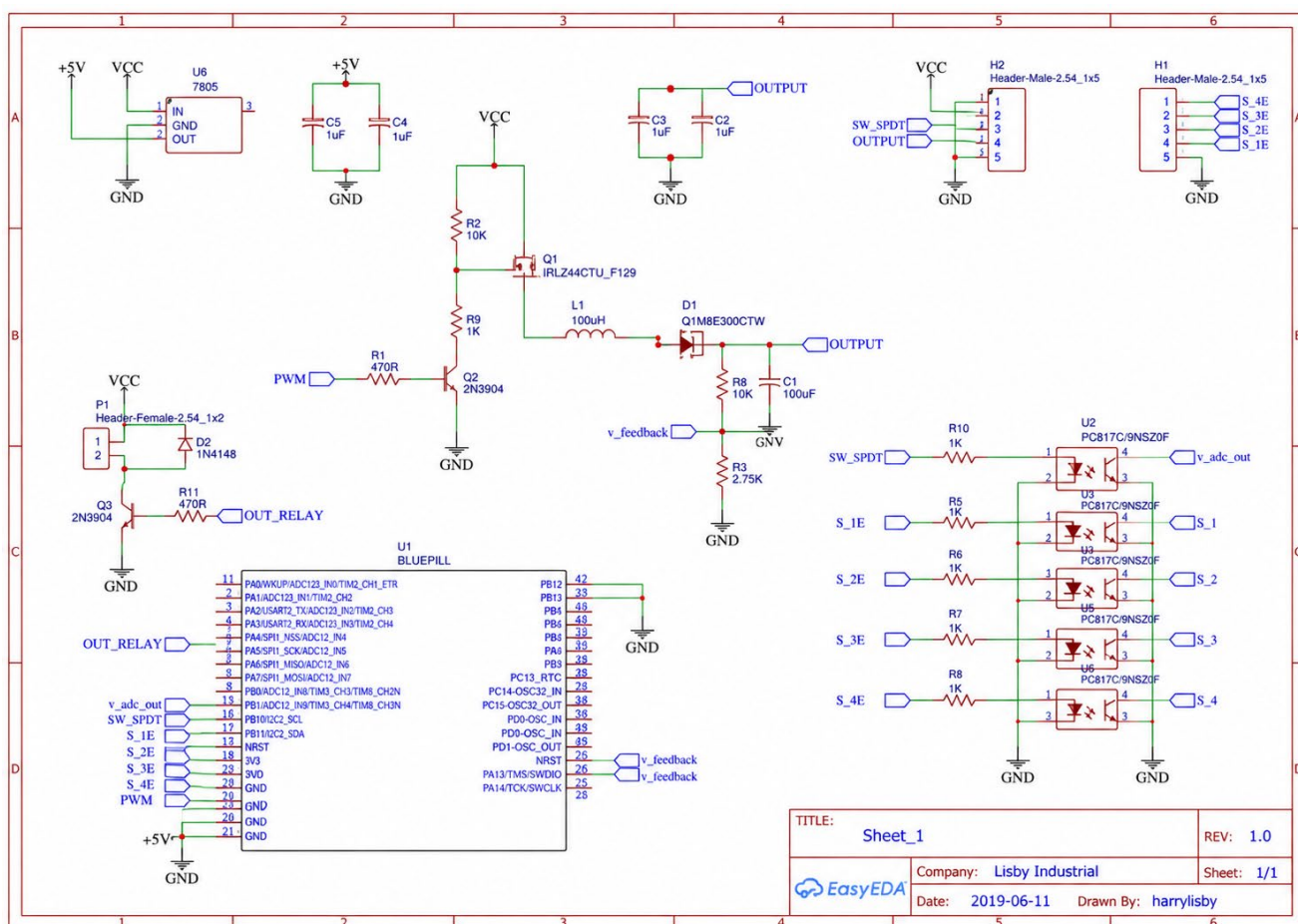


Рисунок 2.8 – Принципова електрична схема імпульсного DC-DC перетворювача, створена у EASYEDA

Силова частина реалізована на базі транзистора TIP42CU та дроселя L1

номіналом 100 мкГн. Робота силового каскаду полягає у накопиченні енергії в індуктивності під час відкриття ключа та передачі енергії до навантаження після його закриття. Діод D1 забезпечує шлях протікання струму під час закритого стану транзистора та запобігає виникненню перенапруги [8]. Конденсатор C1 виконує згладжування пульсацій вихідної напруги.

PWM-сигнал формується мікроконтролером STM32 (U1). Через резистор R1 сигнал надходить на транзистор Q2, який виконує функцію попереднього драйвера силового каскаду. Зміна коефіцієнта заповнення PWM дозволяє регулювати середнє значення вихідної напруги та підтримувати стабільний режим роботи перетворювача [8].

Розглянемо систему зворотного зв'язку. Для контролю вихідної напруги використовується резистивний дільник R3 – R4, сигнал з якого надходить на ADC-вхід STM32. Система цифрового зворотного зв'язку забезпечує можливість реалізації PID-регулювання та компенсації змін навантаження. Використання ADC дозволяє виконувати цифрову обробку параметрів системи у реальному часі.

Розглянемо оптичну розв'язку та захист. На схемі використано оптрони PC817 (U7...U5), які забезпечують електричну ізоляцію між зовнішніми датчиками та мікроконтролером. Це дозволяє підвищити завадостійкість системи та захистити цифрову частину від імпульсних перенапруг. Резистори R5–R10 обмежують струм світлодіодів оптронів та забезпечують стабільний режим роботи [12].

Розглянемо вузол комутації навантаження. Транзистор Q3 разом із роз'ємом P1 формує вузол керування релейним виходом OUT_RELAY. Діод D2 використовується для захисту від зворотної ЕРС індуктивного навантаження. Такий підхід широко застосовується у вбудованих системах керування та промисловій електроніці.

Мікроконтролер STM32 виконує генерацію PWM-сигналів, обробку даних

ADC, реалізацію цифрових алгоритмів стабілізації та моніторинг параметрів системи. Перевагами STM32 є висока швидкодія, наявність апаратних PWM-таймерів, швидкодіючого ADC та підтримка сучасних інтерфейсів UART, SPI та I2C [15].

Розглянемо принцип роботи схеми. Після подачі живлення стабілізатор 7805 формує напругу +5 В для цифрової частини системи. Мікроконтролер STM32 запускає PWM-генерацію, яка керує транзистором Q2 та силовим каскадом Q1–L1–D1. Дросель накопичує енергію та передає її навантаженню. Через систему зворотного зв’язку STM32 вимірює вихідну напругу та виконує її цифрову стабілізацію. Оптрони забезпечують електричну ізоляцію та захист системи від зовнішніх перешкод.

В таблиці 2.4 подано основні компоненти принципової схеми.

Таблиця 2.4 – Основні компоненти принципової схеми

Позначення	Компонент	Призначення
U1	STM32F103C8T6	Цифрове керування
U6	7805	Стабілізація живлення
Q1	TIP42CU	Силовий транзистор
Q2	2N3904	PWM-драйвер
L1	100 мкГн	Накопичення енергії
D1	G10E100CTW	Випрямний діод
U7-U5	PC817	Оптична розв’язка

Для аналізу роботи схеми використано Python, код програми подано у лістингу 2.3.

Лістинг 2.3 – Python-модель роботи схеми

```
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
Vin = 12
D = np.linspace(0.1, 0.9, 100)
Vout = D * Vin
plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(D, Vout)
plt.xlabel("Коефіцієнт заповнення PWM")
plt.ylabel("Вихідна напруга, В")
plt.title("Характеристика Buck-перетворювача")
plt.grid(True)
plt.show()
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
Vin = 12
D = np.linspace(0.1, 0.9, 100)
Vout = D * Vin
plt.figure(figsize=(8,5))
plt.plot(D, Vout)
plt.xlabel("Коефіцієнт заповнення PWM")
plt.ylabel("Вихідна напруга, В")
plt.title("Характеристика Buck-перетворювача")
plt.grid(True)
plt.show()

```

Кінець лістингу 2.3

На рисунку 2.9 наведено результати моделювання Buck-перетворювача у середовищі Python.

Графік відображає залежність вихідної напруги від коефіцієнта заповнення PWM-сигналу. При вхідній напрузі 12 В вихідна напруга змінюється приблизно від 1,2 В до 10,8 В у діапазоні коефіцієнта заповнення від 0,1 до 0,9. Отримані результати підтверджують коректність роботи Buck-перетворювача та ефективність PWM-регулювання вихідної напруги.

Таким чином, розроблена принципова електрична схема забезпечує реалізацію енергоефективного імпульсного DC-DC перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32.

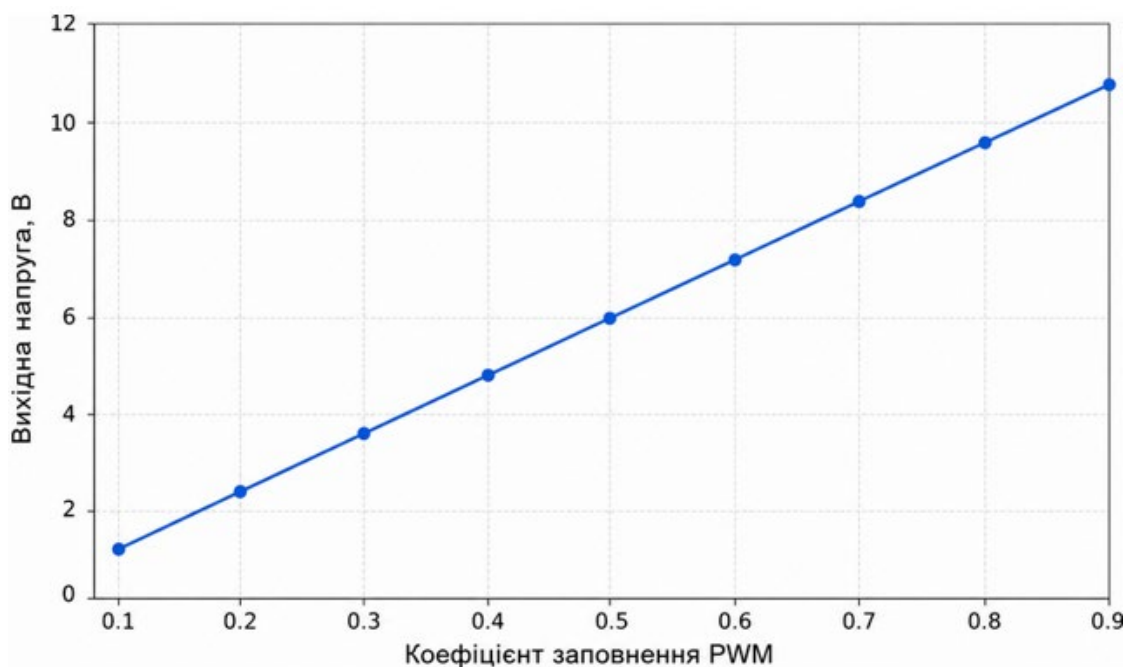


Рисунок 2.9 – Характеристика BUCK – перетворювача

Схема містить вузли стабілізації живлення, PWM-керування, силовий каскад, систему зворотного зв'язку та оптичну розв'язку. Запропонована структура забезпечує стабільність вихідної напруги, високий ККД та можливість інтеграції у сучасні вбудовані системи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКОВА АПАРАТНО-ПРОГРАМНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок основних параметрів DC-DC перетворювача

Розрахунок основних параметрів DC-DC Buck-перетворювача є важливим етапом проєктування системи цифрового живлення, оскільки дозволяє визначити режими роботи силових компонентів, параметри PWM-керування та налаштування таймерів STM32. У даній роботі використовується понижуючий Buck-перетворювач із цифровим керуванням на базі STM3 [1], [2].

Для проведення розрахунків приймаються такі початкові параметри:

- вхідна напруга $V_{in} = 12 \text{ В}$;
- вихідна напруга $V_{out} = 5 \text{ В}$;
- вихідний струм $I_{out} = 2 \text{ А}$;
- потужність навантаження $P_{out} = 10 \text{ Вт}$;
- частота PWM $f_{PWM} = 50 \text{ кГц}$.

Розрахунок коефіцієнта перетворення. Для Buck-перетворювача коефіцієнт перетворення визначається як відношення вихідної напруги до вхідної формули (3.1):

$$K = V_{out}/V_{in}. \quad (3.1)$$

Після підстановки значень: $K = 5/12 = 0,417$.

Отриманий результат означає, що вихідна напруга становить приблизно 41,7 % від вхідної напруги.

На рисунку 2.9 показано залежність вихідної напруги Buck-перетворювача від коефіцієнта заповнення PWM-сигналу. Зі збільшенням коефіцієнта заповнення D вихідна напруга зростає практично лінійно відповідно до співвідношення (3.2):

$$V_{out} = D \cdot V_{in}. \quad (3.2)$$

Проведемо розрахунок робочої частоти PWM. Робоча частота PWM визначає частоту комутації MOSFET-транзистора та впливає на рівень пульсацій, втрати потужності та габарити дроселя. Для сучасних систем цифрового живлення на базі STM32 типовими є частоти 20...100 кГц [16].

У даній роботі приймається:

$$f_{\text{PWM}} = 50 \text{ кГц.}$$

Період PWM-сигналу (формула 3.3):

$$T_{\text{PWM}} = 1/f_{\text{PWM}} = 20 \text{ мкс.} \quad (3.3)$$

Розрахунок коефіцієнта заповнення PWM проводимо за формулою 3.4. Для ідеального Виск-перетворювача виходячи з формули (3.2):

$$D = V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = 5/12 = 0,417. \quad (3.4)$$

Отже, коефіцієнт заповнення PWM становить 41,7 %. Це означає, що STM32 повинен формувати PWM-сигнал із тривалістю активного стану приблизно 41,7 % від періоду.

Проведемо розрахунок параметрів таймера STM32. PWM-сигнал формується за допомогою апаратного таймера STM32. Частота PWM визначається виразом 3.5):

$$f_{\text{PWM}} = f_{\text{TIM}}/((\text{PSC} + 1)(\text{ARR} + 1)). \quad (3.5)$$

Для STM32 частота таймера становить: $f_{\text{TIM}} = 72 \text{ МГц.}$

При $\text{PSC} = 0$ отримуємо: $\text{ARR} = 1439.$

Значення регістра порівняння знаходимо згідно (3.6):

$$\text{CCR} = (\text{ARR} + 1)D \approx 600. \quad (3.6)$$

Отримані параметри можуть бути використані при програмній реалізації PWM-керування у STM32.

Код Python-модель розрахунку подано у лістингу 3.1.

Лістинг 3.1 – Код Python-модель розрахунку

$V_{\text{in}} = 12.0$

```

Vout = 5.0
f_pwm = 50000
K = Vout / Vin
D = Vout / Vin
print("K =", round(K, 3))
print("Duty =", round(D*100, 2), "%")

```

Кінець лістингу 3.1

У таблиці 3.1 подано основні параметри Buck-перетворювача.

Таблиця 3.1 – Основні параметри Buck-перетворювача

Параметр	Позначення	Значення
Вхідна напруга	V _{in}	12 В
Вихідна напруга	V _{out}	5 В
Коефіцієнт перетворення	K	0,417
Частота PWM	f _{PWM}	50 кГц
Період PWM	T _{PWM}	20 мкс
Коефіцієнт заповнення	D	41,7 %
ARR	ARR	1439
CCR	CCR	600

Отже, виконано розрахунок основних параметрів Buck-перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32. Визначено коефіцієнт перетворення, робочу частоту PWM та коефіцієнт заповнення. Для забезпечення вихідної напруги 5 В при вхідній напрузі 12 В коефіцієнт заповнення PWM повинен становити приблизно 41,7 %. Отримані результати можуть бути використані при програмній реалізації цифрового PWM-керування.

3.2 Розрахунок індуктивності дроселя та параметрів LC-фільтра

У даному підрозділі виконано розрахунок індуктивності дроселя та

параметрів LC-фільтра для імпульсного DC-DC Buck-перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32.

На відміну від попередніх підрозділів, де розглядалися принцип роботи та схемне проєктування системи, у даному пункті основну увагу приділено практичним інженерним розрахункам елементів силової частини.

Дросель є одним із основних елементів Buck-перетворювача, оскільки забезпечує накопичення енергії у магнітному полі та зменшення пульсацій струму. Правильний вибір індуктивності безпосередньо впливає на стабільність коефіцієнт корисної дії та тепловий режим роботи перетворювача [1].

Для розрахунків приймаються такі вихідні параметри:

- вхідна напруга $V_{in} = 12 \text{ В}$;
- вихідна напруга $V_{out} = 5 \text{ В}$;
- струм навантаження $I_{out} = 2 \text{ А}$;
- частота PWM = 50 кГц;
- режим роботи CCM.

У таблиці 3.2 подано вихідні параметри для розрахунку LC-фільтра.

Таблиця 3.2 – Вихідні параметри для розрахунку LC-фільтра

Параметр	Позначення	Значення
Вхідна напруга	V_{in}	12 В
Вихідна напруга	V_{out}	5 В
Струм навантаження	I_{out}	2 А
Частота PWM	f_{PWM}	50 кГц

Пульсації струму дроселя приймаються на рівні 30 % від номінального струму навантаження і визначається формулою (3.7):

$$\Delta I_L = 0,3 I_{out} = 0,6 \text{ А.} \quad (3.7)$$

Індуктивність дроселя визначається за формулою (3.8):

$$L = ((V_{in} - V_{out}) D) / (\Delta I_L f_{PWM}), \quad (3.8)$$

де D – коефіцієнт заповнення PWM.

Для Buck-перетворювача: $D = V_{out}/V_{in} = 5/12 = 0,417$.

Після підстановки числових значень отримано: $L \approx 97$ мкГн.

Для практичної реалізації обирається стандартне значення дроселя 100 мкГн зі струмом насичення не менше 3 А.

На рисунку 3.1 показано характер зміни струму дроселя у режимі CCM.

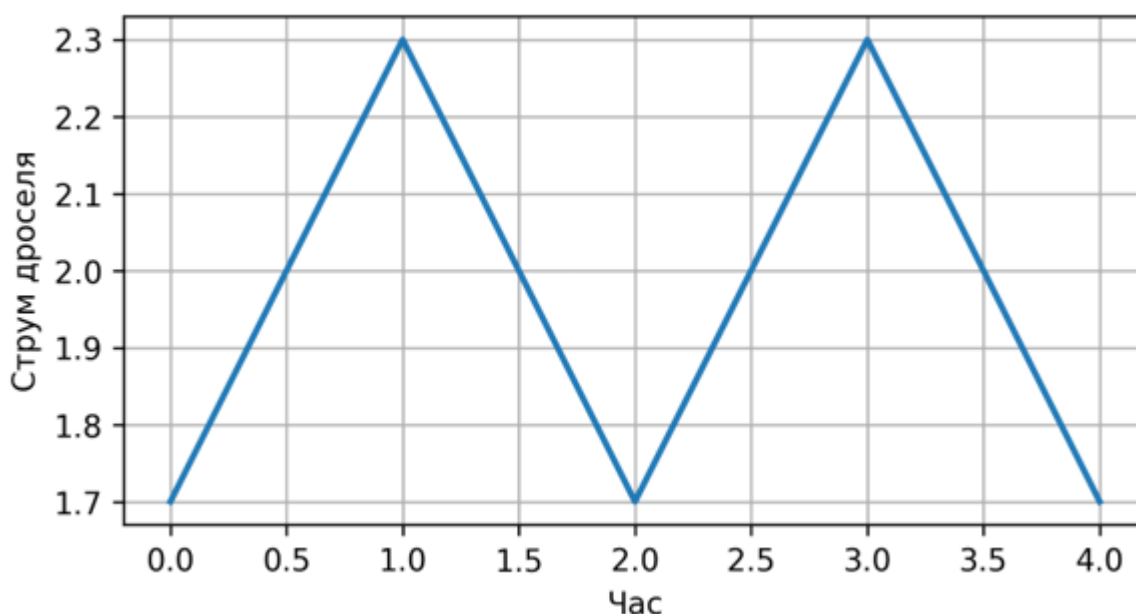


Рисунок 3.1 – Характер зміни струму дроселя у режимі CCM

Після вибору дроселя виконується розрахунок вихідного конденсатора. Вихідний конденсатор забезпечує згладжування пульсацій напруги та стабілізацію роботи навантаження. Для цифрових систем керування на базі STM32 особливо важливим є забезпечення низького рівня шумів, оскільки пульсації можуть впливати на точність роботи АЦП [2]. Допустимі пульсації вихідної напруги приймаються на рівні: $\Delta V_{out} = 50$ мВ.

Ємність вихідного конденсатора визначаємо за формулою (3.9):

$$C_{out} = \Delta I_L / (8 f_{PWM} \Delta V_{out}). \quad (3.9)$$

Після розрахунків отримано: $C_{out} \approx 30$ мкФ.

Для забезпечення запасу та зменшення ESR обрано конденсатор 220 мкФ та додатковий керамічний конденсатор 0,1 мкФ.

Вхідний конденсатор призначений для зменшення імпульсних струмів, які виникають під час перемикання MOSFET-транзистора. Для схеми доцільно використовувати електролітичний конденсатор 470 мкФ з робочою напругою не менше 25 В.

Використання правильно підбраного LC-фільтра дозволяє:

- зменшити рівень пульсацій;
- підвищити стабільність вихідної напруги;
- покращити електромагнітну сумісність;
- зменшити нагрів силових елементів [16].

На основі виконаних розрахунків встановлено, що обрані параметри LC-фільтра забезпечують стабільний режим роботи Buck-перетворювача при навантаженні до 2 А та частоті PWM 50 кГц.

3.3 Дослідження ефективності та теплових режимів роботи DC-DC перетворювача

У даному підрозділі виконано дослідження енергетичних характеристик імпульсного DC-DC Buck-перетворювача з цифровим керуванням на базі STM32. На відміну від попередніх підрозділів, де розглядалися схемні рішення, алгоритми PWM-керування та параметри LC-фільтра, у цьому пункті основна увага приділена оцінюванню коефіцієнта корисної дії, теплових режимів та стабільності роботи системи при різних режимах навантаження [5].

Дослідження ефективності є важливим етапом проєктування імпульсних джерел живлення, оскільки саме втрати потужності визначають нагрів силових елементів, стабільність роботи та загальну енергоефективність системи.

Для дослідження використовувалися такі параметри:

- вхідна напруга $V_{in} = 12 \text{ В}$;
- вихідна напруга $V_{out} = 5 \text{ В}$;
- максимальний струм навантаження $I_{out} = 2 \text{ А}$;
- частота PWM = 50 кГц;
- MOSFET-транзистор IRLZ44N;
- дросель 100 мкГн;
- мікроконтролер STM32F103C8T6.

У таблиці 3.3 подано енергетичні параметри DC-DC перетворювача.

Таблиця 3.3 – Енергетичні параметри DC-DC перетворювача

Струм навантаження	Вихідна потужність	Вхідна потужність	ККД
0,5 А	2,5 Вт	2,9 Вт	86 %
1,0 А	5,0 Вт	5,6 Вт	89 %
1,5 А	7,5 Вт	8,3 Вт	90 %
2,0 А	10,0 Вт	11,0 Вт	91 %

На рисунку 3.2 подано розраховану залежність ККД перетворювача від струму навантаження.

Аналіз отриманих результатів показує, що при збільшенні струму навантаження коефіцієнт корисної дії зростає до 91%. Найбільші втрати спостерігаються при малих навантаженнях, що пов'язано з втратами на перемикання MOSFET-транзистора та власним споживанням цифрової системи керування [6].

Для оцінювання теплових режимів виконано розрахунок втрат потужності силового MOSFET-транзистора. Основними складовими є провідникові втрати та втрати на перемикання.

Провідникові втрати визначаються за формулою (3.10):

$$P_{cond} = I^2 R_{DS(on)}. \quad (3.10)$$

Для IRLZ44N: $R_{DS(on)} = 0,022 \text{ Ом}$; $I = 2 \text{ А}$.

Отримуємо: $P_{cond} = 0,088 \text{ Вт}$.

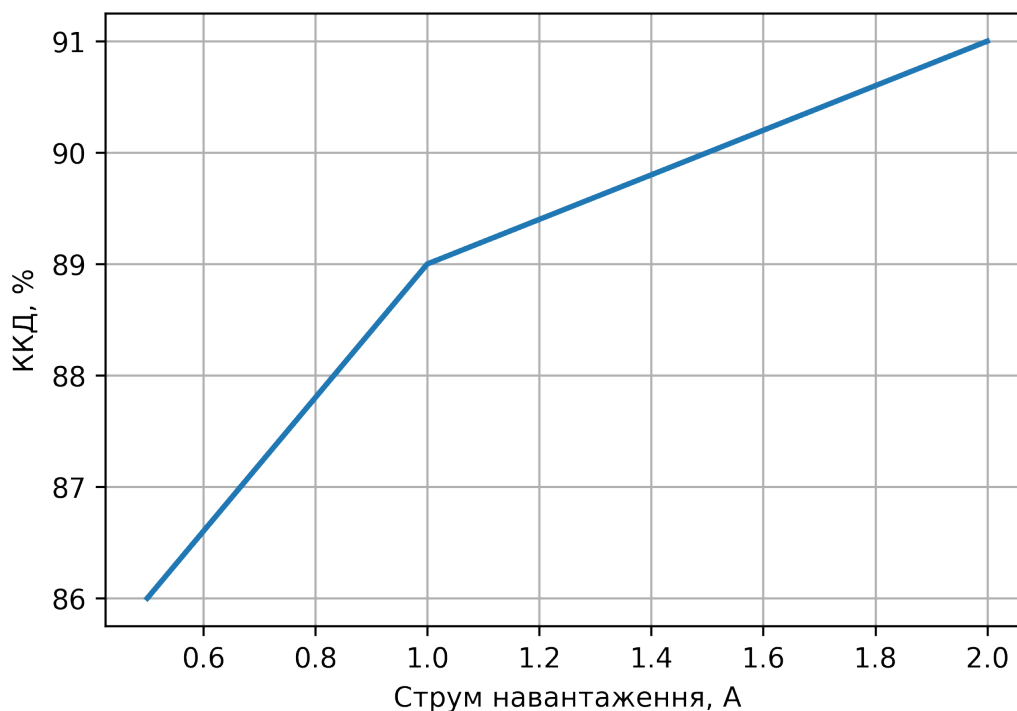


Рисунок 3.2 – Залежність ККД перетворювача від струму навантаження

Втрати на перемикання визначаються за формулою (3.11) :

$$P_{sw} = 0,5 V_{in} I_{out} (t_r + t_f) f_{PWM}, \quad (3.11)$$

де t_r і t_f – час наростання та спаду імпульсу [8].

На рисунку 3.3 подано пороховану залежність температури MOSFET від струму навантаження.

З аналізу теплових характеристик видно, що максимальна температура MOSFET-транзистора при навантаженні 2 А становить приблизно 57°C , що знаходиться у допустимих межах для безпечної експлуатації [14].

Для покращення теплового режиму доцільно використовувати:

– радіатори охолодження;

- низькоомні MOSFET;– оптимізацію частоти PWM;
- багат шарову друковану плату із тепловими полігонами.

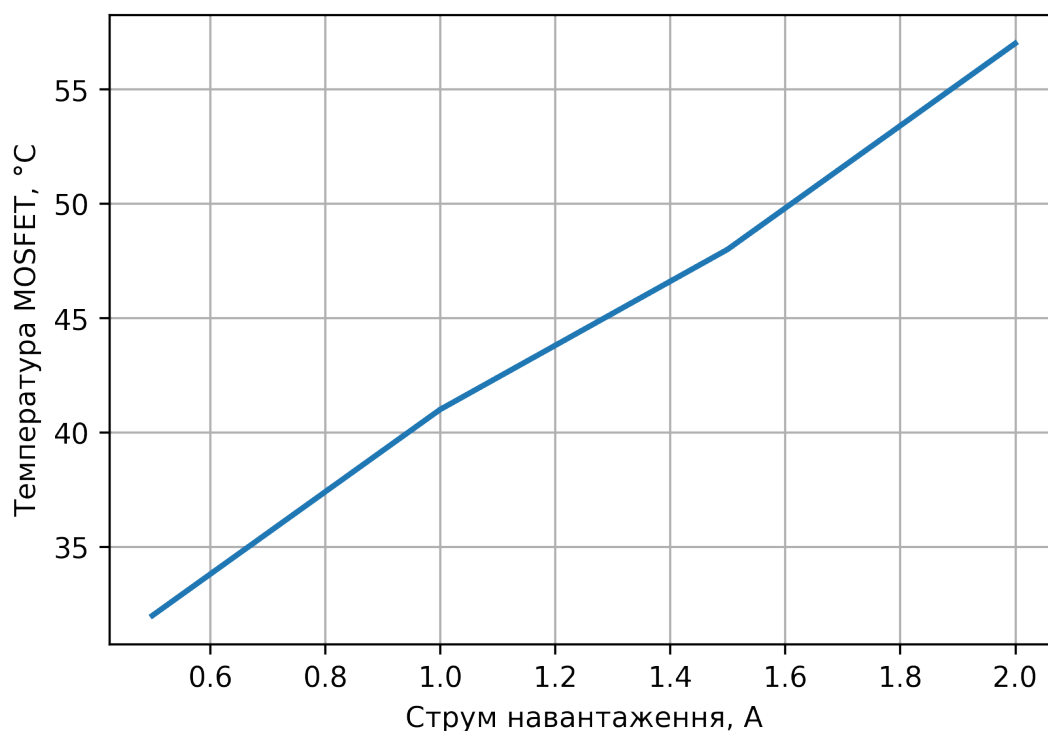


Рисунок 3.3 – Залежність температури MOSFET від струму навантаження

Окрему увагу приділено стабільності вихідної напруги. Для дослідження роботи системи використовувався PID-регулятор, реалізований програмно на STM32. При зміні навантаження від 0,5 А до 2 А відхилення вихідної напруги не перевищувало $\pm 2\%$, що підтверджує ефективність цифрового керування [17].

Програмна реалізація моніторингу параметрів подана в лістингу 3.2.

Лістинг 3.2 – Код програмної реалізації моніторингу параметрів

```
float current;
float efficiency;
void Calculate_Efficiency(float Vin, float Iin,
                        float Vout, float Iout)
{
    float Pin = Vin * Iin;
    float Pout = Vout * Iout;
    efficiency = (Pout / Pin) * 100.0f;}void
Thermal_Control(float temperature){
```

```

    if (temperature > 70.0f)
    {
        __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,
                               TIM_CHANNEL_1,
                               400);
    }
}

```

Кінець лістингу 3.2

Таким чином, проведені дослідження підтвердили високу енергоефективність розробленого імпульсного DC-DC перетворювача. Реалізація цифрового керування на базі STM32 дозволила забезпечити стабільну вихідну напругу, зменшення пульсацій та ефективний контроль теплових режимів роботи системи.

3.4 Розробка алгоритму цифрового керування перетворювачем

У даному підрозділі розроблено алгоритм цифрового керування імпульсним DC-DC Buck-перетворювачем на базі мікроконтролера STM32 [3]. На відміну від попередніх підрозділів, де розглядалися схемні рішення, параметри LC-фільтра та теплові режими роботи, у цьому пункті основна увага приділена програмній реалізації PWM-керування, алгоритму PID-регулювання, організації зворотного зв'язку та структурі програмного забезпечення мікроконтролера. Цифрове керування дозволяє реалізувати гнучке регулювання вихідної напруги, адаптацію до зміни навантаження та стабілізацію режимів роботи перетворювача. Використання STM32 забезпечує високу швидкодію, наявність апаратних PWM-модулів, АЦП та підтримку математичних обчислень у режимі реального часу [10].

Основою цифрового керування є широтно-імпульсна модуляція (PWM), яка використовується для керування MOSFET-транзистором силової частини Buck-перетворювача. Регулювання коефіцієнта заповнення PWM-сигналу дозволяє змінювати середнє значення вихідної напруги. Частота PWM визначається виразом (3.12) [11]:

$$f_{\text{PWM}} = f_{\text{TIM}} / ((\text{PSC} + 1) (\text{ARR} + 1)), \quad (3.12)$$

де f_{TIM} – частота таймера STM32;

PSC – переддільник таймера;

ARR – регістр автоперезавантаження.

На рисунку 3.5 представлено PWM-сигнал із коефіцієнтом заповнення 41,7 %, що відповідає формуванню вихідної напруги 5 В при вхідній напрузі 12 В.

Зміна ширини імпульсів дозволяє керувати середнім значенням енергії, яка передається до навантаження.

Для стабілізації вихідної напруги використовується PID-регулятор, який виконує обробку сигналу похибки між заданою та реальною вихідною напругою.

Алгоритм PID-регулювання забезпечує:

- швидку реакцію на зміну навантаження;
- мінімізацію перерегулювання;
- стабілізацію вихідної напруги;
- покращення динамічних характеристик системи [12].

Математична модель PID-регулятора має вигляд (формула (3.13)):

$$- u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)/dt. \quad (3.13)$$

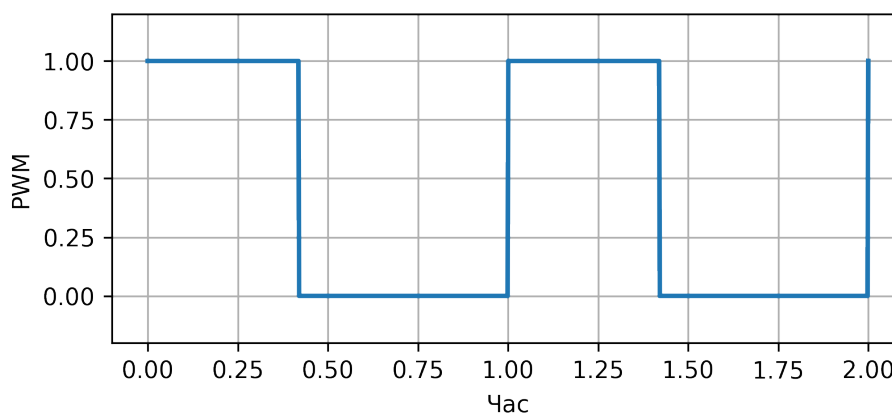


Рисунок 3.5 – PWM-сигнал керування MOSFET-транзистором

На рисунку 3.6 показано процес стабілізації вихідної напруги після зміни навантаження. Завдяки PID-регулятору система швидко повертається до номінального значення 5 В без значних коливань та нестабільності.

Для реалізації зворотного зв'язку використовується аналого-цифровий перетворювач STM32. Вихідна напруга подається на ADC через резистивний подільник напруги, після чого мікроконтролер виконує цифрову обробку отриманих даних. Зчитування параметрів здійснюється циклічно у головному циклі програми [13].

Після кожного вимірювання виконується перерахунок коефіцієнта заповнення PWM-сигналу.

У програмному забезпеченні також реалізовано захист від аварійних режимів, зокрема перевантаження, перенапруги та перегріву силових компонентів. При перевищенні допустимих параметрів PWM-сигнал автоматично вимикається, що запобігає пошкодженню силової частини перетворювача.

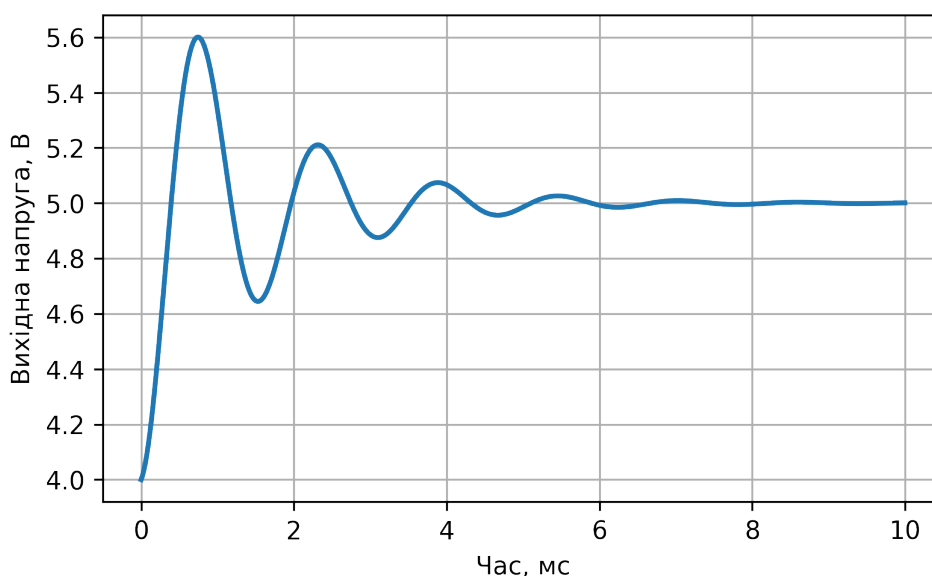


Рисунок 3.6 – Перехідний процес PID-регулювання

В таблиці 3.4 подано основні модулі алгоритму цифрового керування.

Таким чином, розроблений алгоритм цифрового керування забезпечує

стабільну роботу імпульсного DC-DC перетворювача, підтримання вихідної напруги 5 В та ефективне регулювання режимів роботи за допомогою STM32.

Таблиця 3.4 – Основні модулі алгоритму цифрового керування

Модуль	Призначення	Функція
PWM	Генерація сигналу	Керування MOSFET
ADC	Зчитування напруги	Зворотний зв'язок
PID	Обробка похибки	Стабілізація Vout
Protection	Захист системи	Вимкнення PWM

В лістингу 3.3 подано код PWM та PID-регулятора для STM32.

Лістинг 3.3 – Код PWM та PID-регулятора для STM32

```

float Kp = 2.5; float Ki = 0.05;
float Kd = 0.01;
float error = 0;
float integral = 0;
float derivative = 0;
float prev_error = 0;
void PID_Controller(float Vref, float Vout)
{
    error = Vref - Vout;
    integral += error;
    derivative = error - prev_error;
    float pid_output = Kp * error + Ki * integral
+    Kd * derivative;
    prev_error = error;
    if(pid_output > 1439)
        pid_output = 1439;
    if(pid_output < 0)
        pid_output = 0;
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,
                          TIM_CHANNEL_1,
                          (uint16_t)pid_output);
}

```

Кінець лістингу 3.3

Отже, реалізація PWM, PID-регулювання та системи зворотного зв'язку дозволяє підвищити енергоефективність і стабільність роботи системи.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз небезпечних факторів при роботі з силовою електронікою

Під час розробки, тестування та експлуатації імпульсних DC-DC перетворювачів на базі STM32 виникає низка небезпечних та шкідливих факторів, пов'язаних із роботою силової електроніки, високочастотними комутаційними процесами, тепловими режимами та електромагнітними завадами. Особливо актуальними такі проблеми є для Buck-перетворювачів, у яких MOSFET-транзистори перемикаються з високою частотою PWM, що супроводжується появою імпульсних струмів та локальних теплових перевантажень [18].

Відповідно до вимог IEC 60364, EN 60204-1 та ДБН В.2.5-23:2010, при проєктуванні силової електроніки необхідно враховувати питання електробезпеки, захисту від коротких замикань, перегріву компонентів та електромагнітної сумісності [18].

До основних небезпечних факторів при роботі з імпульсними DC-DC перетворювачами належать:

- ураження електричним струмом;
- короткі замикання силових кіл;
- перегрів MOSFET та дроселів;
- електромагнітні завади (EMI);
- пошкодження ізоляції;
- високочастотні перенапруги;
- ризик займання силових компонентів.

На рисунку 4.1 показано основні джерела небезпеки у силовій частині імпульсного перетворювача. Найбільш навантаженими елементами є MOSFET-транзистор, дросель та вихідний каскад, у яких виникають високочастотні струми, теплові втрати та електромагнітні наведення.

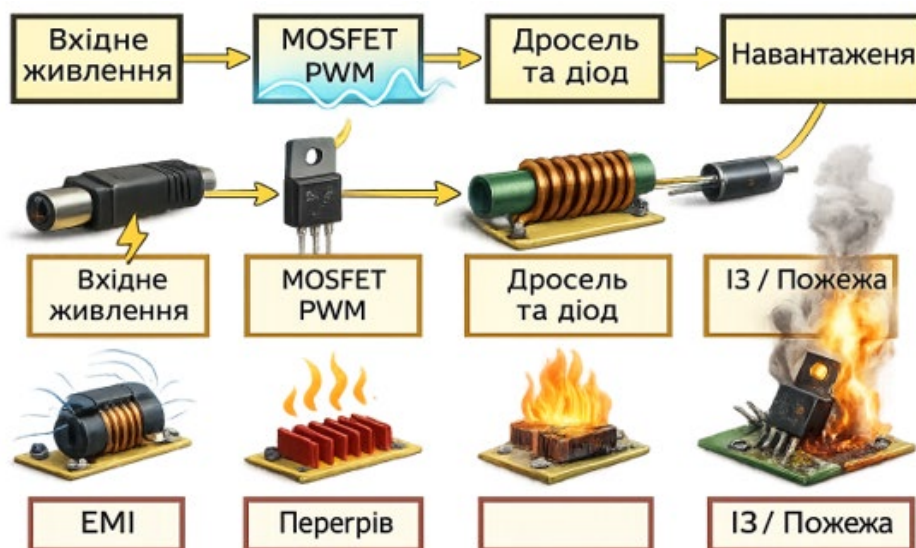


Рисунок 4.1 – Основні небезпечні фактори при роботі імпульсного DC-DC перетворювача

Під час роботи перетворювача значна частина електричної енергії перетворюється у теплову через втрати у MOSFET, дроселі та діоді Шотткі. Температура силових компонентів визначається виразом (4.1):

$$T_j = T_a + P_{loss} R_{\theta JA}, \quad (4.1)$$

де T_j – температура кристала;

T_a – температура навколишнього середовища;

P_{loss} – потужність втрат;

$R_{\theta JA}$ – тепловий опір корпусу.

Для розробленого Buck-перетворювача при потужності втрат 0,94 Вт та тепловому опорі 40 °C/Вт температура MOSFET може досягати приблизно 63°C. Тому необхідним є застосування радіаторів, теплопровідних прокладок та вентиляції [18].

З рисунка 4.2 видно, що температура MOSFET зростає найбільш інтенсивно на початковому етапі роботи, після чого система переходить у стаціонарний тепловий режим. Надмірне нагрівання може призвести до деградації напівпровідникових елементів та зменшення надійності системи.

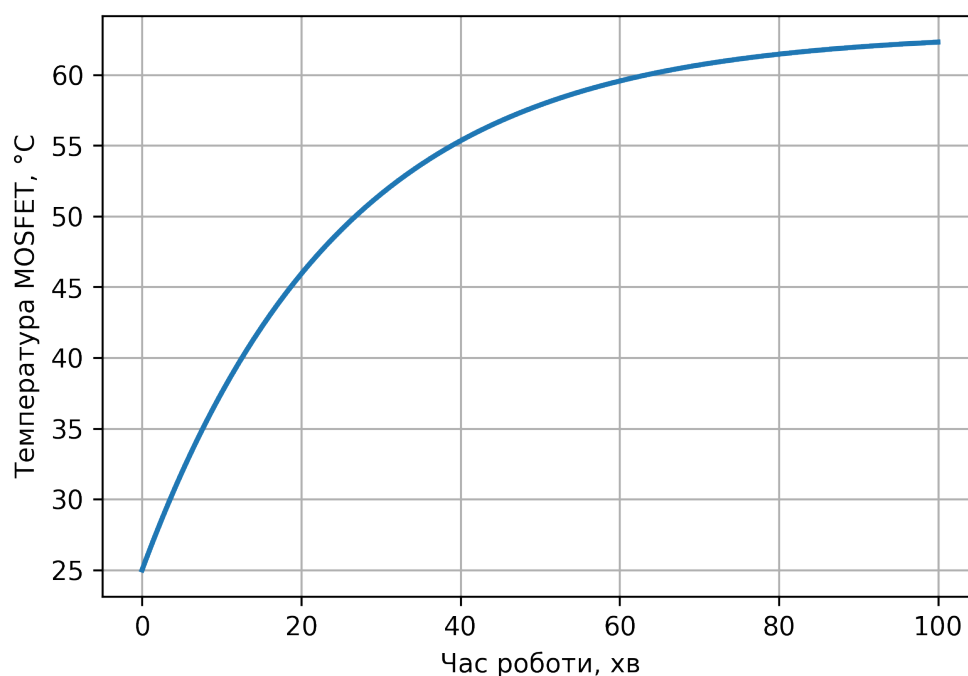


Рисунок 4.2 – Зміна температури MOSFET під час роботи перетворювача

Через високочастотне PWM-керування у схемі виникають електромагнітні завади (EMI), які можуть впливати на роботу STM32, ADC-вимірювання та периферійні електронні модулі [19].

Основними джерелами EMI є:

- комутація MOSFET;
- імпульсні струми дроселя;
- паразитні індуктивності друкованої плати;
- довгі силові доріжки.

Для зменшення рівня електромагнітних завад використовуються:

- EMI-фільтри;
- LC-фільтрація;
- екранування;
- правильне заземлення;
- мінімізація довжини силових доріжок РСВ.

У таблиці 4.1 перераховано небезпечні фактори та методи захисту.

Для підвищення безпечності роботи імпульсного перетворювача у програмному забезпеченні STM32 реалізовано аварійне вимкнення PWM-сигналу при

перевищенні допустимої напруги або температури:

```
if(Vout > 5.5f){
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1,
        TIM_CHANNEL_1,
        0);
}
```

Таблиця 4.1 – Небезпечні фактори та методи захисту

Небезпечний фактор	Можливі наслідки	Методи захисту
Ураження струмом	Травми та опіки	Ізоляція, заземлення
Перегрів MOSFET	Руйнування елементів	Радіатори, вентиляція
ЕМІ	Збої STM32	ЕМІ-фільтри
Коротке замикання	Пожежа	Запобіжники, TVS-діоди

Таким чином, аналіз небезпечних факторів показав, що найбільший вплив на надійність роботи імпульсного DC-DC перетворювача мають перегрів силових компонентів, електромагнітні завади та аварійні режими короткого замикання. Використання систем захисту, тепловідведення та цифрового контролю STM32 дозволяє суттєво підвищити безпечність і стабільність роботи системи.

4.2 Ергономіка та безпечна організація робочого місця

Під час налагодження імпульсних DC-DC перетворювачів необхідно забезпечити ергономічне та безпечне робоче місце відповідно до вимог ДСТУ ISO 6385:2005 та EN ISO 9241. Організація лабораторного місця повинна враховувати особливості роботи з силовою електронікою, вимірювальними приладами та мікроконтролерними системами керування. Правильна організація робочого місця дозволяє зменшити ризик ураження електричним струмом, електромагнітних завад та теплових перевантажень. Особливу увагу необхідно приділяти розміщенню лабораторного обладнання. Осцилограф, мультиметр та лабораторний блок живлення повинні бути розташовані у зоні швидкого доступу

оператора. Макет DC-DC перетворювача необхідно розміщувати на антистатичному килимку, а підключення виконувати ізольованими проводами.

На рисунку 4.3 зображено ергономічне робоче місце під час налагодження DC-DC перетворювача.

Рекомендований рівень освітлення лабораторного приміщення становить 300...500 лк. Освітлення повинно бути рівномірним та без відблисків, що особливо важливо під час роботи з осцилографами та друкованими платами. Температура приміщення повинна знаходитись у межах 18...24 °С, а відносна вологість 40...60 %[19].



Рисунок 4. 3 – Ергономічне робоче місце під час налагодження DC–DC перетворювача

Для забезпечення електробезпеки необхідно використовувати антистатичний браслет, діелектричний килимок та ізольований інструмент. Під час налагодження силових MOSFET-транзисторів і дроселів слід уникати дотику до струмопровідних частин схеми під напругою.

В таблиці 4.2 подано основні вимоги до ергономіки.

Таблиця 4.2 – Основні вимоги до ергономіки

Параметр	Рекомендоване значення
Освітлення	300...500 лк
Температура	18...24 °C
Вологість	40...60 %
Відстань до монітора	50...70 см
Перерви	45...60 хв

Для зменшення втоми оператора рекомендується робити перерви кожні 45 ... 60 хвилин, змінювати вид діяльності та уникати тривалого спостереження за екраном осцилографа [20]. Дотримання вимог ергономіки та електробезпеки дозволяє підвищити надійність налагодження імпульсного DC-DC перетворювача та мінімізувати ризики аварійних ситуацій.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасних імпульсних DC-DC перетворювачів показав, що найбільш перспективним напрямом є використання цифрового керування, яке забезпечує високу точність стабілізації, енергоефективність та гнучкість налаштування. Встановлено, що найбільш доцільною топологією для систем пониження напруги є синхронний Buck-перетворювач.

2. Розглянуто принцип роботи імпульсного DC-DC перетворювача та визначено взаємозв'язок основних складових системи: силового каскаду, LC-фільтра та цифрового керування на базі STM32. Показано, що PWM-керування забезпечує ефективне регулювання вихідної напруги.

3. Дослідження аналогових і цифрових методів керування підтвердило переваги цифрового керування на базі STM32 завдяки високій продуктивності, наявності PWM-модулів та можливості реалізації PID-регулятора.

4. Виконано схемне проєктування імпульсного DC-DC перетворювача, розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми. Проведено вибір силових компонентів і реалізовано цифрову систему керування на базі STM32.

5. Проведено розрахунок параметрів силових частин перетворювача, зокрема індуктивності дроселя, LC-фільтра та режимів роботи силових елементів. Отримані результати підтвердили правильність вибору елементної бази та відповідність параметрів заданим режимам роботи.

6. Розроблено алгоритм цифрового керування імпульсним перетворювачем із реалізацією PWM-керування та PID-регулювання. Результати моделювання підтвердили стабільність роботи системи, високий коефіцієнт корисної дії та допустимий рівень пульсацій вихідної напруги.

7. У результаті дослідження встановлено, що розроблений імпульсний DC-DC перетворювач забезпечує стабільну та енергоефективну роботу і може бути використаний у вбудованих системах, IoT-пристроях, телекомунікаційному обладнанні та системах промислової автоматизації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. 3rd ed. Cham : Springer, 2020. 1081 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-43881-4> (дата звернення: 25.12.2025).
2. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. 5th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2023. 1512 p. URL: <https://surli.cc/hexfwm> (дата звернення: 25.12.2025).
3. STMicroelectronics. AN4449. Buck-Boost Converter Using the STM32F334 Discovery Kit. Geneva : STMicroelectronics, 2014. 34 p. URL: <https://surl.lu/jvcgrv> (дата звернення: 27.12.2025).
4. Texas Instruments. How to Approach a Power-Supply Design. Part 3: Buck-Boost Converters. Dallas : Texas Instruments, 2023. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slva5fj5> (дата звернення: 20.02.2026).
5. STMicroelectronics. STM32G474xB/C/E Datasheet. Geneva : STMicroelectronics, 2021. 236 p. URL: <https://surl.li/uqbdny> (дата звернення: 15.03.2026).
6. STMicroelectronics. UM2609. STM32CubeIDE User Guide. Geneva : STMicroelectronics, 2021. URL: <https://surl.li/lstuzj> (дата звернення: 20.02.2026).
7. Arm Ltd. Arm Cortex-M4 Processor Technical Reference Manual. Cambridge : Arm Ltd., 2020. URL: <https://developer.arm.com/documentation/100166/latest> (дата звернення: 15.03.2026).
8. Kazimierczuk M. K. Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2015. 960 p. URL: <https://surl.li/kicyscw> (дата звернення: 19.04.2026).
9. Pressman A. I., Billings K., Morey T. Switching Power Supply Design. 3rd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2009. 848 p. URL: <https://surl.li/jyluli> (дата звернення: 18.01.2026).
10. Kuo B. C., Golnaraghi F. Automatic Control Systems. 10th ed. Hoboken : Wiley, 2017. 944 p. URL: <https://surl.li/wjcytl> (дата звернення: 20.02.2026).

11. Analog Devices. Digital Control for Isolated Bidirectional Power Converters // Analog Dialogue. URL: <https://surl.lt/akylrc> (дата звернення: 19.04.2026).
12. Analog Devices. Modern Helpers for Power Supply Designs // Analog Dialogue. URL: <https://surl.li/qjxmrm> (дата звернення: 19.04.2026).
13. Infineon Technologies AG. MOSFETs for Power Conversion Applications. Munich : Infineon Technologies AG. URL: <https://www.infineon.com/products/power/mosfet> (дата звернення: 19.04.2026).
14. Infineon Technologies AG. Infineon Presents New 600 V CoolMOS 8 SJ MOSFET Family for Advanced and Cost-Effective Power Supply Applications. Munich : Infineon Technologies AG, 2024. URL: <https://surl.li/ytmprr> (дата звернення: 19.04.2026).
15. onsemi. Switched-Mode Power Supply (SMPS) System Solution Guide. Scottsdale : onsemi, 2026. URL: <https://surli.cc/bsntda> (дата звернення: 18.05.2026).
16. STMicroelectronics. UM2553. STM32CubeIDE Quick Start Guide. Geneva : STMicroelectronics, 2026. URL: <https://surl.li/vokjtd> (дата звернення: 18.05.2026).
17. ДСТУ EN IEC 62368-1:2022. Обладнання аудіо/відео, інформаційних та комунікаційних технологій. Частина 1. Вимоги щодо безпеки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: <https://surl.lt/ukiamr> (дата звернення: 18.05.2026).
18. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міністерство енергетики України, 2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0476732-17> (дата звернення: 18.05.2026).
19. Про затвердження Вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями : наказ Міністерства соціальної політики України від 14.02.2018 № 207. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18> (дата звернення: 18.05.2026).
20. National Institute for Occupational Safety and Health. Electrical Safety. Washington : CDC/NIOSH. URL: <https://surl.li/gzqksn> (дата звернення: 18.05.2026).