

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка»

на тему:

Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу-виводу для автоматизації

технологічних процесів вибухонебезпечних зон

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕП-41мп

Дрозд Дмитрій Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник ст.викл., к.т.н. Желінський Микола Миколайович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Консультант інженер-розробник Пушніцин Дмитро Сергійович

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Рецензент асист., Ігнатюк Євген Станіславович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2025 р.

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	141.0003.003.МД	Пояснювальна записка	134	
3	A1	141.0003.003.МД	Загальна функціональна схема	1	
4	A1	141.0003.003.МД	Схеми електричні принципів	1	
5	A1	141.0003.003.МД	Ілюстративний матеріал тривимірного вигляду пристрою	1	
6	A1	141.0003.003.МД	Результати досліджень	1	
7	A1	141.0003.003.МД	Вигляд розробленого веб-інтерфейсу	1	

				141.0003.003.МД		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Дрозд Д.О.			Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу-виводу для автоматизації технологічних процесів вибухонебезпечних зон	Лист	Листів
Керівн.	Желінський М.М.				2	134
Консульт.	Пушніцин Д.С.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП-41мп	
Н/контр.						
Зав.каф.	Ковбаса С.М.					

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: «Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу-виводу для
автоматизації технологічних процесів вибухонебезпечних зон»

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дрозду Дмитрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу-виводу для автоматизації технологічних процесів вибухонебезпечних зон»,
науковий керівник дисертації к.т.н. Желінський Микола Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт розробки апаратна частина підсистеми віддаленого вводу-виводу, що має відповідати технічним вимогам.

4. Вихідні дані: система має напругу живлення 24 В постійного струму. Допустимий діапазон (статичний) 20.4-28.8 В постійного струму. Допустимий діапазон (динамічний/короткочасний) 18.5-30.2 В постійного струму. Захист від зворотної полярності та від короткого замикання на вході. Максимальний пусковий струм 5 А. Пристрій з підтримкою IoT (потребує контролера/ЦП). Загальна кількість конфігурованих ІО: 6 загального призначення, що конфігуруються програмно: цифрові входи/виходи, аналогові входи; два

вибухозахищені конфігуровані ІО: цифрові входи/виходи. Метод підключення: порти живлення - зелені клеми; багатоцільові конфігуровані входи/виходи - зелені клеми; вибухозахищені порти - сині клеми. Механізм для зменшення електростатичного розряду, подавлення імпульсних стрибків напруги на будь-якому терміналі. Метод підключення конфігурованих входів/виходів для вибухонебезпечного середовища блакитні клеми, ізольовані, відповідають ІЕС 61131-2 тип 1 та 3, встановлення в зоні 2/22. Напруга частини що відповідає за роботу вибухонебезпечному середовищі 15 В. Паралельне включення двох та більше виходів для збільшення потужності заборонено. Індикація LED відповідно до NAMUR NE 107. Режим захисту IP20, монтаж на DIN-рейку TH 35.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Провести аналіз науково-технічних джерел та нормативної бази щодо апаратних рішень автоматизації вибухонебезпечних зон; 2. Розробка структурної/функціональної схеми та визначення і розрахунок архітектури апаратної частини; 3. Проєктування апаратної частини: вибір елементної бази, розроблення електричних принципових схем; 4. Випробування та оцінка технічних характеристик розробленої системи. 5. Збірка та тестування зразка, аналіз результатів. 6. Підготовка конструкторської документації та звіту.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Загальна функціональна схема, формат A1; схеми електричні принципові, формат A1; ілюстративний матеріал тривимірного вигляду пристрою, формат A1; результати досліджень, формат A1; вигляд розробленого веб-інтерфейсу, формат A1;

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Пушніцин Д. С., інженер-розробник		

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

7. Дата видачі завдання 01.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналітичний огляд науково-технічних джерел та нормативної бази щодо апаратних рішень автоматизації електромеханічних систем у вибухонебезпечних зонах	21.09.2025	
2	Розроблення структурної/функціональної схеми, визначення архітектури апаратної частини, проведення необхідних розрахунків	05.10.2025	
3	Проектування апаратної частини: вибір елементної бази, розроблення електричних принципових схем	26.10.2025	
4	Моделювання апаратних рішень та оцінювання їхніх характеристик відносно вимог технічного завдання	9.11.2025	
5	Збірка прототипу та проведення експериментальних випробувань апаратної частини, аналіз отриманих результатів	30.11.2025	
6	Розробка та налагодження web-інтерфейсу керування і конфігурації підсистеми	05.12.2025	
7	Підготовка конструкторської документації, оформлення пояснювальної записки, підготовка презентації та подання роботи	14.12.2025	
	Підготовка презентації і доповіді для захисту		

Студент

(підпис)

Димитрій ДРОЗД

Керівник проєкту

(підпис)

Микола ЖЕЛІНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 134 сторінках, містить 7 розділів, 53 рисунків, 17 таблиць, 7 додатки, аркуші графічної частини, 57 джерел.

У результаті виконання магістерської дисертації проведено аналіз і узагальнення науково-технічних джерел та нормативної документації з питань автоматизації технологічних процесів у вибухонебезпечних зонах. Досліджено принципи побудови розподілених систем автоматизації та підсистем віддаленого вводу-виводу, сформовано технічні вимоги до їх апаратної частини з урахуванням вимог вибухозахисту, електромагнітної сумісності та надійності. Розроблено структурну, функціональну та електричну принципову схеми апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу, включаючи систему живлення, гальванічну ізоляцію та вибухозахищені Ех-канали. Виконано комп'ютерне моделювання та експериментальні дослідження основних електричних і функціональних характеристик розробленого прототипу, що підтвердили його працездатність і відповідність вимогам нормативних документів. Показано можливість інтеграції запропонованого рішення в ІоТ-орієнтовані системи автоматизації.

ПІДСИСТЕМА ВІДДАЛЕНОГО ВВОДУ-ВИВОДУ,
АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ,
ПРОЄКТУВАННЯ, ВИБУХОЗАХИСТ, ЗВОРОТНОХОДОВИЙ
ІМПУЛЬСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

					141.0003.015.МД			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу виводу для автоматизації технологічних процесів вибухонебезпечних зон	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Дрозд Д. О.					7	134
Перевір.		Желінський М. М.				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФЕА, каф. АЕМС-ЕП, гр. ЕП-41мп		
Н. Контр.								
Затверд.		Ковбаса С.М.						

SUMMARY

The master's thesis is 134 pages long, consists of 7 chapters, 53 figures, 17 tables, 7 appendices, 3 sheets of graphic materials, and 57 references.

As a result of the master's thesis work, an analysis and synthesis of scientific-technical sources and regulatory documentation on the automation of technological processes in hazardous (explosive) areas was conducted. The principles of constructing distributed automation systems and remote I/O subsystems were investigated, and technical requirements for their hardware were formulated, taking into account the demands of explosion protection, electromagnetic compatibility, and reliability. The structural, functional, and electrical schematic diagrams of the remote I/O subsystem hardware were developed, including the power supply system, galvanic isolation, and explosion-protected Ex-channels. Computer modeling and experimental studies of the main electrical and functional characteristics of the developed prototype were performed, confirming its operational capability and compliance with regulatory requirements. The feasibility of integrating the proposed solution into IIoT-oriented automation systems is demonstrated.

REMOTE I/O SUBSYSTEM, AUTOMATION, HAZARDOUS AREA,
DESIGN, EXPLOSION PROTECTION, FLYBACK CONVERTER

					<i>141.0003.015.MД</i>			
	<i>Letter</i>	<i>Nº of doc</i>	<i>Sing.</i>	<i>Date</i>	<i>The hardware component of the remote input/output subsystem for automating technological processes in explosion-hazardous areas</i>	<i>L</i>	<i>Page</i>	<i>Pages</i>
<i>Devel.</i>	<i>D. Drozd</i>							
<i>Checked</i>	<i>M. Zhelinskyi</i>						<i>8</i>	<i>134</i>
<i>N. Contr.</i>						<i>NTUU "KPI them Igor Sikorsky", FEA, dep. ESA-ED, EP-41mp</i>		
<i>Approvad.</i>	<i>S. Kovbasa</i>							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ЩОДО АПАРАТНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН.....	16
1.1 Технологія ПоТ.....	16
1.2 Модулі вводу/виводу та їх використання в промисловій автоматизації .	19
1.3 Класифікація вибухонебезпечних зон.....	22
1.4 Стандарти підсистем у вибухонебезпечній зоні.....	26
1.5 Формування вимог до апаратної частини підсистеми	26
1.6 Вимоги до конфігурованих каналів для вибухонебезпечного середовища (Ех-зони).....	28
Висновки до розділу 1	28
2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ.....	29
2.1 Розробка та опис функціональної схеми.....	29
2.2 Розрахунок буферної ємності живлення	34
2.3 Розрахунок живлення 3.3 В.....	38
2.4 Зворотноходовий DC/DC перетворювач (Flyback)	44
2.5 Розрахунок параметрів схеми зворотноходового DC/DC перетворювача	47
2.6 Зворотний зв'язок і компенсація схеми зворотноходового DC/DC перетворювача	61
2.7 Розрахунок захисту вибухонебезпечної частини	68
3 ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА КОНСТРУКТИВУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ	73
3.1 Схема підключення мікроконтролера та мікросхем логіки.....	73

	10
3.2 Вибір корпусу та визначення габаритів плати	80
3.3 Проектування друкованої плати	82
3.4 Огляд 3D-моделі друкованої плати та корпусу	84
4 МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ	88
4.1 Моделювання зворотноходового DC/DC перетворювача	88
4.3 Дослідження режимів роботи зворотноходового перетворювача	90
Висновки розділу 4	93
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	94
5.1 Тестування ланцюгів живлення	94
5.2 Тестування зворотноходового перетворювача (Flyback)	95
5.3 Аналіз статичної характеристики	98
Висновки розділу 5	101
6 РОЗРОБКА WEB-ІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ	102
6.1 Вимоги до web-інтерфейсу підсистеми віддаленого вводу-виводу	102
6.2 Огляд реалізованого веб-інтерфейсу	103
Висновки розділу 6	110
7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	111
7.1 Інформаційна карта стартап-проєкту	111
7.2 Бізнес-модель стартапу	116
7.3 Аналіз ринкових можливостей та конкурентного середовища	118
7.4 Маркетингова стратегія	121
Висновки до розділу 7	124
ВИСНОВКИ	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128

ВСТУП

Сучасна промислова автоматизація характеризується модернізацією, спрямованою на створення гнучких, адаптивних та інтелектуальних систем управління. Одними з ключових тенденцій розвитку є перехід від традиційних апаратно-орієнтованих засобів автоматизації до програмно-визначених функцій та активна інтеграція концепцій Індустрії 4.0, зокрема Промислового Інтернету Речей (Industrial Internet of Things, IIoT). Реалізація таких підходів дозволяє створювати «розумні» виробництва, здатні швидко адаптуватися до змін технологічних умов, підвищувати ефективність використання ресурсів, забезпечувати прозорість процесів і зменшувати експлуатаційні витрати.

Актуальність роботи. Зазначені тенденції є актуальними не лише для загальнопромислових об'єктів, але й для підприємств, що функціонують у вибухонебезпечних середовищах, зокрема в нафтогазовому комплексі, хімічній і фармацевтичній промисловості, на виробництвах лакофарбових матеріалів, у зернохосовищах та інших об'єктах із наявністю вибухонебезпечних газових або пилових сумішей. Історично автоматизація таких виробництв базувалася на використанні обладнання з жорстко заданою логікою та обмеженими можливостями розширення, що було зумовлено підвищеними вимогами до безпеки та надійності.

У сучасних умовах ці об'єкти також потребують модернізації з метою переходу до більш гнучких, масштабованих і функціональних рішень. Актуальності набуває можливість дистанційного моніторингу технологічних параметрів і технічного стану обладнання, віддаленого керування виконавчими механізмами (засувками, насосами, клапанами тощо), а також безпечної інтеграції даних у верхні рівні систем керування та IIoT-платформи. При цьому всі зазначені функції мають реалізовуватися з безумовним пріоритетом іскробезпеки, електромагнітної сумісності та надійності, що регламентується суворими вимогами міжнародних стандартів ATEX та IECEx для відповідних зон.

Таким чином, виникає потреба у створенні спеціалізованих апаратних рішень для віддаленого вводу-виводу сигналів, призначених для автоматизації у вибухонебезпечних зонах. Такі рішення мають поєднувати вимоги вибухозахисту з сучасними функціональними можливостями, що відкриває простір для розробки інноваційних апаратних платформ, орієнтованих на інтеграцію в розподілені системи автоматизації та ПоТ-середовище.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розробка виконана в рамках плану підготовки магістрів, під час навчання на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Мета і задачі дослідження. Метою даної магістерської дисертації є розроблення, дослідження та експериментальне обґрунтування апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу для автоматизації електромеханічних систем у вибухонебезпечних зонах з підтримкою IoT-функцій. Розроблений пристрій розглядається як базовий елемент для побудови сучасних, адаптивних і масштабованих систем автоматизації, у тому числі для застосування у вибухонебезпечних галузях промисловості.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язання такі завдання:

1. Провести аналіз науково-технічних джерел і нормативної бази щодо побудови апаратних засобів автоматизації для роботи у вибухонебезпечних зонах з урахуванням вимог вибухозахисту.
2. Дослідити принципи побудови підсистем віддаленого вводу-виводу у розподілених системах автоматизації та ПоТ-рішеннях і визначити основні технічні та функціональні вимоги до них.
3. Сформулювати технічні вимоги до апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу, призначеної для експлуатації у вибухонебезпечних зонах, з урахуванням вимог іскробезпеки, електромагнітної сумісності та надійності.

4. Розробити структурну та функціональну схеми апаратної частини підсистеми, визначивши архітектуру живлення, каналів вводу-виводу, гальванічної ізоляції та комунікацій.

5. Виконати схемотехнічне проєктування апаратної частини, включаючи вибір елементної бази, розрахунок джерел живлення, схем захисту та Ех-каналів.

6. Провести комп'ютерне моделювання та експериментальні випробування розробленої апаратної частини, з оцінюванням її основних електричних і функціональних характеристик.

7. Оцінити працездатність і перспективи практичного застосування розробленого рішення, включаючи можливості його інтеграції в ІоТ-системи та використання в промислових умовах.

Об'єктом дослідження процеси збору, перетворення та передавання сигналів у розподілених системах автоматизації в тому числі у вибухонебезпечних зонах.

Предметом дослідження є апаратні засоби та схемотехнічні рішення підсистеми віддаленого вводу-виводу, що забезпечують вибухозахищене виконання.

Методи дослідження. У роботі використано аналіз та узагальнення науково-технічних джерел і нормативної документації (АТЕХ, ІЕСЕх, ІЕС 60079) з питань автоматизації та вибухозахисту; системний аналіз архітектури розподілених систем автоматизації та підсистем віддаленого вводу-виводу; схемотехнічний аналіз і інженерні методи проєктування електронних пристроїв живлення, гальванічної ізоляції та конфігурованих І/О (Input/Output); комп'ютерне моделювання електричних кіл апаратної частини, зокрема імпульсних DC/DC-перетворювачів; експериментально-вимірювальні методи для дослідження характеристик живлення, стабільності та працездатності розробленого прототипу; порівняльний аналіз отриманих результатів із вимогами технічного завдання та нормативних документів.

Науково-технічна новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Запропоновано архітектуру апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу, що підтримує універсальні програмно конфігуровані входи-виходи та окремі вибухозахищені Ех-канали з гальванічною ізоляцією, що забезпечує безпечну інтеграцію в розподілені системи автоматизації вибухонебезпечних зон.

2. Розроблено схемотехнічні рішення системи живлення підсистеми, які забезпечують стабільну роботу електроніки при широкому діапазоні вхідної напруги 24 В постійного струму, буферизацію короточасних провалів напруги та обмеження енергії, що передається у вибухонебезпечну частину.

3. Удосконалено підхід до реалізації Ех-каналів типу Ех іс, шляхом поєднання гальванічно ізольованого джерела живлення, оптронної розв'язки та схем обмеження напруги і потужності, що підвищує рівень іскробезпеки при збереженні функціональної гнучкості.

4. Отримано результати комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень, які підтверджують працездатність запропонованих схемних рішень імпульсного DC/DC-перетворювача та відповідність основних електричних характеристик вимогам технічного завдання.

5. Показано можливість інтеграції розробленої апаратної частини в IoT-орієнтовані системи, з використанням вбудованого мікроконтролера та web-інтерфейсу для конфігурації і моніторингу параметрів, що розширює функціональні можливості традиційних віддалених I/O-модулів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблені схемотехнічні та конструктивні рішення апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу формують готову основу для створення промислових модулів автоматизації, призначених для експлуатації у вибухонебезпечних зонах. Зокрема, запропонований підхід до реалізації вибухозахищених Ех-каналів може бути використаний під час проєктування іскробезпечних інтерфейсів, а готові електрична схема та друкована плата пристрою можуть слугувати для виготовлення дослідних або серійних зразків.

Крім того, окремі технічні розробки носять універсальний характер: система живлення та захисту може бути застосована в інших промислових пристроях з живленням 24 В постійного струму, а реалізований web-інтерфейс є доступним до подальших удосконалень для побудови людино-машинних інтерфейсів. Матеріали дослідження також можуть бути використані у навчальному процесі підготовки фахівців та як основа для майбутніх науково-конструкторських розробок.

Роботу виконано з використанням комплексу загальнонаукових і спеціальних методів, вибір яких зумовлений специфікою проєктування промислової електроніки підвищеної надійності. У процесі дослідження застосовувалися методи системного аналізу, порівняльної оцінки компонентів і технологічних рішень, схемотехнічного та топологічного моделювання, а також експериментально-вимірювальні методи для верифікації розрахунків і підтвердження характеристик розробленої апаратної частини.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ЩОДО АПАРАТНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН

Аналіз сучасних тенденцій розвитку промислової автоматизації та вимог до обладнання для вибухонебезпечних зон є необхідною передумовою для обґрунтованого проектування апаратних засобів. У зв'язку з цим у даному розділі розглядаються науково-технічні підходи до побудови підсистем віддаленого вводу-виводу, концепції ІоТ, а також нормативні вимоги щодо вибухозахисту. Результати цього аналізу використовуються для формування технічних вимог до апаратної частини підсистеми, що реалізуються у наступних розділах роботи.

1.1 Технологія ІоТ

Інтернет бере свій початок у 1980-х роках. У цей період швидке поширення комп'ютерних мереж дозволило користувачам отримувати доступ до документів, розміщених на комп'ютерах у різних частинах світу — наприклад, через протокол FTP (File Transfer Protocol), який активно використовувався в університетських мережах. Для приватного користування набули популярності комерційні, але закриті мережі, такі як America Online (AOL) у США або Bildschirmtext (BTX) у Німеччині. Однак закритість протоколів і різноманітність форматів документів створили потребу у стандартизації форматів і спрощеному доступі до інформації наприкінці 1980-х – на початку 1990-х років. Одним із перших підходів у цьому напрямі стала система Gopher [3], яка на той час користувалася значною популярністю. Gopher забезпечувала роботу з автоматично створюваними меню, форматованим текстом і гіперпосиланнями.

Приблизно в цей самий час Тім Бернерс-Лі розробляв концепцію «Всесвітньої павутини» (World Wide Web), що являла собою глобальну мережу документів. У квітні 1993 року WWW було відкрито для вільного

використання. Ця технологія запровадила гіпертекстові посилання у форматі Hypertext Markup Language (HTML) та можливість створювати структуровані, форматовані документи.

Так з'явилися Інтернет і Всесвітня павутина (WWW) у тому вигляді, у якому ми їх знаємо сьогодні — відкритими, доступними для всіх і вільними у використанні [4].

З технічної точки зору, термін «Інтернет» стосується низькорівневих комунікаційних протоколів, описаних у специфікаціях RFC 790–793 і RFC 7323 (2014).

Таким чином, структура комунікацій у мережі охоплює кілька рівнів:

- фізичний рівень (Physical Layer): з'єднання між двома точками реалізується за допомогою технологій, таких як Ethernet або бездротова локальна мережа (WLAN) .
- мережевий і транспортний рівні (Network / Transport Layers): передавання даних у мережі за допомогою протоколів Internet Protocol 4 (IPv4), Internet Protocol 6 (IPv6), Transmission Control Protocol (TCP) та Internet Control Message Protocol (ICMP).
- прикладний рівень (Application Layer): www відноситься до прикладного рівня, зокрема до протоколу передачі гіпертексту HTTP (Hypertext Transfer Protocol) або його безпечної версії HTTPS (HTTP Secure). У межах WWW цей рівень використовується для передавання документів у форматі HTML.

Одночасно із появою Всесвітньої павутини стало очевидним, що комп'ютери будуть використовуватися людьми не лише для доступу до документів. В більшість різноманітних ситем почали застосовувати Інтернет для обміну даними та створення нових сервісів.

У 1991 році Марк Вайзер сформулював концепцію «ubiquitous computing» чи «embodied virtuality» [5], у якій передбачалося, що комп'ютерні системи будуть інтегруватися в наше повсякденне життя, виконуючи певні функції, але не будуть сприйматися як окремі пристрої, — лише через ті

послуги, які вони надають. Саме так зараз використовують поширений термін «Інтернет речей» (Internet of Things, IoT), для позначення мережі взаємопов'язаних інтелектуальних об'єктів, що взаємодіють між собою через Інтернет і здійснюють обмін інформацією або надання послуги без безпосередньої участі людини чи традиційної взаємодії «людина-комп'ютер».

Термін «Інтернет речей» був уперше запропонований у 1999 році Кевіном Ештоном у контексті використання технології радіочастотної ідентифікації (RFID). Він також зазначав в журналі RFID Journal «Інтернет речей має потенціал змінити світ, так само, як це зробив Інтернет. Можливо, навіть більше» [6].

Відповідно до визначення Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), Інтернет речей (IoT) є глобальною інфраструктурою інформаційного суспільства, яка забезпечує надання передових сервісів шляхом взаємодії фізичних та віртуальних об'єктів на основі існуючих та тих, що розвиваються, взаємодіючих інформаційно-комунікаційних технологій (ICT) [7].

У контексті Інтернету речей, термін «речі» (things) охоплює об'єкти фізичного світу (physical things) та об'єкти віртуального чи інформаційного світу (virtual things), які можуть бути ідентифіковані, інтегровані та включені до мережі зв'язку. Кожна така «речі» містить пов'язану з нею інформацію, яка може бути статичною — тобто такою, що не змінюється з часом (наприклад, заводський номер або тип пристрою), або динамічною — тобто такою, що змінюється в процесі експлуатації (наприклад, поточні параметри роботи, чи стан)[8].

Фізичні об'єкти існують у реальному фізичному середовищі та можуть бути ідентифіковані, виміряні контрольними засобами, керовані виконавчими механізмами і підключені до мережевої інфраструктури для обміну даними. До таких об'єктів належать елементи навколишнього середовища, промислові роботи, технологічне обладнання, електромеханічні приводи, побутові та електротехнічні пристрої.

Віртуальні об'єкти функціонують у інформаційному середовищі, де вони можуть бути збережені, оброблені, передані та доступні через комунікаційні мережі. Прикладами таких об'єктів є прикладне програмне забезпечення, віртуальні моделі систем, цифрові сервіси та бази даних.

Завдяки використанню можливостей ідентифікації, збору даних, їх обробки та комунікації, IoT забезпечує ефективне використання систем для надання послуг у найрізноманітніших галузях застосування, водночас гарантуючи виконання вимог безпеки та конфіденційності даних.

Згодом науковці розширили поняття Інтернету речей (IoT), розглядаючи його не лише як мережу взаємопов'язаних об'єктів, а як комплексну технологічну екосистему, що інтегрує датчики, виконавчі механізми, модулі, мобільні пристрої та інші елементи кіберфізичних систем. На сьогодні загальноприйняте визначення Інтернету речей (IoT) звучить так:

Інтернет речей — це динамічна глобальна мережева інфраструктура з можливостями конфігурації, побудована на основі стандартних і взаємодіючих комунікаційних протоколів, у якій фізичні та віртуальні «речі» мають ідентифікатори, фізичні характеристики, віртуальні властивості, використовують інтелектуальні інтерфейси та інтегровані безперешкодно в інформаційне середовище [9].

1.2 Модулі вводу/виводу та їх використання в промисловій автоматизції

Модуль I/O (Input/Output) чи модуль вводу/виводу – це пристрій, який забезпечує зв'язок між комп'ютерною системою та периферійними пристроями. Його ключові функції включають виконання функцій вирішального посередника, управління такими важливими функціями, як передача даних, керування живленням та функціями електромеханічної системи [10].

У сфері промислової автоматизації введення/виведення (I/O) є фундаментальною ланкою, що з'єднує фізичні процеси на виробничому майданчику з цифровою системою керування. Вхідні дані – це інформація про фізичний стан (температура, тиск, положення, струм), зібрана датчиками. Ці безперервні або дискретні сигнали перетворюються на цифрові дані для обробки контролером. Вихідні дані – це команди, які надсилаються від контролера до виконавчих механізмів (двигунів, клапанів, насосів) для виконання фізичних дій, що керують процесом. I/O модулі слугують інтерфейсом для узгодження цих сигналів, забезпечуючи коректну передачу та перетворення даних між польовими пристроями та логікою керування.

Системи введення/виведення бувають різних типів, і кожен з них виконує власні специфічні функції та застосовується у відповідних сферах. Два основні типи — це: аналогові модулі введення/виведення (Analog I/O Modules) та цифрові модулі введення/виведення (Digital I/O Modules).

Аналогові приймають та генерують аналогові сигнали, наприклад від датчиків температури, тиску, рівня потоку тощо. Вони широко використовуються у системах керування технологічними процесами, машинним керуванні та системах екологічного моніторингу.

Цифрові призначені для роботи з дискретними сигналами, які мають лише два стани — «увімкнено» / «вимкнено» або фіксовані дискретні значення. Такі модулі застосовуються у системах безпеки, керуванні обладнанням, автоматизації будівель тощо.

Класично I/O (Input/Output) модулі були розширенням до ПЛК, фізично розташовувалися поруч із центральним контролером. Ця архітектура забезпечувала швидкість і надійність завдяки прямим коротким з'єднанням. Проте, з розвитком великих та територіально розподілених систем, виникла потреба у дистанційних модулях.

Віддалене введення/виведення (Remote I/O — це система, в якій I/O-модулі встановлюються децентралізовано та окремо від центрального контролера. Дистанційний I/O розміщується безпосередньо поблизу

обладнання і зв'язується з центральним контролером через промислові комунікаційні протоколи, такі як PROFINET, EtherCAT або EtherNet/IP. Цей крок дозволив децентралізувати збір даних, спростити монтаж та підвищивши гнучкість системи [11].

Модульна структура є особливо корисною для великих промислових підприємств, де потрібно час від часу додавати нові машини або сенсори. Це дозволяє розширювати блокову архітектуру або систему віддаленого введення/виведення без необхідності модернізувати всю систему керування.

Ethernet I/O (Input/Output) модулі, у свою чергу, забезпечують передачу даних на великі відстані та дають змогу здійснювати дистанційний моніторинг і керування процесами в реальному часі [12].

Впровадження Промислового Інтернету Речей (IIoT) радикально трансформувало функціонал дистанційних I/O модулів. Сучасні моделі є інтелектуальними периферійними пристроями (Smart Edge), які не лише передають дані, а й здатні їх обробляти та аналізувати безпосередньо на місці збору. Ключові переваги IIoT-сумісних I/O [13]:

- багатопроTOCOLність: підтримка IIoT-протоколів (MQTT, OPC UA) дозволяє модулю напряму підключатися до хмарних платформ або корпоративних систем, усуваючи необхідність у проміжних шлюзах;
- периферійні обчислення (Edge Computing): модуль може виконувати локальну фільтрацію, агрегацію та аналітику (наприклад, моніторинг вібрації), надсилаючи до хмари лише релевантні або аномальні дані. Це знижує навантаження на мережу, забезпечує низьку затримку для критичних рішень та підвищує кібербезпеку;
- підтримка PdM: Завдяки інтелектуальній обробці даних, ці модулі є основою для реалізації прогностичного обслуговування (PdM). Вони перетворюють дані датчиків (наприклад, IO-Link [14]) на корисну діагностичну інформацію.

Таким чином, сучасний дистанційний ввід/вивід став активним, автономним елементом, який забезпечує не лише керування процесом, але й

його цифрову інтеграцію в масштабі підприємства, що є суттю Industry 4.0. Використання таких систем можна знайти в широкому спектрі систем промислової та технологічної автоматизації, головним чином для суттєвого зменшення кількості необхідних кабельних з'єднань та спрощення архітектури.

Можливі застосування є настільки ж різноманітними, як і вимоги різних галузей, що підкреслює його важливість у сучасних рішеннях для автоматизації:

- хімічна та фармацевтична: системи дозволяють точно контролювати виробничі процеси та моніторинг параметрів (наприклад, тиску, температури, рівня). Це сприяє дотриманню суворих стандартів безпеки та якості, які є критичними для цих галузей.

- Енергетика та пов'язані галузі: застосовується для ефективного керування роботою електростанцій, водоочисних споруд та розподільчих мереж. Він дозволяє централізовано контролювати віддалені об'єкти та мережеві вузли.

- автомобільна промисловість: використовується у великих автоматизованих застосуваннях, таких як виробничі лінії та роботизовані системи. Розташування I/O-модулів близько до обладнання підвищує надійність і швидкість обміну даними з маніпуляторами та конвеєрами.

- виробнича сфера загалом: є важливим для будь-якої великої або територіально розподіленої системи, де потрібна гнучка інтеграція та масштабоване розширення автоматизованих мереж.

1.3 Класифікація вибухонебезпечних зон

Класифікація небезпечних зон використовується для визначення місць, де через потенційну можливість утворення вибухонебезпечного середовища необхідні спеціальні запобіжні заходи щодо джерел займання для запобігання

пожежам та вибухам. Класифікацію небезпечних зон проводиться як невід'ємна частина оцінки ризику для визначення місць, де потрібен підвищений контроль над джерелами займання, а також тих місць, де його немає. Небезпечні місця додатково класифікуються на зони, які розрізняють місця з високою ймовірністю виникнення вибухонебезпечного середовища та місця, де вибухонебезпечне середовище може виникати за нестандартних обставин. Класифікація зон подана у главах 4 та 5 нормативного документа НПАОП 40.1-1.32 [15], а також детально регламентується ДСТУ EN 60079-10-1:2018 [16] (Вибухонебезпечні середовища. Частина 10-1. Класифікація зон. Вибухонебезпечні газові середовища) та ДСТУ EN 60079-10-2:2016 [17] (Вибухонебезпечні середовища. Частина 10-2. Класифікація зон. Горючий пил).

В нормативно правових документах [15, 16, 17] маємо декілька визначень стосовно вибухонебезпечного середовища з якими треба ознайомитися.

Вибухонебезпечне середовище — об'єм, у якому середовище внаслідок природних або виробничих чинників може стати вибухонебезпечним.

Вибухонебезпечна суміш — суміш повітря з горючими газами, парою, туманами, горючим пилом та волокнами, у якій за нормальним атмосферних умов після запалення процес горіння (вибух) поширюється на весь об'єм суміші. Горючий пил або волокна вважаються вибухонебезпечними, якщо і разі їх мимовільного загорання в установці за визначеною нижньою концентраційною його межею за ГОСТ 12.1.044 виникає надмірний тиск газів як мінімум 5 кПа.

До вибухонебезпечної суміші належать суміші горючих газів і пари легкозаймистої рідини з киснем, хлором або іншими окислювачами.

Вибухонебезпечна зона (Ех-зона)— простір у приміщенні або навколо зовнішньої установки, у якому присутнє вибухонебезпечне середовище або воно може утворюватися внаслідок природних чи виробничих чинників у

такій кількості, яка вимагає спеціальних заходів у конструкції електрообладнання під час його монтажу та експлуатації.

Вибухозахищене електротехнічне обладнання — електротехнічний виріб спеціального призначення, який виконано таким чином, що усунена або утруднена можливість запалення навколишнього вибухонебезпечного середовища під час експлуатації цього виробу.

Клас вибухонебезпечної зони, згідно з яким виконуються вибір і розміщення електроустановок, в залежності від частоти і тривалості присутнього вибухонебезпечного середовища визначається технологами разом з електриками проєктної або експлуатаційної організації.

Клас вибухонебезпечних зон характерних виробництв та категорія і група вибухонебезпечної суміші повинні відображатися в нормах технологічного проєктування або в галузевих переліках виробництв з вибухопожежонебезпеки.

Газо-, пароповітряні вибухонебезпечні середовища утворюють вибухонебезпечні зони класів 0, 1, 2, а пилоповітряні — вибухонебезпечні зони класів 20, 21, 22.

Ех-зони класифікуються залежно від ймовірності виникнення та тривалості присутності вибухонебезпечного середовища. Таке зонування дозволяє визначити необхідний рівень заходів безпеки та тип електротехнічного обладнання, яке слід застосовувати для мінімізації ризиків роботи у вибухонебезпечних середовищах [18].

Зона 0 — це простір, у якому вибухонебезпечна атмосфера присутня постійно, протягом тривалого часу або часто. В цій зоні повинен бути найвищий рівень захисту та використання спеціалізованого обладнання. У зонах 0 дозволяється застосовувати лише вибухобезпечні пристрої з типом захисту іскробезпечні, які успішно пройшли сертифікацію відповідно до вимог АТЕХ [19].

Зона 1 — це простір, у якому вибухонебезпечна атмосфера може періодично виникати під час нормальної роботи обладнання. У цій зоні

концентрація горючих речовин зазвичай менша або зберігається протягом коротших проміжків часу, ніж у Зоні 0. Для цієї зони застосовується обладнання, що має вибухозахист або є іскробезпечним.

Зона 2 — це простір, у якому вибухонебезпечна атмосфера малоймовірна під час нормальної експлуатації, але може з'явитися іноді і лише на короткий час. Концентрація горючих речовин у цій зоні, як правило, нижча, ніж у зоні 1. Обладнання, що використовується в зоні 2, повинно бути придатним для експлуатації у вибухонебезпечних середовищах.

Зона 20 — це простір, у якому вибухонебезпечна атмосфера у вигляді хмари горючого пилу присутня постійно, протягом тривалого часу або часто. Ця зона потребує найвищого рівня вибухозахисту та застосування обладнання, спеціально призначеного для експлуатації у середовищах з наявністю горючого пилу.

Зона 21 — це область, у якій вибухонебезпечна атмосфера, що складається з горючого пилу, може періодично виникати під час нормальної роботи. Обладнання, що використовується у Зоні 21, повинно бути спроектоване так, щоб запобігати займанням або вибухам пилу.

Зона 22 — це область, у якій вибухонебезпечна пилова атмосфера малоймовірна під час нормальної експлуатації, але може виникати рідко і лише на короткий час. Для таких зон застосовується обладнання, придатне для роботи у вибухонебезпечних середовищах, де можливе короткочасне утворення пилових хмар.

Стандарт ІЕС 60079-0, опублікований у 2011 році, запровадив новий підхід до оцінки ризиків, відомий як «Рівень захисту обладнання» (Equipment Protection Level, EPL). Призначений EPL обладнання вказує на рівень ризику або ймовірність того, що дане обладнання може стати джерелом займання у вибухонебезпечному середовищі [22].

Такий підхід враховує не лише клас небезпечної зони, але й наслідки можливого вибуху. Основною метою концепції EPL є забезпечення гнучкості у виборі обладнання для використання в різних зонах вибухонебезпечного

середовища. Наприклад, обладнання з рівнем захисту Gc може бути допустимим для використання у зоні 1, якщо концентрація горючих газів або парів є незначною, а місце експлуатації здебільшого без персоналу. Навпаки, обладнання з рівнем захисту Gb може бути обрано для зони 2, якщо потрібно забезпечити його роботу під час тривалого аварійного стану.

1.4 Стандарти підсистем у вибухонебезпечній зоні

Основні вимоги до безпеки обладнання, призначеного для використання у вибухонебезпечних середовищах на території Європейського Союзу прописані в директиві ATEX (Atmosphères Explosibles) яка гарантує, що електричне та механічне обладнання розроблено таким чином, щоб запобігти займанню у вибухонебезпечних середовищах [18].

International Electrotechnical Commission (IEC) це міжнародна організація зі стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій, яка розробила IECEx (IEC Scheme for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres) яка є міжнародною системою сертифікації для забезпечення загальновизнаного рівня безпеки обладнання [23].

Обидва протоколи базуються на міжнародних стандартах, таких як серія IEC-EN 60079. Інші регіональні протоколи включають NEC/CEC, CSA у Північній Америці та специфічні національні стандарти, наприклад IS 16724 в Індії. Ці сертифікації забезпечують, що обладнання спроектоване, виготовлене та протестоване для безпечного використання у небезпечних середовищах з метою запобігання займання.

1.5 Формування вимог до апаратної частини підсистеми

Підсистема віддаленого вводу виводу розробляється як пристрій, що функціонує у складі системи автоматизації та потребує наявності контролера

або CPU для роботи. Загальна кількість каналів пристрою становить 6 універсальних каналів загального призначення, які повинні бути програмно конфігурованими. Ці канали мають бути конфігурованими, можуть працювати як цифрові входи, цифрові виходи або аналогові входи. Додатково передбачено 2 конфігуровані канали Ex-виконання, відокремлені від загальних, які можуть бути налаштовані як цифрові входи або цифрові виходи.

Для взаємодії з користувачем передбачається підтримка HMI через вбудований Web-сервер. Візуальна індикація стану має забезпечуватися за допомогою LED-індикації відповідно до стандарту NAMUR NE 1076.

Модуль повинен живитися від 24 В постійної напруги. Джерело живлення має відповідати вимогам Safety Extra-Low Voltage (SELV) та бути Limited Power Source (LPS). Статичний допустимий діапазон напруги становить 20.4..28.8 В DC, а динамічний допустимий діапазон — 18.5..30.2 В DC.

Апаратна частина повинна мати захист від зворотної полярності та захист від короткого замикання на вході. Типове споживання струму електронікою від 24 В DC має бути менше 100 мА, окрім струму на виходах, де кожен вихід споживає до 0.5 А. Максимальний пусковий струм не повинен перевищувати 5 А. Також вимагається буферизація збою напруги для електроніки (без виходів) протягом 1 мс. Діагностична LED-індикація включає світлодіоди Power, RUN та Status of DIQ.

Модуль повинен мати ступінь захисту IP20. Спосіб монтажу — на DIN-рейку ТН 3521. Підключення живлення та каналів загального призначення здійснюється через зелені клеми (Green Terminals), тоді як Ex-канали повинні підключатися через сині клеми (Blue Terminals). Робоча температура при горизонтальній та вертикальній інсталяції складає 0...55.

Пристрій має функціонувати при атмосферному тиску 795...1080 гПа та на висоті над рівнем моря від -1000 м до 2000 м.

Тип з'єднання — Wi-Fi з підтримкою режиму Access Point (AP). Для доступу до модуля потрібен лише браузер. Доступ до налаштувань має бути захищений паролем.

1.6 Вимоги до конфігурованих каналів для вибухонебезпечного середовища (Ех-зони)

Спеціалізована апаратна частина повинна забезпечувати роботу 2 конфігурованих каналів, відокремлених від загальних DIQ. Ключовою вимогою є наявність електричної ізоляції. Робоча вхідна/вихідна напруга для цих каналів становить 12 V. Канали повинні мати вибухозахист типу Ex ic.

Встановлення самого модуля у вибухонебезпечній зоні заборонено, дозволяється підключати лише польові пристрої, дозволені для Зони 2/22.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналітичний огляд науково-технічних джерел, що стосуються історії та впровадження технологій ІоТ в промислову автоматизацію, та нормативної бази щодо роботи електротехнічного обладнання у вибухонебезпечних зонах. Досліджено та описано типове використання модулів віддаленого вводу/виводу в промислових системах. На основі цього аналізу та з урахуванням класифікації вибухонебезпечних зон було сформульовано технічні вимоги до апаратної частини підсистеми вводу виводу, включаючи функціонал, електричні, механічні та спеціальні вимоги до каналів Ех-виконання.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

На основі аналізу науково-технічних джерел та нормативних вимог, виконаного у попередньому розділі, у цьому розділі здійснюється проєктування апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу. Розглядається побудова структурної та функціональної схеми пристрою, визначається архітектура живлення, каналів вводу-виводу та вибухозахищеної частини. Прийняті проєктні рішення та розрахункові параметри слугують основою для подальшої схемотехнічної реалізації та перевірки працездатності підсистеми.

2.1 Розробка та опис функціональної схеми

Функціональна схема наведена на рисунку 2.1, відображає загальну побудову апаратної частини пристрою, який працює у складі системи автоматизації та виконує функції збору, обробки й передавання сигналів.

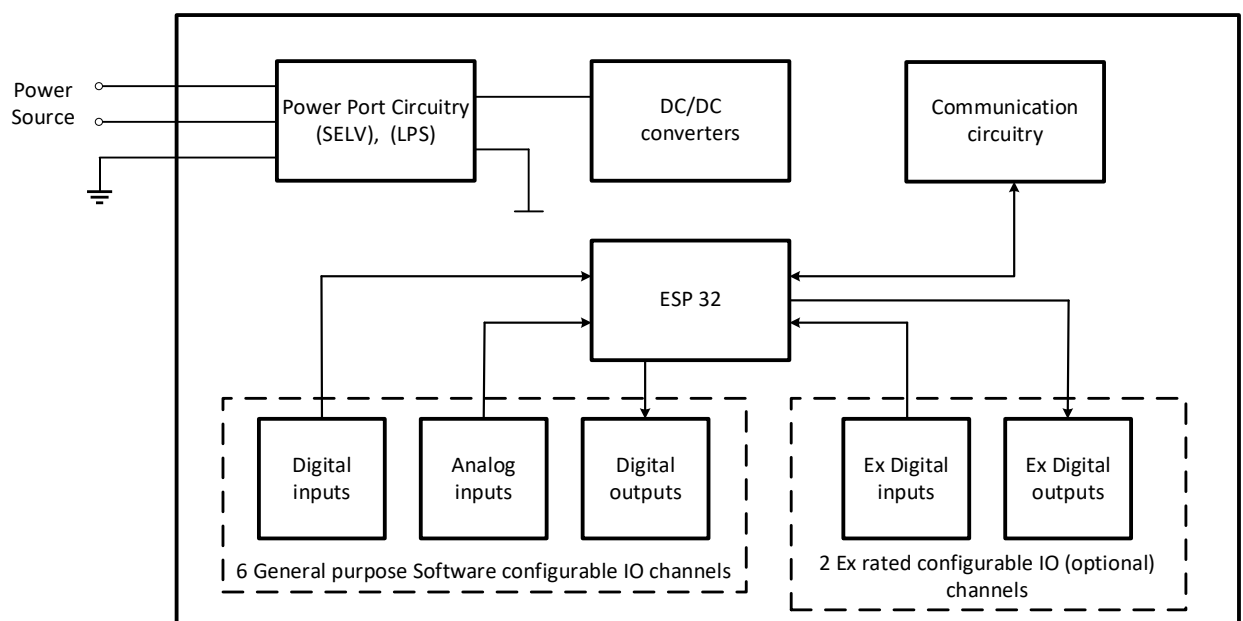


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд функціональної схеми

Підсистема розробляється як периферійний модуль, що взаємодіє з головним контролером, забезпечуючи обмін інформацією через комунікаційні інтерфейси. Для побудови сучасних модулів Інтернету речей (IoT) найчастіше використовуються мікроконтролери, які поєднують у собі високу енергоефективність, достатню обчислювальну потужність та інтегровані засоби бездротового зв'язку. До таких належать контролери сімейств ESP32, STM32, nRF52, RP2040, а також мікроконтролери на базі ARM Cortex-M.

Серед цих варіантів ESP32 є одним із найпоширеніших контролерів завдяки поєднанню низької ціни, високої продуктивності (двоядерний процесор Tensilica Xtensa LX6, частота до 240 МГц) і наявності інтегрованого модуля Wi-Fi. Крім того, ESP32 має розвинену систему периферійних інтерфейсів.

За технічним завданням живлення пристрою здійснюється від джерела постійної напруги 24 В, що відповідає вимогам SELV (Safety Extra-Low Voltage) та LPS (Limited Power Source).

Safety Extra-Low Voltage (SELV) – безпечна наднизька напруга, це міжнародний стандарт електробезпеки, який визначає систему електроживлення, де номінальна напруга не перевищує безпечний поріг, як у нормальних умовах роботи, так і при виникненні одиничної несправності, включаючи замикання на землю в інших ланцюгах. Ключовими вимогами SELV є захисне електричне розділення (гальванічна ізоляція) кола SELV від усіх кіл із вищою напругою (наприклад, від мережі) та відсутність навмисного заземлення будь-якого струмопровідного провідника SELV. Цей підхід гарантує, що у разі випадкового контакту людини з частинами пристрою, ризик ураження електричним струмом є мінімальним або відсутнім, оскільки неможливе проходження струму через тіло до землі.

LPS (Limited Power Source) — це стандарт, що стосується протипожежної безпеки і визначає, що джерело живлення повинно мати жорсткі обмеження щодо максимально допустимої вихідної потужності, струму та напруги навіть у випадку виникнення несправності в самому

джерелі. Для систем живлення до 30 V постійного струму обмеження вимагають, щоб струм не перевищував 8 A, а потужність — 100 Вт. Використання джерела з обмеженою потужністю дозволяє мінімізувати енергію, яка може бути передана в навантаження або у разі короткого замикання, що істотно знижує ризик займання та перегріву. Це, у свою чергу, дозволяє використовувати компоненти та ізоляцію з менш суворими вимогами до вогнестійкості та спрощує загальні вимоги до встановлення обладнання.

Допустимі межі живлення становлять: статичний діапазон — 20.4...28.8 В DC, динамічний — 18.5...30.2 В DC. У схемі передбачено вузол вхідного живлення (Power Port Circuitry), який забезпечує захист від зворотної полярності, короткого замикання та імпульсних перенапруг. Далі напруга подається на DC/DC перетворювачі, які формують стабілізовані рівні живлення для цифрової логіки, мікроконтролера та комунікаційної частини.

На рисунку 2.2 показано деталізована схема, яка розширює архітектуру підсистеми, фокусуючись на реалізації блоків живлення, гальванічної ізоляції та каналів вводу/виводу, особливо для Ех-зон.

Вхідна напруга 24V спочатку проходить через блоки захисту та фільтрації. Вхідні захисти (Input Protections): забезпечує первинний захист від перенапруг та перехідних процесів, що надходять із зовнішнього джерела живлення. Фільтри призначені для придушення високочастотних перешкод та шуму, забезпечуючи чисте живлення для подальших схем. А для згладжування пульсацій та забезпечення працездатності пристрою під час короткочасних збоїв напруги тривалістю до 1 мс передбачено застосування буферної ємності.

Основний конвертер DC/DC, буде використано для перетворення основної вхідної напруги 24 В до 3.3 В, для живлення центрального мікроконтролера ESP32 та допоміжних схем.

Зв'язок між ESP32 та Ех-каналами, здійснюється через оптопари. Цей блок забезпечує контроль та комунікацію через ізоляційний бар'єр.

Живлення Ех-каналів для забезпечення вимог безпеки, має бути гальванічно ізольоване від основного живлення. Для цього буде використано

ізолюваний DC/DC перетворювач 15 V та ізолювану землю GND2 . Отримана ізолювана напруга використовується для живлення схем Ex-каналів.

Схема захисту від перенапруги (Crowbar) є критично важливою для гарантування іскробезпеки (Ex ic) шляхом обмеження максимальної напруги, яка може бути передана в небезпечну зону. принцип роботи захисту полягає в швидкому шунтуванні ізолюваної шини 15 В у разі перевищення напруги, при цьому плавкий запобіжник відключає сигнали що йдуть до небезпечного середовища від джерела живлення

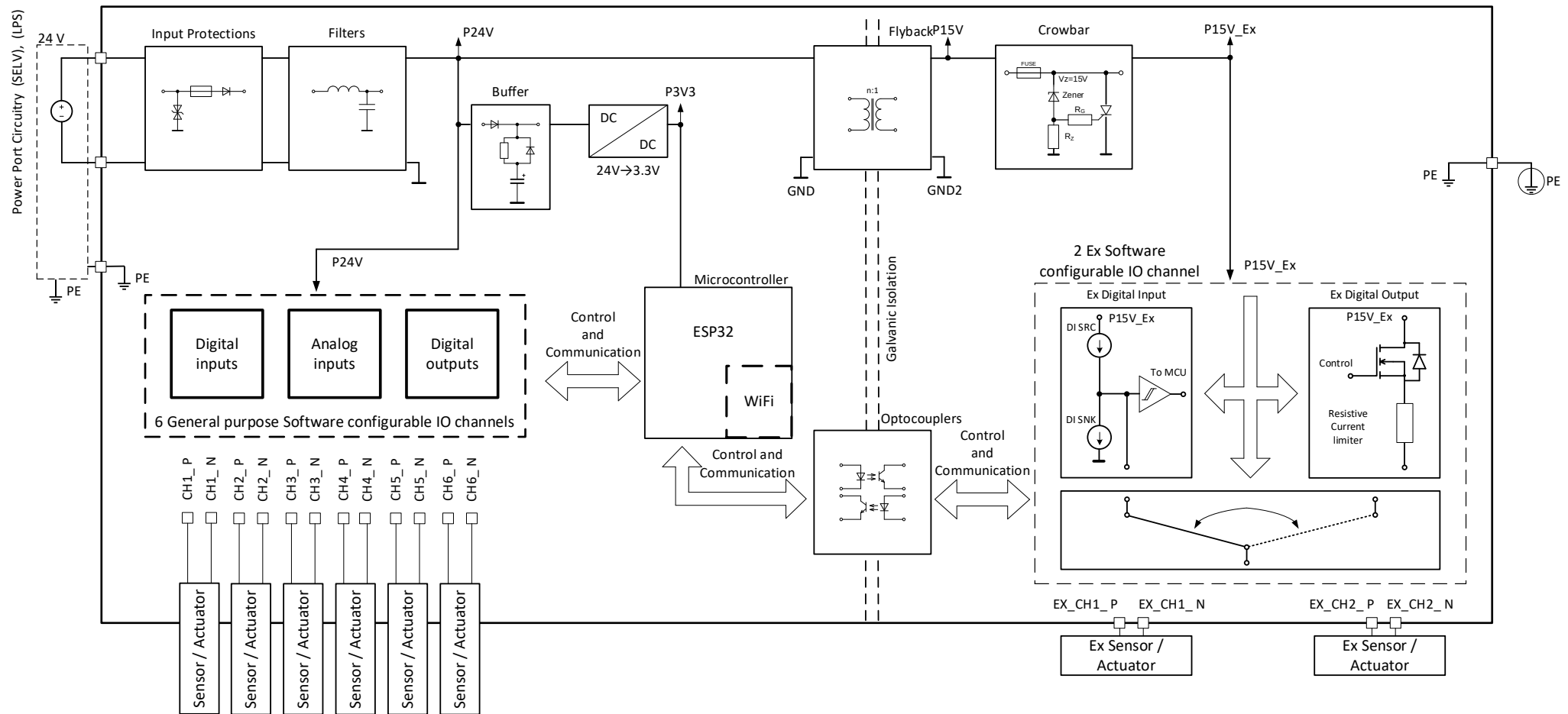


Рисунок 2.2 – Детальний вигляд функціональної схеми апаратної частини системи

2.2 Розрахунок буферної ємності живлення

Для забезпечення надійного та безперебійного функціонування підсистеми віддаленого вводу/виводу необхідна стабільна вхідна постійна напруга 24 В постійного струму. Оскільки в промислових умовах можуть виникати короточасні провали або зникнення напруги живлення, критично важливо забезпечити захист центральної електроніки модуля (мікроконтролера ESP32 та схеми зв'язку) від таких подій. Технічними вимогами чітко встановлено необхідність гарантувати буферизацію збою напруги тривалістю 1 мс. Відповідно, розрахуємо мінімально необхідну буферну ємність, яка, використовуючи накопичену енергію, зможе підтримувати споживання постійного струму електронікою (менше 100 мА) протягом заданого інтервалу, забезпечуючи безперервність роботи та запобігаючи несанкціонованому перезавантаженню.

Таблиця 2.1 – Електричні характеристики підсистеми

Вхідні параметри	Значення та функції
Вхідна напруга	24 В постійного струму $\pm 20\%$
Джерело живлення	SEL, LPS
Діапазон (статичний)	20.4 – 28.8 В постійного струму
Діапазон (динамічний)	18.5 – 30.2 В постійного струму
Захисти	Зворотна полярність, КЗ, перенапруга
Струм споживання	< 100 мА (середній), до 3 А на вихід
Пусковий струм, макс	5 А
Час роботи буфера	1 мс

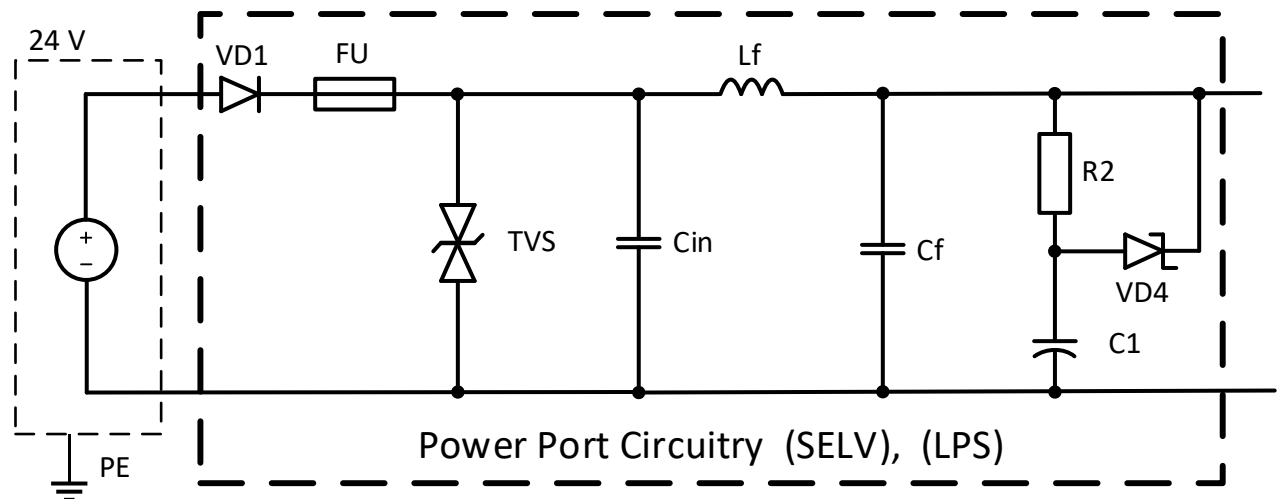


Рисунок 2.3 – Схема порту живлення (SELV), (LPS)

Діод захисту від зворотної полярності VD1, розташований одразу на вході й гарантує захист від зворотної полярності. Якщо вхідна напруга подається з порушенням полярності, діод блокує проходження струму, захищаючи чутливу електроніку від пошкодження. Тип: Шотткі або швидкодіючий, на малий прямий падіння напруги. За струмом, номінальний: ≥ 0.5 А, імпульсний: ≥ 5 А (на випадок inrush current). Обираємо, SS54 (5 А, 40 В, $V_f \sim 0.55$ В)[25].

Плавкий запобіжник FU виконує подвійну функцію, забезпечує захист від короткого замикання на вході та обмежує максимальний струм відповідно до вимог LPS, що критично для протипожежної безпеки. Це також допомагає обмежити максимальний пусковий струм (Inrush current), який не повинен перевищувати 5 А. Обираємо Т тип. Компонент: SMD 1206 5А плавкий запобіжник [26].

Діод-супресор перехідної напруги TVS підключений паралельно до шини живлення і призначений для придушення перехідних стрибків напруги. У разі виникнення короткочасного, але потужного імпульсу напруги, TVS-діод швидко переходить у стан провідності, шунтуючи енергію імпульсу та обмежуючи напругу до безпечного рівня, тим самим захищаючи фільтри та DC/DC конвертери, розташовані далі. Діапазон напруги відповідно

технічному завданню 18.5 – 30.2 В. Обираємо TVS діод зі стартом затиску ~30 В, і стенд-офф напругою > 28.8 В. SMBJ30CA (stand-off: 30 V, clamp ~ 48 V) [27].

В схемі використовується багатoeлементний фільтр для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). Вхідний конденсатор C_{in} призначений для первинного згладжування пульсацій та фільтрації диференціальних шумів. C_{in} - X-конденсатор. Це неполярний конденсатор для загального фільтрування завад, він подавлює диференціальний шум. Тип: керамічний. Компонент: 100 нФ, 50 В, $\pm 10\%$ [28].

Диференціальна індуктивність L_f спільно з C_{in} та C_f формує рі-фільтр, який ефективно пригнічує диференціальні шуми (перешкоди між провідниками живлення). Конденсатори спільного режиму C_{cm} підключені від шин живлення до захисного заземлення РЕ і слугують для фільтрації шумів спільного режиму (перешкоди, що одночасно діють на обидва провідники відносно землі).

Для згладжування струму живлення, потрібна згладжуюча ємність, щоб обмежити пульсацію C_f – Фільтраційний конденсатор. Компонент: 10 мкФ, 50 В, X5R $\pm 20\%$ 0805 [29].

Щоб обмежити $inrush$ і згладити шум, L_f – Дросель. Компонент: 15uH 3A 98m Ω $\pm 20\%$ SMD [30].

Буферну ємність розраховуємо наступним чином, з умовою збереження напруги на 1 мс при вимиканні живлення:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (V_1^2 - V_2^2), \quad (2.1)$$

де E – це необхідний запас енергії, C – ємність конденсатора, $V_1^2 - V_2^2$ – це різниця падіння напруги з якого буде забезпечуватися буферизація.

Для підтримання живлення модуля протягом 1 мс, з урахуванням потужності ESP 32 та іншої електроніки маємо:

$$C_1 = \frac{2 \cdot E}{V_1^2 - V_2^2} = \frac{2 \cdot 0.004}{18^2 - 5^2} = 27 (\text{мкФ}), \quad (2.2)$$

де V_1 – це нижня межа джерела живлення, V_2 – значення напруги, яка впала на мінімальний рівень.

Обираємо компонент: 100 мкФ 35 В [31].

Резистор R_2 пусковий резистор, який обмежує струм заряду буферного конденсатора C_1 при включенні живлення. З урахуванням $V_{\text{sup}} = 24(\text{В}), I_{\text{max}} = 100(\text{мА})$, маємо:

$$R_2 = \frac{V_{\text{sup}}}{I_{\text{max}}} = \frac{24}{0.1} = 240 (\text{Ом}). \quad (2.3)$$

Обираємо резистор резистор на 220 (Ом), 0805, $\pm 1\%$, 0.125 (Вт) [32].

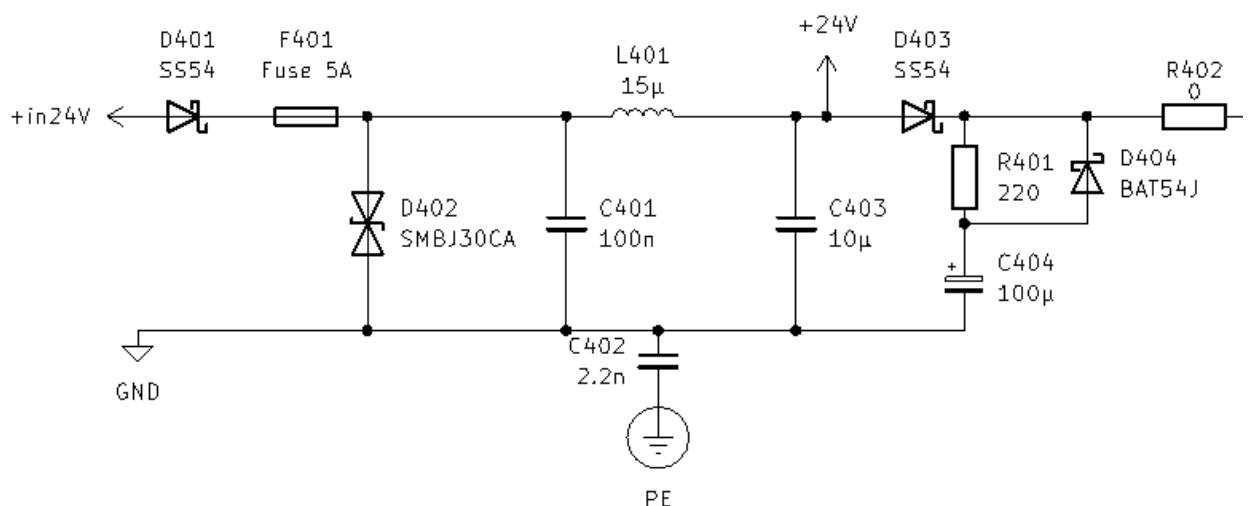


Рисунок 2.4 – Схема електрична принципова порту живлення

2.3 Розрахунок живлення 3.3 В

Для живлення центрального мікроконтролера ESP32 та допоміжної електроніки необхідна стабілізація напруги до 3.3 В з вхідної 24 В. Для виконання цієї функції був обраний інтегральний понижуючий DC/DC перетворювач MP1584, який забезпечує високий коефіцієнт корисної дії та компактність. Розрахунок зовнішніх компонентів для MP1584: резисторів, індуктивності та ємностей вхідного та вихідного фільтрів буде ґрунтуватися на рекомендаціях, наведених у технічній документації на мікросхему [33], з урахуванням номінальної вхідної напруги 24 В та максимального споживання струму електронікою, яке згідно з вимогами не перевищує 100 мА. Правильний вибір цих компонентів забезпечить стабільність вихідної напруги та мінімізує пульсації. На рисунку 2.5 показано схему типового застосування мікросхеми MP1584 для отримання напруги 3.3 В на виході.

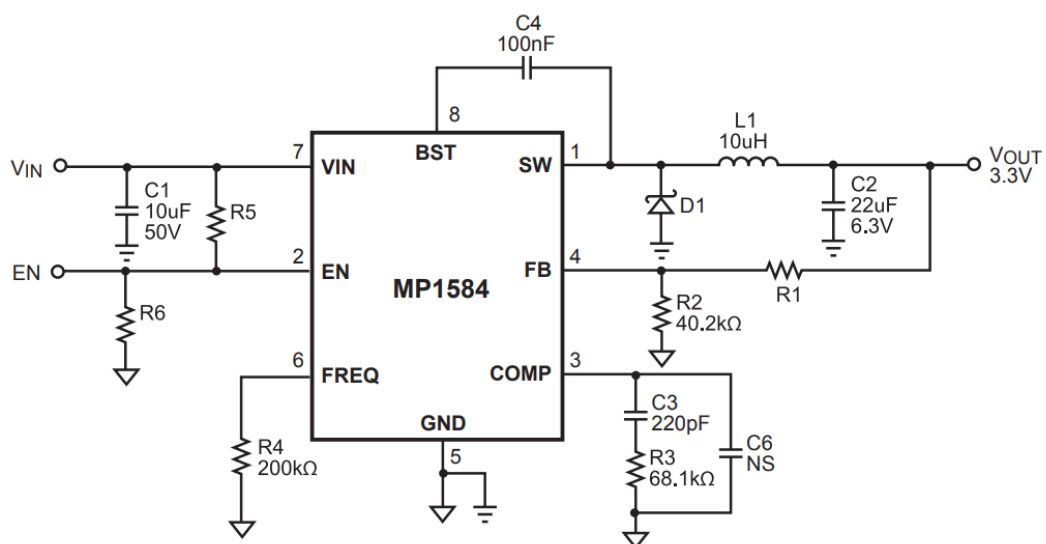


Рисунок 2.5 – Схема типового застосування MP1584

MP1584 – це імпульсний високочастотний понижуючий регулятор з вбудованим високовольтним силовим MOSFET з високою напругою. Він забезпечує вихід 3А з регулюванням струму для швидкої реакції контуру та

легкої компенсації. Широкий діапазон вхідної напруги від 4,5 до 28 В дозволяє використовувати його в різноманітних пристроях [33].

Плаваючий драйвер верхнього MOSFET живиться від зовнішнього bootstrap-конденсатора. Цей драйвер має власний захист від заниженої напруги. Порогове значення увімкнення становить 2.2 В, із гістрезисом у 150 мВ. Bootstrap-конденсатор заряджається і стабілізується на рівні близько 5 В за допомогою вбудованого внутрішнього регулятора. Коли напруга між виводами BST і SW менша за регульовану, вмикається прохідний PMOS-транзистор, з'єднаний між VIN і BST.

Зовнішнє коло повинно забезпечити достатній резерв напруги, щоб забезпечити заряджання. Поки напруга VIN значно вища за SW, bootstrap-конденсатор може заряджатися. Коли силовий MOSFET увімкнений, $VIN \approx SW$ — тому заряджання bootstrap-конденсатора неможливе в цей момент. Коли ввімкнено зовнішній діод, різниця між VIN і SW є максимальною — це найкращий момент для заряджання. Коли струм через індуктор відсутній, $SW \approx VOUT$ — тоді різниця між VIN і VOUT також може бути використана для заряджання bootstrap-конденсатора.

У режимах роботи з високим коефіцієнтом заповнення (тобто, коли силовий MOSFET більшість часу залишається увімкненим), доступний часовий інтервал для заряджання bootstrap-конденсатора скорочується, тому він може не зарядитися до достатнього рівня. Якщо внутрішня схема не має достатньої напруги, а bootstrap-конденсатор не заряджений, можна додати зовнішню допоміжну схему, щоб гарантувати, що напруга на bootstrap залишається в робочому діапазоні.

Постійне споживання струму плаваючим драйвером становить приблизно 20 μA . Потрібно забезпечити, щоб струм витoku (bleeding current) на виводі SW був більшим за 20 μA , це необхідно для того, щоб bootstrap-драйвер залишався зарядженим та стабільним у роботі, навіть коли MOSFET перебуває у стані високого duty cycle.

$$I_o + \frac{V_o}{(R_1 + R_2)} > 20\mu A. \quad (2.4)$$

Вихідна напруга встановлюється за допомогою резистивного подільника напруги, підключеного від вихідної напруги до виводу FB. Дільник знижує вихідну напругу до опорного значення FB згідно з відношенням:

$$V_{FB} = V_{OUT} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.5)$$

Таким чином, вихідна напруга визначається як:

$$V_{OUT} = V_{FB} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \quad (2.6)$$

Близько 20 μA струму з верхньої сторони bootstrap-схеми може з'являтися на виході, коли MP1584 працює без навантаження. Щоб поглинути цю незначну кількість струму, використаємо $R_2 = 33$ кОм. Тоді значення R_1 розраховуємо:

$$R_1 = (V_{OUT} / 0.8 - 1) \cdot 33 \cdot 10^3 = (3.3 / 0.8 - 1) \cdot 33 \cdot 10^3 = 103.125 \text{ кОм}. \quad (2.7)$$

Індуктивність необхідна для забезпечення постійного струму навантаження, при цьому на неї подається перемикана вхідна напруга. Індуктивність більшого значення зменшить кількість пульсацій струму, а в результаті менше пульсацій напруги на виході. Але водночас більша індуктивність має більші розміри, вищий омичний опір (DCR), менший струм насичення.

Типовим для вибору індуктивності — дозволити, щоб пульсації струму (пікові) складали ~30% від максимально допустимого струму ключа [40]:

$$L = \frac{V_{OUT} \cdot (1 - V_{OUT} / V_{IN})}{\Delta I_L \cdot f_s} = \frac{3.3 \cdot (1 - 3.3 / 24)}{0.3 \cdot 1.5 \cdot 5 \cdot 10^5} = 12.65 \text{ } \mu\text{Гн}, \quad (2.8)$$

де V_{OUT} - вихідна напруга; V_{IN} - вхідна напруга; f_s - частота перемикавання; ΔI_L - амплітуда пульсацій струму індуктора.

Піковий струм через індуктивність розраховується за формулою:

$$I_{Lpeak} = I_{LOAD} + \frac{V_{OUT} \cdot (1 - V_{OUT} / V_{IN})}{2L \cdot f_s} = 1.5 + \frac{3.3 \cdot (1 - 3.3 / 24)}{2 \cdot 1.5 \cdot 5} = 1.69 \text{ А} \quad (2.9)$$

де I_{LOAD} - струм навантаження.

Для керамічних конденсаторів: імпеданс на частоті перемикавання визначається в основному ємністю, і пульсація напруги спричинена здебільшого саме обмеженою ємністю.

У спрощеному вигляді:

$$\Delta V_{OUT} = \frac{V_{OUT} \cdot (1 - V_{OUT} / V_{IN})}{8 \cdot C_{OUT} \cdot f_s^2 \cdot L} = \frac{3.3 \cdot (1 - 3.3 / 24)}{8 \cdot 2.2 \cdot 2.5 \cdot 15} = 4.31 \text{ мВ}. \quad (2.10)$$

Мікросхема MP1584 використовує керування по струму, що полегшує компенсацію та забезпечує швидку реакцію на зміни навантаження. Стабільність системи та динаміка контролюються через вивід COMP — це вихід внутрішнього підсилювача похибки (error amplifier). Комбінація послідовного конденсатора та резистора створює полюс-нуль (pole-zero) для регулювання характеристик петлі.

Система має два важливих полюси, один з них зумовлений компенсаційним конденсатором (C3) і вихідним опором підсилювача похибки (error amplifier), інший — зумовлений вихідним конденсатором та опором навантаження:

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi \cdot C_3 \cdot G_{EA}}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{LOAD} \cdot C_{OUT}}$$
(2.11)

де G_{EA} — транспровідність підсилювача похибки, $G_{EA}=60\mu A/V$.

Система також має один важливий нуль (zero), який виникає через компенсаційний конденсатор (C3) та компенсаційний резистор (R3). Цей нуль розташований на частоті:

$$f_z = \frac{1}{2\pi \cdot R_3 \cdot C_3}$$
(2.12)

Система може мати ще один нуль, якщо вихідний конденсатор має високу ємність і/або високий ESR. Цей нуль, зумовлений ESR і ємністю вихідного конденсатора, розташований на частоті:

$$f_{z(ESR)} = \frac{1}{2\pi \cdot ESR \cdot C_{OUT}}$$
(2.13)

Додатковий третій полюс, утворений компенсаційним конденсатором (C6) та резистором (R3), використовується для компенсації впливу ESR-нуля на коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку (loop gain). Цей полюс розташований на частоті:

$$f_{p3} = \frac{1}{2\pi \cdot C_6 \cdot R_3}$$
(2.14)

Метою компенсації є формування передавальної функції конвертера, щоб отримати бажане підсилення в петлі зворотного зв'язку (loop gain).

Занижені частоти перетину призводять до повільнішої реакції на зміну вхідної напруги або навантаження. Завищені частоти перетину можуть призвести до нестабільності системи.

1. Вибір резистора компенсації (R_3) для встановлення бажаної частоти перетину:

$$R_3 = \frac{2\pi \cdot C_2 \cdot f_c}{G_{EA} \cdot G_{CS}} \cdot \frac{V_{OUT}}{V_{FB}} = \frac{2\pi \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^4 \cdot 3.3}{60 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 0.8} = \frac{22.8}{4.32 \cdot 10^{-5}} = 52.8 \text{ кОм}, \quad (2.15)$$

$$\text{де } f_c = \frac{f_s}{10} = 50 \text{ кГц}.$$

Вибір компенсаційного конденсатора (C_3) для досягнення бажаного запасу фази (phase margin): Для типової індуктивності, встановлення нуля компенсації f_{z1} нижче ніж $1/4$ від f_c забезпечує достатній запас фази:

$$C_3 > \frac{4}{2\pi \cdot R_3 \cdot f_c} \quad (2.16)$$

$$C_3 > \frac{4}{2\pi \cdot 52800 \cdot 5 \cdot 10^4}$$

$$C_3 > 2.41 \text{ нФ} \quad (2.17)$$

відповідно $C_3 = 2.4 \text{ нФ}$.

C_6 необхідний, якщо ESR-нуль конденсатора розташований нижче половини частоти перемикування, або:

$$\frac{1}{2\pi \cdot R_{ESR} \cdot C_2} < \frac{f_c}{2} \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot 0.02 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} < 250000.$$

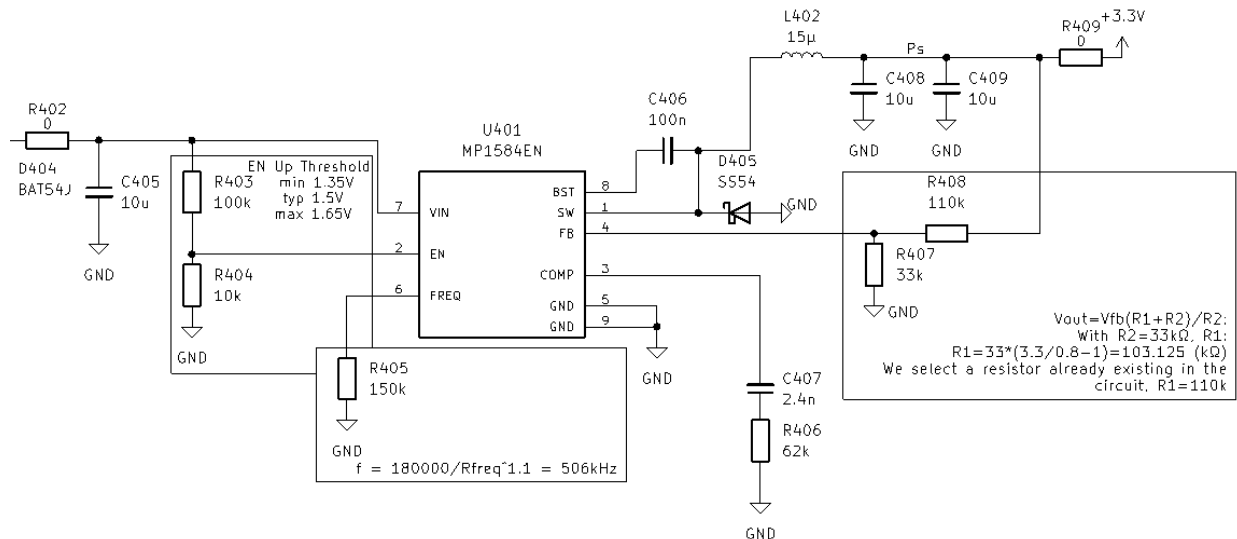


Рисунок 2.6 – Схема перетворювача на базі MP1584

2.4 Звотноходовий DC/DC перетворювач (Flyback)

Коли потрібна одна або кілька ізолюваних, а також стабілізованих вихідних напруг, зворотноходовий перетворювач (Flyback) часто є найкращим вибором для потужностей до приблизно 150 Вт. Це зумовлено головним чином тим, що він вимагає відносно невеликої кількості компонентів, що мінімізує витрати та вимоги до монтажного простору [34, 35].

Оскільки ця топологія є ізолюваною, слід також очікувати зростання синфазного струму на частотах, вищих за частоту перемикавання. Це значною мірою спричинено паразитною ємністю зв'язку трансформатора між первинною та вторинною сторонами. Через високу швидкість зміни напруги первинного комутаційного вузла (так званого «гарячого вузла»), через цю ємність зв'язку на вторинну сторону накладається діелектричний струм зміщення, який потім протікає через заземлення до первинної сторони, а під час вимірювання напруги перешкод за допомогою EMC — через еквівалент мережі стабілізації імпедансу. Струми спільного режиму також генеруються, коли використовується зовнішній MOSFET, змонтований на тепловідводі чи іншій металевій поверхні. У цьому випадку між MOSFET і тепловідводом

виникає паразитна ємність, через яку також проявляється діелектричний струм зміщення.

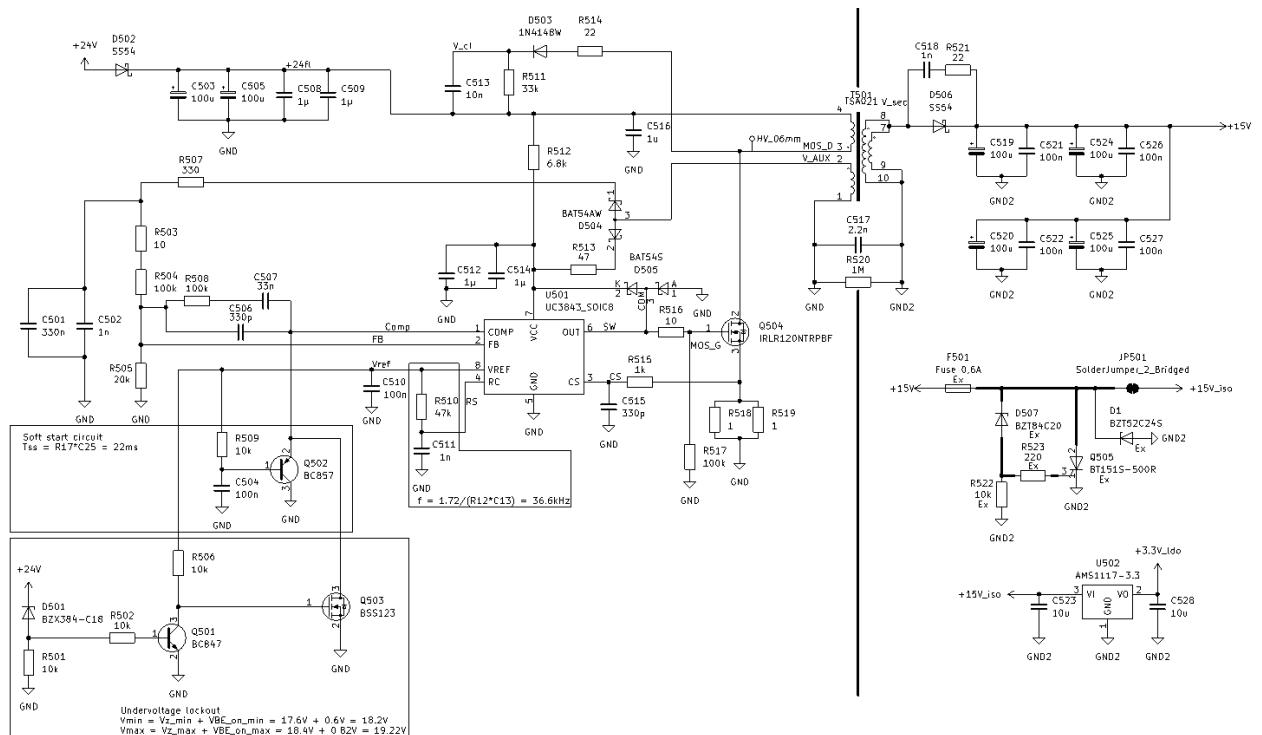


Рисунок 2.7 – Схема зворотноходового перетворювача

Даний перетворювач дозволяє отримати гальванічно ізольоване і стабілізоване джерело напруги $U_{out}=15(V)$, максимальний $I_{out}=0.5(A)$ при вхідній напрузі $U_{in}=24\pm 20\% (V)$.

Вибір мікросхеми – контролера U_{501} (UC3843) [36] та трансформатора T_{501} (TMS521) [37] обумовлений наявністю зазначених компонентів у виробничій базі JLPCSB [38].

Керуючий контролер U_{501} реалізує два контури регулювання: внутрішній контур обмеження струму первинної обмотки (пікове керування струмом – peak current-mode control) та зовнішній контур стабілізації вихідної напруги, який формується з використанням елементів, підключених до виводів COMP (1) та FB (2).

Зворотний зв'язок за струмом первинної обмотки здійснюється через шунтуючий резисторний дільник, сигнал з якого додатково фільтрується RC-ланкою. Зворотний зв'язок за вихідною напругою реалізується за допомогою додаткової обмотки трансформатора.

Величина вихідної напруги задається напругою на дільнику R_{504} , R_{507} , а її частотні характеристики та динамічна стабілізація – комбінацією елементів R_{504} , R_{507} , C_{507} , C_{506} .

Частота комутації силового ключа визначається параметрами зовнішньої RC-ланки R_{510} , C_{511} . Перетворювач функціонує в режимі переривчастих струмів (DCM – Discontinuous Conduction Mode) [39].

Функція м'якого запуску (soft start) реалізована за допомогою елементів R_{509} , C_{504} та транзистора Q_{502} , при цьому час запуску визначається сталою часу $T_{ss} = R_{509} \cdot C_{504}$.

Схема також має механізм затримки ввімкнення при недостатній вхідній напрузі. Порогове значення визначається сумарною дією стабілітрона D_{501} та напруги відкриття база-емітер транзистора Q_{501} . Якщо вхідна напруга нижча за порогову, транзистор утримує низький рівень на виводі COMP (1), що блокує роботу головного силового ключа.

Для захисту силового ключа від перенапруг, спричинених паразитною індуктивністю розсіювання трансформатора L_σ , у схемі передбачено RCD-клампер. Додатково, резистор включений послідовно з діодом, виконує функцію демпфера високочастотних коливань, які виникають внаслідок взаємодії між L_σ та паразитними ємностями.

2.5 Розрахунок параметрів схеми зворотноходового DC/DC перетворювача

Таблиця 2.2 – Вихідні дані схеми

Параметр	Позначення	Значення
Мінімальна вхідна напруга	$U_{in\ min}$	19.2 (В)
Максимальна вхідна напруга	$U_{in\ max}$	28.8 (В)
Вихідна напруга	U_{out}	15 (В)
Пульсації вихідної напруги	$U_{out\ pp}$	5% (0.75) (В)
Максимальне динамічне відхилення	ΔU_{out}	10% (1.5) (В)
Максимальний вихідний струм	$I_{out\ max}$	0.5 (А)
Очікуваний коефіцієнт корисної дії	η	80 %
Коефіцієнт трансформації	n	2
Індуктивність намагнічування	L_m	127 (мкГн)
Індуктивність розсіювання	L_{σ}	0.65 (мкГн)

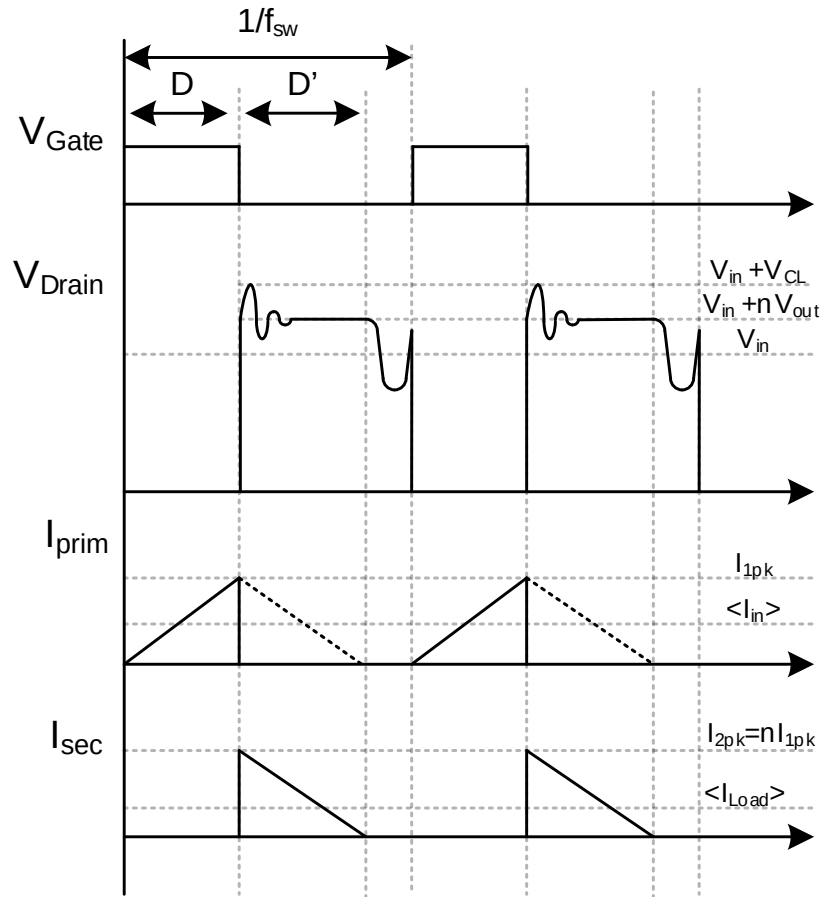


Рисунок 2.8 – Часові діаграми зворотноходового DC/DC перетворювача (режим DCM)

Максимальне значення робочого циклу, враховуючи очікуване падіння напруги на вихідному діоді $V_D = 0.5(V)$:

$$D_{\max} = \frac{n \cdot (U_{\text{out}} + V_D)}{U_{\text{in min}} + n \cdot (U_{\text{out}} + V_D)} = \frac{2 \cdot (15 + 0.5)}{19.2 + 2 \cdot (15 + 0.5)} = 0.618. \quad (2.19)$$

Усереднені, пікові і діючі значення струмів, параметри шунта. Максимальне значення усередненого вхідного струму перетворювача знаходиться з умови $P_{\text{out}} = \eta \cdot P_{\text{in}}$:

$$\langle I_{\text{in}} \rangle = \frac{U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out max}}}{\eta \cdot U_{\text{in min}}} = \frac{15 \cdot 0.5}{0.8 \cdot 19.2} = 0.488(\text{A}). \quad (2.20)$$

Пікове значення первинного струму трансформатора знаходиться з перехідного процесу струму з умови $\langle I_{in} \rangle = \frac{I_{1pk}}{2} \cdot D_{max}$:

$$I_{1pk}^* = \frac{2 \cdot \langle I_{in} \rangle}{D_{max}} = \frac{2 \cdot 0.488}{0.618} = 1.579(A). \quad (2.21)$$

Опір шунта знаходиться з умови:

$$R_{cs}^* = \frac{V_{sense\ max}}{I_{1pk}^*} = \frac{1}{1.579} = 0.633(Ом), \quad (2.22)$$

зі стандартного ряду опорів обираємо $R_{518} = R_{519} = 1\Omega \rightarrow R_{cs} = 500(мОм)$.

Перераховане пікове значення первинного струму трансформатора:

$$I_{1pk} = 2(A). \quad (2.23)$$

Діюче значення первинного струму трансформатора [40]:

$$I_{1RMS} = I_{1pk} \sqrt{\frac{D_{max}}{3}} = 0.908(A). \quad (2.24)$$

Перераховане пікове значення вторинного струму трансформатора:

$$I_{2pk} = n \cdot I_{1pk} = 4(A). \quad (2.25)$$

Діюче значення вторинного струму трансформатора:

$$I_{2RMS} = I_{2pk} \sqrt{\frac{(1 - D_{max})}{3}} = 1.427(A). \quad (2.26)$$

Загальні втрати в шунті:

$$P_{cs} = I_{1RMS}^2 \cdot R_{cs} = 0.908^2 \cdot 0.5 = 412 \text{ (мВт)}. \quad (2.27)$$

Таким чином, обираємо типорозмір шунтів 1206, кожен з яких має максимальну розсіювану потужність 250 (мВт).

Частота комутації знаходиться з умови, що вся енергія, збережена в магнітній системі за такт, передається на навантаження. З умови:

$$\frac{L_m \cdot I_{1pk}^2}{2} \cdot f_{sw}^* = \frac{U_{out} \cdot I_{out max}}{\eta}; \quad (2.28)$$

$$f_{sw}^* \leq \frac{2 \cdot U_{out} \cdot I_{out max}}{\eta \cdot L_m \cdot I_{1pk}^2} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 0.5}{0.8 \cdot 127 \cdot 10^{-6} \cdot 2^2} = 36.9 \text{ (кГц)}.$$

З даташиту UC3843 [36]:

$$f_{sw} = \frac{1.72}{R_{510} \cdot C_{511}}. \quad (2.29)$$

Зі стандартного ряду і рекомендацій виробника обираємо $C_{511} = 1 \text{ (нФ)}$,

$$R_{510} = \frac{1.72}{f_{sw} \cdot C_{511}} = 46.6 \text{ (кОм)} \rightarrow 47 \text{ (кОм)}. \quad (2.30)$$

Перераховане значення частоти комутації:

$$f_{sw} = \frac{1.72}{R_{510} \cdot C_{511}} = \frac{1.72}{47 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 36.6 \text{ (кГц)}. \quad (2.31)$$

Фільтр струмового сигналу. RC-фільтр для зворотного зв'язку за струмом обирається з умови $1 / (2\pi \cdot R_{515} \cdot C_{515}) \gg f_{sw}$. Приймаючи $R_{515} = 1(\text{кОм})$ і різницю в частотах в 1 декаду:

$$C_{22} \leq \frac{1}{2\pi \cdot R_{515} \cdot 10 \cdot f_{sw}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1(\text{кОм}) \cdot 10 \cdot 36.6(\text{кГц})} = 435(\text{пФ}) \rightarrow 330(\text{пФ}). \quad (2.32)$$

Вихідна ємність згідно даташиту UC3843 [36], знаходиться з умови обмеження пульсації вихідної напруги. Прийmemo, що пульсації вихідної напруги, викликані перезарядкою ємності $\Delta V_{ch} = 0.2\% U_{out}$:

$$C_{out}^* = \frac{I_{out\max} \cdot D_{\max}}{0.002 \cdot U_{out} \cdot f_{sw}} = \frac{0.5 \cdot 0.618}{0.002 \cdot 15 \cdot 36.6 \cdot 10^3} = 281(\text{мкФ}). \quad (2.33)$$

З іншої сторони, пульсації напруги, викликані наявністю паразитного опору конденсатора ESR:

$$U_{out\text{pp}} \approx I_{2pk} \cdot ESR^* \quad (2.34)$$

Так, щоб тримати пульсації вихідної напруги в заданих рамках:

$$ESR^* < \frac{U_{out\text{pp}}}{I_{2pk}} = \frac{0.750}{4} = 187.5(\text{мОм}). \quad (2.35)$$

Враховуючи зазначені вище вимоги, а також 20% варіацію ємності, в якості вихідної ємності обираємо 4 паралельно підключені 100 мкФ 35 В конденсатори $ESR = 340 \text{ мОм}$ при 100 кГц [41, 42].

Результуюча ємність матиме наступні параметри:

$$C_{out} = 400(\mu\text{кФ}), ESR_{out} = 85(\text{мОм}). \quad (2.36)$$

Діюче значення струму конденсатора:

$$I_{CoutRMS} = \sqrt{I_{2RMS}^2 - I_{out\max}^2} = \sqrt{1.427^2 - 0.5^2} = 1.337(\text{А}). \quad (2.37)$$

Загальні втрати у вихідній ємності:

$$P_{Cout} = I_{CoutRMS}^2 \cdot ESR_{out} = 152(\text{мВт}). \quad (2.38)$$

Для зниження стресу на електролітичні конденсатори, а також для покращення електромагнітної сумісності, паралельно кожному з них підключаються керамічні конденсатори. Обираємо 100 (нФ) 25 (В) керамічні конденсатори типорозміру 0603.

Діюче значення струму через діод:

$$I_{D1RMS} = I_{2RMS} = 1.427(\text{А}). \quad (2.39)$$

Пікове значення струму через діод:

$$I_{D1pk} = I_{2pk} = 4(\text{А}). \quad (2.40)$$

Максимальна зворотна напруга на діоді:

$$U_{D13B}^* = \frac{U_{in\max}}{n} + U_{out} = \frac{28.8}{2} + 15 = 29.4(\text{В}). \quad (2.41)$$

Обираємо діод SSL36 [43] з максимальною зворотною напругою $U_{D1зв\max}=60(\text{В})$, максимальним середнім значенням струму $I_{D1с\text{ер}\max}=3(\text{А})$, максимальним прямим падінням напруги $U_{D1прям\max}=0.5(\text{В})$, типовим значенням температурного імпедансу $R_{\theta J-A}=75^{\circ}\text{C/W}$, максимальною температурою напівпровідника $T_{J\max}=125^{\circ}\text{C}$.

Максимальна розсіювана потужність на діоді:

$$P_{D1} = U_{D1прям\max} \cdot I_{D1RMS} = 0.5 \cdot 1.427 = 0.714(\text{Вт}). \quad (2.42)$$

Максимальна допустима розсіювана потужність за умови максимальної температури оточуючого середовища $T_{amb\max}=55^{\circ}\text{C}$:

$$P_{D1\text{доп}} = \frac{T_{J\max} - T_{amb\max}}{R_{\theta J-A}} = \frac{125 - 55}{75} = 0.933(\text{Вт}). \quad (2.43)$$

Паралельно з діодом D_{503} підключається RC для пригнічення високочастотних коливань, викликаних взаємодією індуктивністю розсіювання вторинної обмотки трансформатора і паразитною ємністю діода Шотткі. Обираємо $R_{514} = 22 (\text{Ом})$, $C_{513} = 1 (\text{нФ})$.

R_{514} , C_{513} , D_{503} утворюють RCD клампер. При достатньо великому значенні C_{513} , напруга клампера $U_{\text{кл}} \approx \text{const}$.

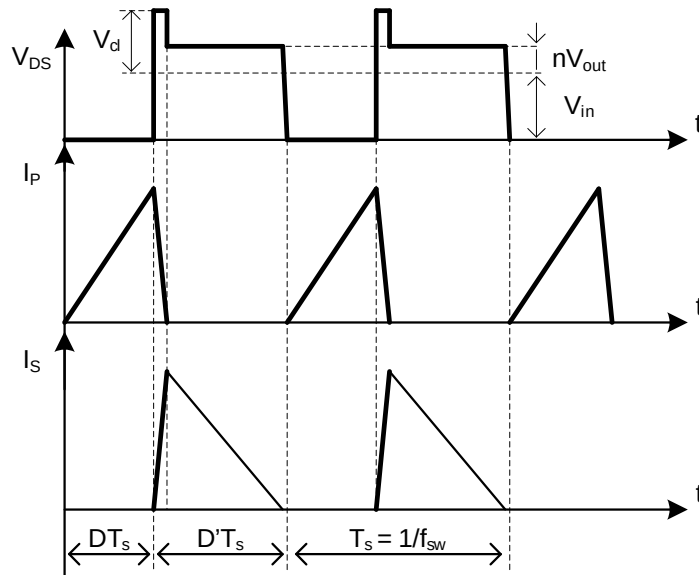


Рисунок 2.9 – Часові діаграми конвертера

Занизька напруга призводить до збільшених втрат на клампері, в той час, як завищена призводить до збільшення комутаційних втрат на силовому транзисторі і погіршення ЕМС. Потужність що розсіюється на клампері визначається як [44]:

$$P_{\text{кл}} = \frac{1}{2} \cdot L_{\sigma} \cdot I_{\text{лпк}}^2 \cdot f_{\text{sw}} \cdot \frac{U_{\text{кл}}}{U_{\text{кл}} - n \cdot U_{\text{out}}}. \quad (2.44)$$

Як видно з рівняння і рисунку 2.10, залежність між потужністю розсіювання і напругою клампера $U_{\text{кл}}$ є нелінійною. В даному випадку ми обираємо $U_{\text{кл}}^* = 2 \cdot n \cdot U_{\text{out}} = 60(\text{В})$, оскільки подальше збільшення напруги не призводить до суттєвого зменшення розсіюваної потужності.

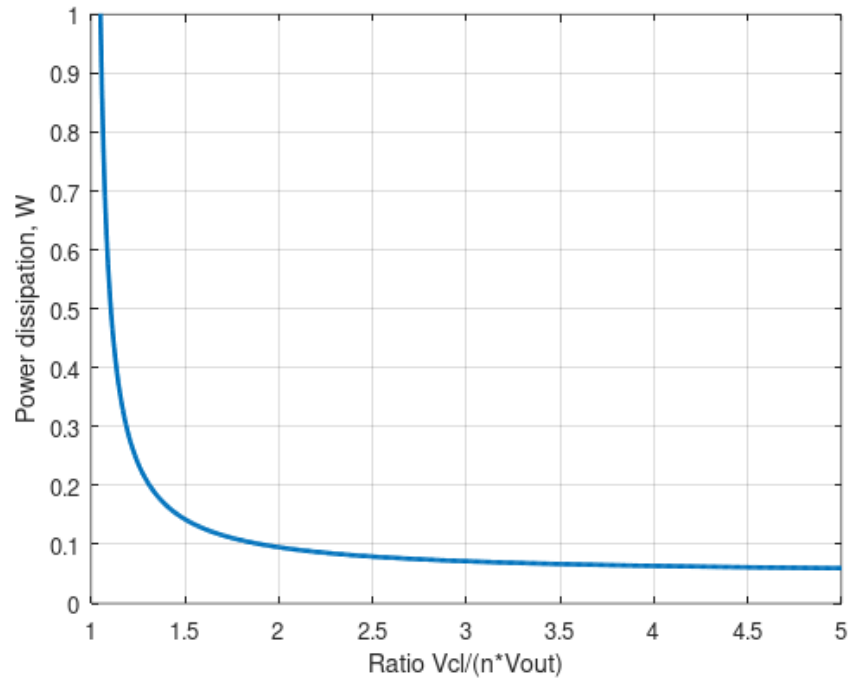


Рисунок 2.10 – Залежність потужності розсіювання на RCD-клампері від напруги клампера

$$P_{\text{кл}}^* = \frac{1}{2} \cdot L_{\sigma} \cdot I_{\text{лпк}}^2 \cdot f_{\text{sw}} \cdot \frac{U_{\text{кл}}^*}{U_{\text{кл}}^* - n \cdot U_{\text{out}}} = 0.095(\text{Вт}),$$

$$R_{\text{кл}}^* = \frac{(U_{\text{кл}}^*)^2}{P_{\text{кл}}^*} = \frac{60^2}{0.095} = 37831(\text{Ом}).$$
(2.45)

Зі стандартного ряду опорів обираємо $R_{511} = R_{\text{кл}} = 33(\text{кОм})$ типорозміру 1206, здатний розсіяти до 250 (мВт). Ємність C_{513} розраховується з умови, що пульсації напруги на клампері $\Delta U_{\text{кл}} < 10\% U_{\text{кл}}$ або

$$\Delta U_{\text{кл}} = \frac{U_{\text{кл}}}{R_{\text{кл}} \cdot C_{\text{кл}}^* \cdot f_{\text{sw}}},$$
(2.46)

з чого отримуємо:

$$C_{\text{кл}}^* > \frac{1}{\frac{\Delta U_{\text{кл}}}{U_{\text{кл}}} \cdot R_{\text{кл}} \cdot f_{\text{sw}}} = 7(\text{нФ}).$$
(2.47)

Обираємо $C_{513} = 10(\text{нФ})$ з номінальною напругою 100 (В). Перераховане значення напруги і потужності клампера:

$$U_{\text{кл}} = \frac{n \cdot U_{\text{out}} + \sqrt{(n \cdot U_{\text{out}})^2 + 2 \cdot R_{\text{кл}} \cdot L_{\sigma} \cdot I_{\text{лпк}}^2 \cdot f_{\text{sw}}}}{2} = 57.4(\text{В}),$$

$$P_{\text{кл}} = \frac{1}{2} \cdot L_{\sigma} \cdot I_{\text{лпк}}^2 \cdot f_{\text{sw}} \cdot \frac{U_{\text{кл}}}{U_{\text{кл}} - n \cdot U_{\text{out}}} = 0.100(\text{Вт}).$$
(2.48)

Варто зазначити, що фактична напруга на клампері буде нижчою, оскільки дані формули отримані з припущенням, що потужність розсіюється лише в клампері. В реальності ж частина потужності буде розсіюватись на первинній обмотці, силовому транзисторі і тд.

Параметри діода D_{503} розраховуються наступним чином:

— максимальна зворотня напруга:

$$U_{D43B}^* = U_{\text{вх макс}} + U_{\text{кл}} = 28,8 + 57,4 = 86,2(\text{В});$$
(2.49)

— середнє за період значення струму через діод визначається з умови, що він дорівнює середньому струму розряду кламперного кола:

$$I_{D4 \text{ сеп}} = \frac{P_{\text{кл}}}{U_{\text{кл}}} \approx 1,7(\text{мА});$$
(2.50)

— пікове значення струму через діод:

$$I_{D4\text{пк}} = I_{\text{лпк}} = 2(\text{А});$$
(2.51)

Діюче значення струму через діод обчислюється, знаючи середнє і пікове значення:

$$I_{D4RMS} = I_{D4pk} \sqrt{\frac{2I_{D4\text{ сep}}}{3I_{D4pk}}} = 48,2(\text{мА}). \quad (2.52)$$

Обираємо діод 1N4148W [45] з максимальною зворотною напругою $U_{D4зв\text{ макс}} = 100(\text{В})$, максимальним середнім значення струму $I_{D4\text{ сep макс}} = 150(\text{мА})$, максимальним піковим значення струму $I_{D4\text{ пік}} = 2(\text{А})$, прямим падінням напруги $U_{D4\text{ прям макс}} = 1(\text{В})$, типовим значенням температурного імпедансу $R_{\theta J-A} = 315^{\circ}\text{C} / \text{W}$, максимальною температурою напівпровідника $T_{J\text{ макс}} = 150^{\circ}\text{C}$.

Максимальна розсіювана потужність на діоді:

$$P_{D4} = U_{D4\text{ прям макс}} \cdot I_{D4RMS} = 48(\text{мВт}). \quad (2.53)$$

Максимальна допустима розсіювана потужність за умови максимальної температури оточуючого середовища $T_{\text{amb макс}} = 55^{\circ}\text{C}$:

$$P_{D4\text{ доп}} = \frac{T_{J\text{ макс}} - T_{\text{amb}}}{R_{\theta J-A}} = \frac{150 - 55}{315} = 0.3(\text{Вт}). \quad (2.54)$$

Основний силовий транзистор. Діюче значення струму через транзистор:

$$I_{Q3RMS} = I_{1RMS} = 0.908(\text{А}). \quad (2.55)$$

Пікове значення струму через діод:

$$I_{Q3pk} = I_{1pk} = 2 \text{ (A)}. \quad (2.56)$$

Максимальна напруга стік-витік:

$$U_{Q3DS \max} = U_{vx \max} + U_{кл \max} = 86,2 \text{ (В)}. \quad (2.57)$$

Обираємо транзистор IRLR120NTRPBF [46, 47] з максимальною зворотною напругою $U_{Q3DS \max}^* = 100 \text{ (В)}$, максимальним значенням постійного струму $I_{D4\text{пост}} = 10 \text{ (А)}$, максимальним опором каналу $R_{Q3 DSon} = 260 \text{ (мОм)}$, вихідною ємністю $C_{Q3 OSS} = 50 \text{ (пФ)}$, типовим значенням температурного імпедансу $R_{\theta J-A} = 125^\circ\text{C/W}$, максимальною температурою напівпровідника $T_{J\max} = 175^\circ\text{C}$.

Втрати на провідність:

$$P_{Q3 \text{ cond}} = I_{Q3RMS}^2 \cdot R_{Q3 DSon} = 132 \text{ (мВт)}. \quad (2.58)$$

Втрати на комутацію:

$$P_{Q3 \text{ sw}} = \frac{1}{2} \cdot f_{sw} \cdot C_{Q3 OSS} \cdot U_{Q3DS \max}^2 = 16 \text{ (мВт)}. \quad (2.59)$$

Нехтуючи втратами за затворі, максимальна розсіювана потужність на транзисторі:

$$P_{Q3} = P_{Q3 \text{ cond}} + P_{Q3 \text{ sw}} = 148 \text{ (мВт)}. \quad (2.60)$$

Максимальна допустима розсіювана потужність за умови максимальної температури оточуючого середовища $T_{amb\ max} = 55^{\circ}\text{C}$:

$$P_{D4\ \text{доп}} = \frac{T_{J\max} - T_{amb}}{R_{\theta J-A}} = \frac{150 - 55}{125} = 0.76\ (\text{Вт}). \quad (2.61)$$

Вхідна ємність слугує як буфер енергії в безпосередній близькості від перетворювача і таким чином нівелює паразитну індуктивність провідників між перетворювачем і основним джерелом живлення. Також, високочастотні конденсатори, розміщені на мінімальній відстані від трансформатора покращують ЕМС.

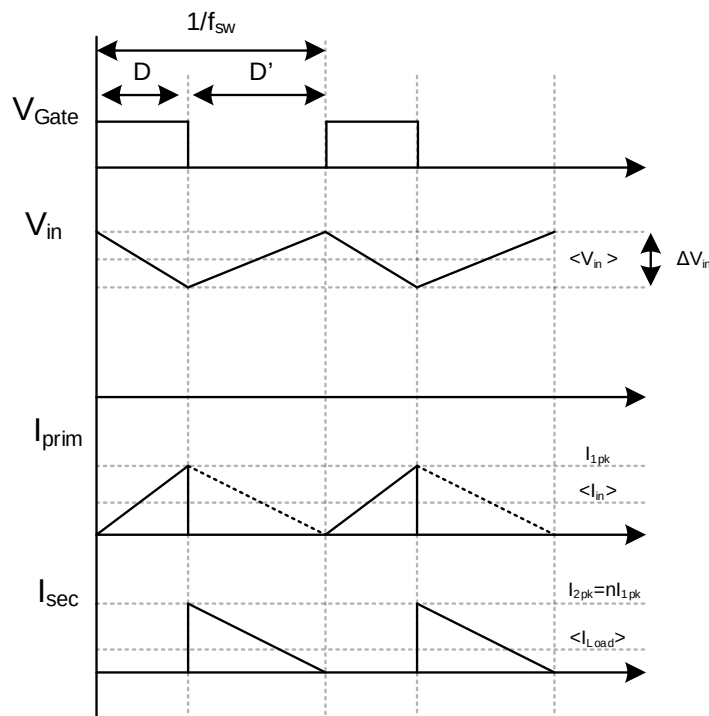


Рисунок 2.11 – Часові діаграми Flyback-конвертера (режим DCM)

Струм під час фази D знаходиться за умови, що вся енергія, запасена на конденсаторі, за винятком втрат передається на вторинну частину:

$$I_{CIN\ D} = \frac{U_{out} I_{out\ max}}{\eta U_{in\ min}} = \langle I_{in} \rangle. \quad (2.62)$$

Струм під час фази D' знаходиться за умови, що він повністю йде на перезарядку вхідної ємності:

$$I_{\text{CIN D}'} = C_{\text{in}}^* \frac{\Delta U_{\text{in}}}{\Delta t} = C_{\text{in}}^* \frac{\Delta U_{\text{in}}}{(1-D)} f_{\text{sw}}. \quad (2.63)$$

З умови балансу заряду і задаючи $\Delta U_{\text{BX}} < 250(\text{мВ})$,

$$\begin{aligned} I_{\text{CIN D}} &= I_{\text{CIN D}'}, \\ \frac{U_{\text{out}} \cdot I_{\text{out max}}}{\eta \cdot U_{\text{in min}}} &= C_{\text{in}}^* \frac{\Delta U_{\text{out}}}{(1-D_{\text{max}})} f_{\text{sw}}, \\ C_{\text{in}}^* &> \frac{U_{\text{out}} I_{\text{out max}}}{\eta U_{\text{in min}}} \cdot \frac{(1-D_{\text{max}})}{\Delta U_{\text{out}} f_{\text{sw}}} = 20.4(\text{мкФ}). \end{aligned} \quad (2.64)$$

Значення діючого струму через вхідну ємність визначаємо як:

$$I_{\text{CIN RMS}} = \sqrt{I_{\text{IRMS}}^2 - (\langle I_{\text{BX}} \rangle)^2} = \sqrt{0.908^2 - 0.488^2} = 0.766(\text{А}). \quad (2.65)$$

Послідовний опір визначається з умови

$$\text{ESR}_{\text{in}}^* < \frac{\Delta U_{\text{in}}}{I_{\text{1pk}}} = \frac{0.25}{2} = 125(\text{мОм}). \quad (2.66)$$

Задля уніфікації компонентів обираємо в якості вхідної ємності 2 паралельно підключені 100 мкФ 35 В конденсатори C_{503} , C_{505} з $\text{ESR} = 340 \text{ мОм}$ при 100 кГц і паралельної їм підключаємо 2 керамічні конденсатори 50V 1μF [48] і ще один максимально близько до трансформатора і силового транзистора (C_{516}).

2.6 Зворотний зв'язок і компенсація схеми зворотноходового DC/DC перетворювача

Розглянемо спрощену функціональну схему, наведену на рис. 2.12.

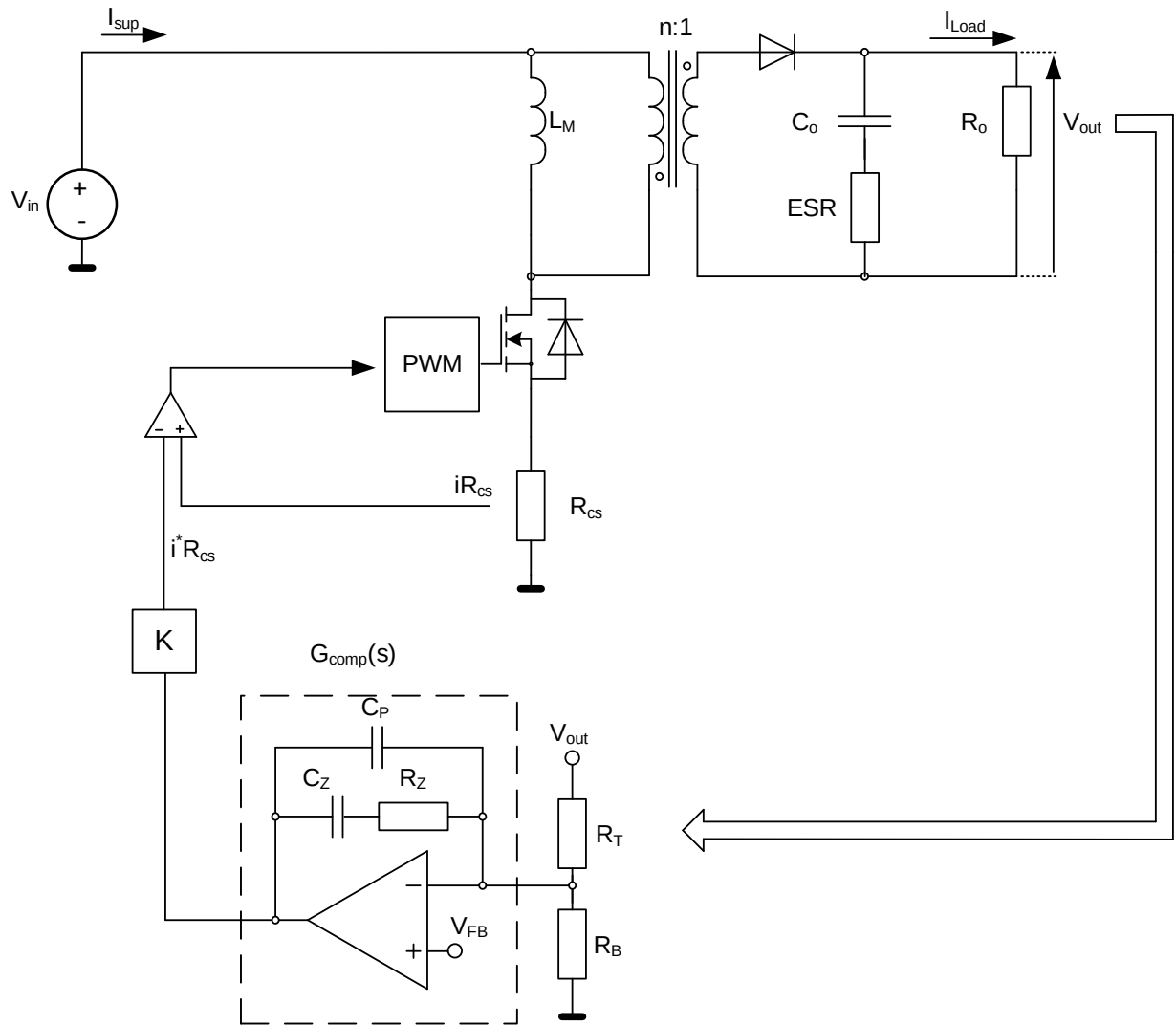


Рисунок 2.12 – Спрощена функціональна схема

Зворотний зв'язок за напругою реалізовано через додаткову обмотку трансформатора T_1 .

Стале значення вихідної напруги визначається через дільник R_{504}, R_{505} .

$$\frac{R_{504}}{R_{505}} = \frac{U_{out}^*}{V_{FB}} - 1 = 5. \quad (2.67)$$

Зі стандартного ряду обираємо $R_{504} = 100\text{k}$, $R_{505} = 20\text{k}$.

Передатна функція об'єкту керування [40]:

$$G_{vc}(s) = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{i}_1(s)} = nR_0 \frac{(1 + s ESR_{out} C_{out})}{\left(1 + s \frac{R_o C_{out}}{2}\right)}, \quad (2.68)$$

де

$$R_o = \frac{U_{out}^*}{I_{out\ max}} = \frac{15}{0,5} = 30(\text{Ом}). \quad (2.69)$$

Передатна функція контуру керування струмом, нехтуючи динамікою струму в режимі DCM при піковому керуванні:

$$G_{dvc}(s) = \frac{\tilde{i}_1(s)}{\tilde{v}_c(s)} = K \frac{1}{R_{cs}} \quad (2.70)$$

де $K = 1/3$ – конструктивна особливість мікросхеми U1.

Передатна функція розімкнутої системи запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{R_B}{R_T + R_B} G_{comp}(s) G_{dvc}(s) G_{vc}(s) = \\ &= \frac{R_B}{R_T + R_B} G_{comp}(s) K \frac{1}{R_{cs}} nR_0 \frac{(1 + s ESR_{out} C_{out})}{\left(1 + s \frac{R_o C_{out}}{2}\right)} = \\ &= G_{comp}(s) T_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z0}}}{1 + \frac{s}{\omega_{p0}}} \end{aligned} \quad (2.71)$$

де

$$T_0 = \frac{R_B}{R_T + R_B} K \frac{1}{R_{cs}} n R_0 = 6.67,$$

$$\omega_{z0} = \frac{1}{ESR_{вих} C_{вих}} = 29412 (\text{рад} / \text{с}) \rightarrow f_{z0} = \frac{\omega_{z0}}{2\pi} = 4683 (\text{Гц}), \quad (2.72)$$

$$\omega_{p0} = \frac{2}{R_0 C_{вих}} = 166.7 (\text{рад} / \text{с}) \rightarrow f_{p0} = \frac{\omega_{p0}}{2\pi} = 26.5 (\text{Гц}).$$

Бажану частоту зрізу системи ω_0^* визначимо з максимального динамічного відхилення $\Delta U_{out} = 10\% = 1,5$ (В) при стрибкоподібній зміні струму навантаження від 0 до номінального з урахуванням 20% відхилення ємності:

$$\Delta U_{out} = \frac{I_{out \max}}{\omega_0^* \cdot C_{out \min}} \rightarrow \omega_0^* = \frac{I_{out \max}}{\Delta U_{out} (0.8 \cdot C_{out})} = 1042 (\text{рад} / \text{с}) \quad (2.73)$$

$$f_0^* = \frac{\omega_0^*}{2\pi} = 166 (\text{Гц}).$$

За відсутності компенсації, ЛАФЧХ розімкненої системи буде виглядати наступним чином:

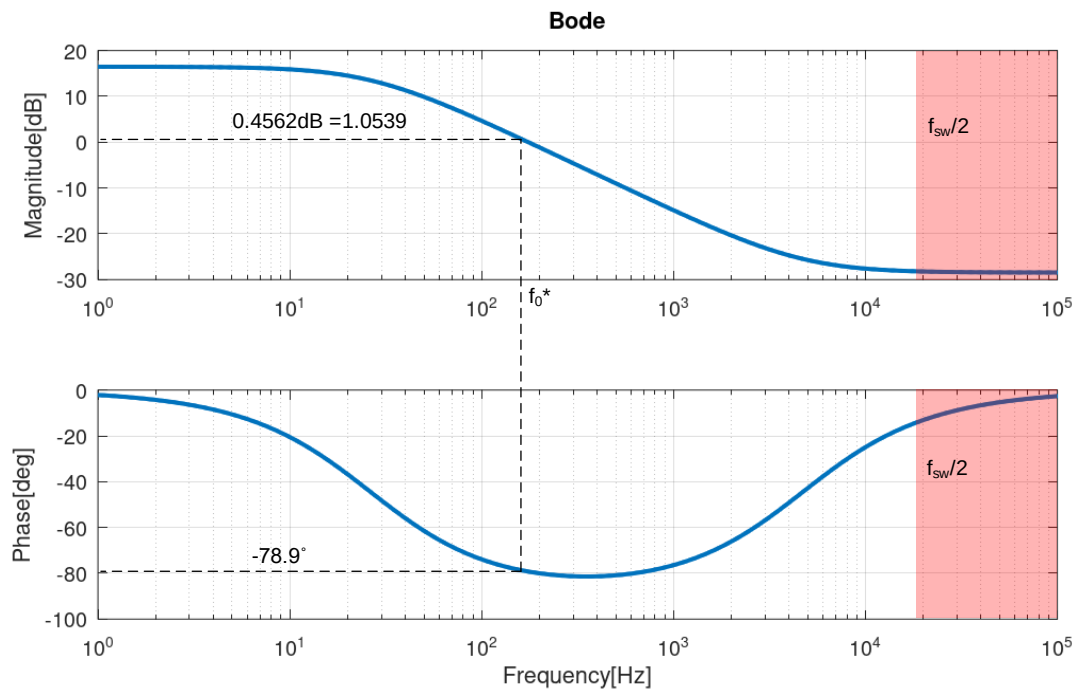


Рисунок 2.13 – ЛАФЧХ розімкненої системи

Обираємо компенсатор з наступною ПФ:

$$G_{\text{comp}}(s) = G_m \frac{1 + \frac{\omega_{zc}}{s}}{1 + \frac{s}{\omega_{pc}}}, \quad (2.74)$$

де

$$G_m = \frac{R_z}{R_T}, \quad \omega_{zc} = \frac{1}{R_z C_z}, \quad \omega_{pc} = \frac{1}{R_z C_p}. \quad (2.75)$$

Передатна функція розімкненої системи з компенсатором:

$$T(s) = G_m \frac{1 + \frac{\omega_{zc}}{s}}{1 + \frac{s}{\omega_{pc}}} T_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_{z0}}}{1 + \frac{s}{\omega_{p0}}}. \quad (2.76)$$

Обираючи $\omega_{zc} < \omega_0^* < \omega_{pc}$ і враховуючи, що $\omega_{p0} < \omega_0^* < \omega_{z0}$, передатна функція $T(s)$ може бути спрощена при $\omega \rightarrow \omega_0^*$.

$$T(s) \approx G_m T_0 \frac{\omega_{p0}}{s}. \quad (2.77)$$

З чого за умови $|T(j\omega_0^*)| = 1$, отримуємо:

$$G_m = \frac{\omega_0^*}{T_0 \omega_{p0}} = 0.938. \quad (2.78)$$

Обираємо $R_Z = R_t \rightarrow R_{11} = 100 \text{ k}$. Для компенсації нуля в передатній функції $G_{vc}(s)$ приймаємо:

$$\begin{aligned}\omega_{PC} = \omega_{Z0} &\rightarrow \frac{1}{R_Z C_P} = \frac{1}{ESR_{out} C_{out}}, \\ C_P &= \frac{ESR_{out} C_{out}}{R_Z} = 340 (\text{пФ}).\end{aligned}\quad (2.79)$$

Зі стандартного ряду обираємо $C_P = C_{11} = 330 (\text{пФ})$.

Нуль компенсатора ω_{ZC} розраховується з умови достатнього запасу по фазі:

$$\Delta\varphi_m = 90^\circ - \arctg\left(\frac{\omega_{ZC}}{\omega_0^*}\right) > 45^\circ. \quad (2.80)$$

Для прийнятної якості перехідного процесу приймаємо $\Delta\varphi_m^* = 65^\circ$ [40], з чого отримуємо:

$$\begin{aligned}\omega_{ZC}^* = \omega_0^* \operatorname{tg}(90^\circ - \Delta\varphi_m^*) &= 486 (\text{рад / с}) \rightarrow f_{ZC}^* = \frac{\omega_{ZC}^*}{2\pi} = 77.4 (\text{Гц}), \\ C_Z^* &= \frac{1}{\omega_{ZC}^* R_Z} = 20.6 (\text{нФ}).\end{aligned}\quad (2.81)$$

Зі стандартного ряду обираємо $C_Z = C_{507} = 22 (\text{нФ})$.

ЛАФЧХ компенсаційної ланки зображено на рисунку 2.14.

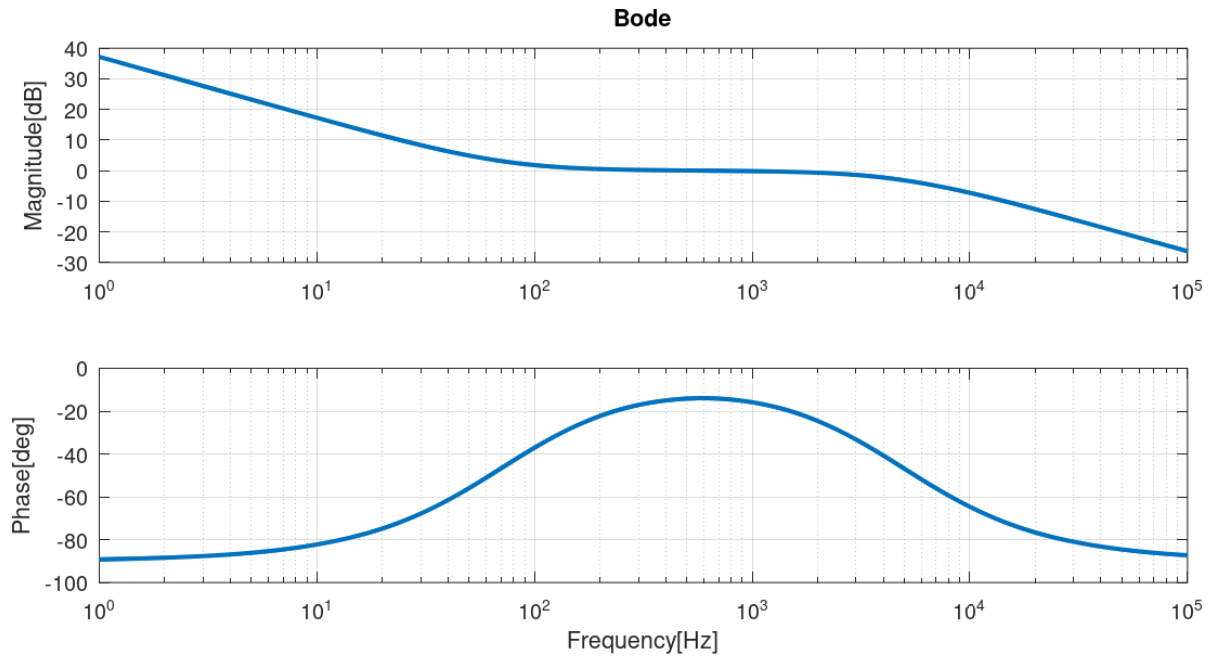


Рисунок 2.14 – ЛАФЧХ компенсаційної ланки

Теоретично розрахована ЛАФЧХ розімкненої системи зображено на рисунку 2.15.

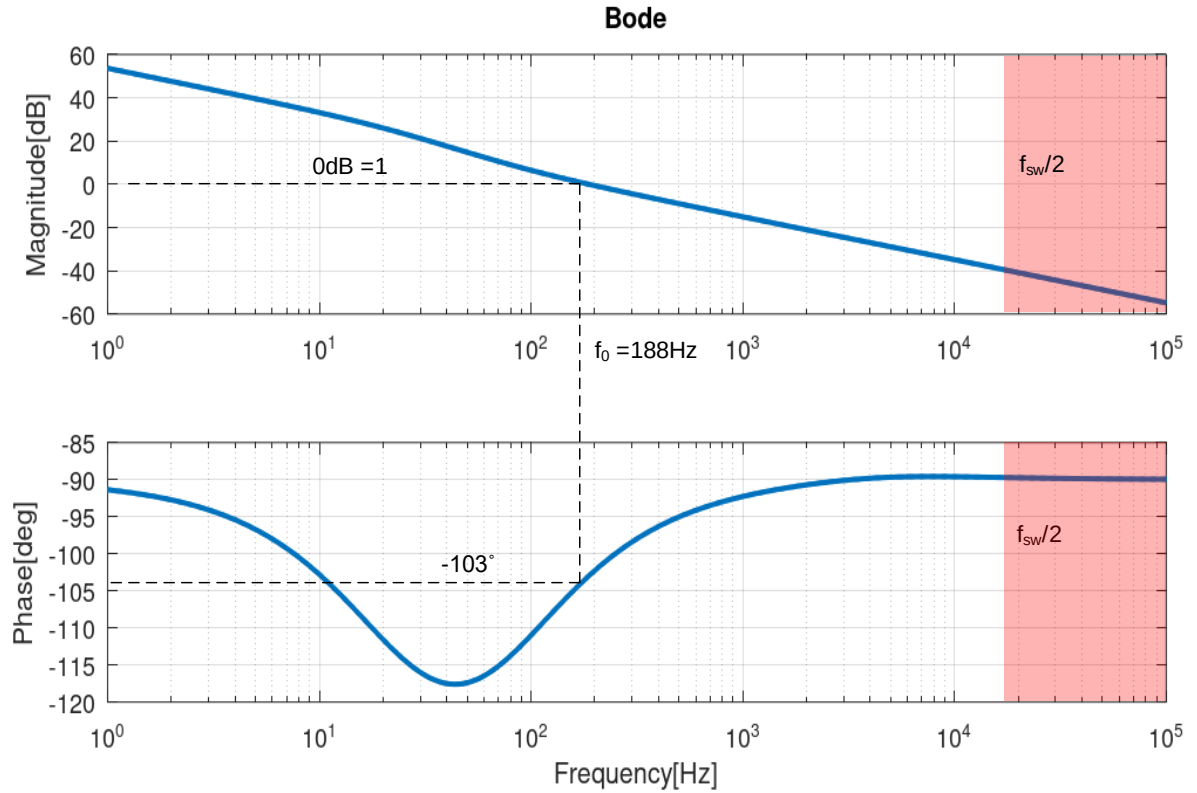


Рисунок 2.15 – ЛАФЧХ розімкненої системи

Для фільтрації випрямленої напруги через додаткову обмотку використовується конденсатор C_{501} , ємність якого розраховується за умови $\Delta U_{\text{дод рр}} < 500(\text{мВ})$:

$$C_{501} = \frac{U_{\text{дод}}}{\Delta U_{\text{дод рр}} (R9 + R10) f_{\text{sw}}} > 1(\text{мкФ}). \quad (2.82)$$

Обираємо $C_{501} = 1(\text{мкФ})$.

Діод для додаткової обмотки. Оскільки коефіцієнт трансформації первинної до додаткової обмоток дорівнює n , вимоги по напрузі для діода в колі додаткової обмотки ідентичні вихідному діоду.

Максимальна зворотна напруга на діоді:

$$U_{D2зв}^* = \frac{U_{\text{in max}}}{n} + U_{\text{out}} = \frac{28,8}{2} + 15 = 29.4(\text{В}). \quad (2.83)$$

Діюче значення струму через діод визначаємо як подвійний максимальний робочий струм мікросхеми U1 [36]:

$$I_{D2\text{RMS}} = 2 I_{VCC} = 34(\text{мА}). \quad (2.84)$$

Обираємо здвоєний діод зі спільним анодом BAW56 [49] з максимальною зворотною напругою $U_{D2зв \text{ макс}} = 70(\text{В})$, максимальним середнім значенням струму $I_{D2\text{сер макс}} = 200(\text{мА})$, максимальним піковим значенням струму $I_{D4 \text{ пік}} = 2\text{А}$, прямим падінням напруги $U_{D4\text{прям макс}} = 1.25\text{В}$, типовим значенням температурного імпедансу $R_{\theta J-A} = 500^\circ\text{C} / \text{W}$, максимальною температурою напівпровідника $T_{j\text{max}} = 150^\circ\text{C}$.

Максимальна розсіювана потужність на діоді:

$$P_{D2} = 2 U_{D2\text{прям макс}} \cdot I_{D2\text{RMS}} = 85(\text{мВт}). \quad (2.85)$$

Максимальна допустима розсіювана потужність за умови максимальної температури оточуючого середовища $T_{\text{amb max}} = 55^{\circ}\text{C}$:

$$P_{D4\text{ доп}} = \frac{T_{J\text{max}} - T_{\text{amb}}}{R_{\theta J-A}} = \frac{150 - 55}{500} = 190(\text{мВт}). \quad (2.86)$$

Для обмеження імпульсу струму при запуску, послідовно з діодами підключено резистори $R_2 = 22(\text{Ом})$ і $R_3 = 100(\text{Ом})$ типорозміру 0603.

Резистор R_1 подає початковий струм для ініціалізації мікросхеми. Опір визначається як:

$$R_1^* < \frac{(U_{\text{вх min}} - U_{\text{VCC on}})}{I_{\text{VCC startup}}} = \frac{19.2\text{V} - 9\text{V}}{1\text{mA}} = 10.2(\text{кОм}). \quad (2.87)$$

Обираємо $R_1 = 6\text{k}8(\text{Ом})$ типорозміру 0603.

2.7 Розрахунок захисту вибухонебезпечної частини

Для захисту від перенапруги існує два основних типи компонентів, які зазвичай застосовуються — це TVS-діоди (Transient Voltage Suppression diodes) та варистори. Вони забезпечують захист від швидких імпульсів електростатичного розряду (ESD) і достатній рівень захисту від повільніших перенапругових процесів. Принцип їхньої роботи полягає у відведенні надлишкової енергії від захищеного елемента або кола.

Однак існує ще один тип схеми, який не просто відводить енергію, а повністю вимикає подачу живлення на навантаження у разі появи перенапруги, схема з коротким замиканням шини живлення «crowbar circuit».

Така схема є відносно простою, рисунок 2.16, оскільки складається лише з кількох дискретних компонентів (наприклад, тиристора, діода та резистора). Її основна функція — вимикати вихідне живлення у разі, якщо джерело живлення починає працювати з перенапругою [49].

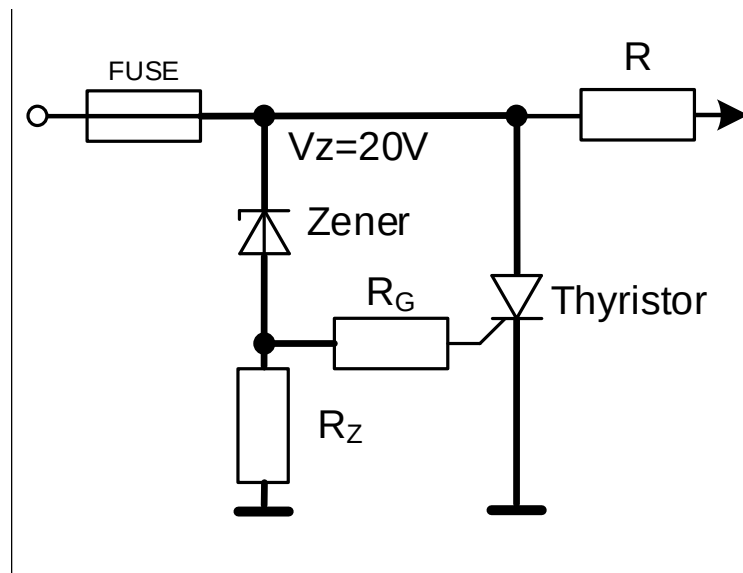


Рисунок 2.16 – Схема захисту «Ех» частини

На відміну від TVS-діодів чи варисторів, які просто розсіюють енергію імпульсу, crowbar-схема замикає вихід на землю або шину живлення, тим самим відводячи струм від навантаження та ініціюючи захисне вимкнення джерела.

На початку роботи живлення поступово підвищується до робочого рівня, для цього лінія живлення зазвичай має конденсатор великої величини іноді з послідовним резистором для забезпечення плавного наростання напруги. Це гарантує, що керований кремнієвий випрямляч або тиристор спочатку перебуває в непровідному стані.

Таблиця 2.3 – Електричні характеристики

Вхідні параметри	Значення та функції
Метод захисту	Ex ic IIC T4
Максимально можлива вхідна напруга	U_m 60 В
Стабілітрон	$V_Z = 20 \pm 2$ В
Тиристор	$V_t = 1.25$ В $I^2 t_T = 300 \text{ A}^2 \text{ c}$ $T_{j\max} = 130^\circ \text{C}$, $T_{\text{amb max}} = 60^\circ \text{C}$, $R_{th} = 50^\circ \text{C/W}_T$
Запобіжник	$I_{\text{fuse}} = 600$ мА $I^2 t_{\text{fuse}} = 100 \text{ A}^2 \text{ c}$

Умови безвідмовності для тиристора, умови перегорання:

$$\begin{aligned}
 I^2 t_{\text{fuse}} &< I^2 t_T; \\
 100 \text{ A}^2 \text{ c} &< 300 \text{ A}^2 \text{ c}.
 \end{aligned}
 \tag{2.88}$$

Умови зберігаються. Розраховуємо наступні параметри для тиристора:

$$\begin{aligned}
 V_{T\max} &= V_T = 1.25(\text{В}), \\
 I_{\text{fuse}} &= 600(\text{мА}), \\
 I_T &= 1.7 \cdot I_{\text{fuse}} = 1.7 \cdot 600 = 1020(\text{мА}), \\
 P_T &= V_{T\max} \cdot I_T = 1.25 \cdot 1020 = 1275(\text{мВт}).
 \end{aligned}
 \tag{2.89}$$

Максимально допустима розсіювана потужність на тиристорі:

$$P_{\max} = (T_{j\max} - T_{\text{amb}\max}) / R_{\text{th}} = (130 - 60) / 50 = 1.4(\text{Вт});$$

$$P_T < P_{\max}; \quad (2.90)$$

$$1275\text{мВт} < 1400\text{мВт}.$$

Умова про допустиму розсіювану потужність збережена. Розрахунок струмообмежуючого резистора R. Напруга, що контактує з Ех середовищем:

$$U_0 = V_{z\max} = V_Z + 2B = 22(\text{В}), \quad (2.91)$$

допустимий струм К.З. для U_0 за умов Ех іс ПС, $I_0 = 337(\text{мА})$. Тоді мінімальний опір:

$$R = \frac{U_0}{I_0} = \frac{22}{0.337} = 65.3(\text{Ом}). \quad (2.92)$$

Тому обираємо значення резистора R у 68 (Ом) в корпусі 2512, орієнтуючись на $R_{\text{th}} = 60^\circ\text{C} / \text{Вт}$. Максимально допустима розсіювана потужність на резисторі:

$$P_{2512} = (T_{j\max} - T_{\text{amb}\max}) / R_{\text{th}} = (130 - 60) / 60 = 1.16(\text{Вт}). \quad (2.93)$$

Щоб не перевищувати дану потужність, обираємо налаштування обмежувача струму:

$$I_{\max}^* = \sqrt{\frac{P_{2512}}{R}} = \sqrt{\frac{1.16}{68}} = 130(\text{мА}). \quad (2.94)$$

Обирається завдання на струм $I^* = 120(\text{мА})$.

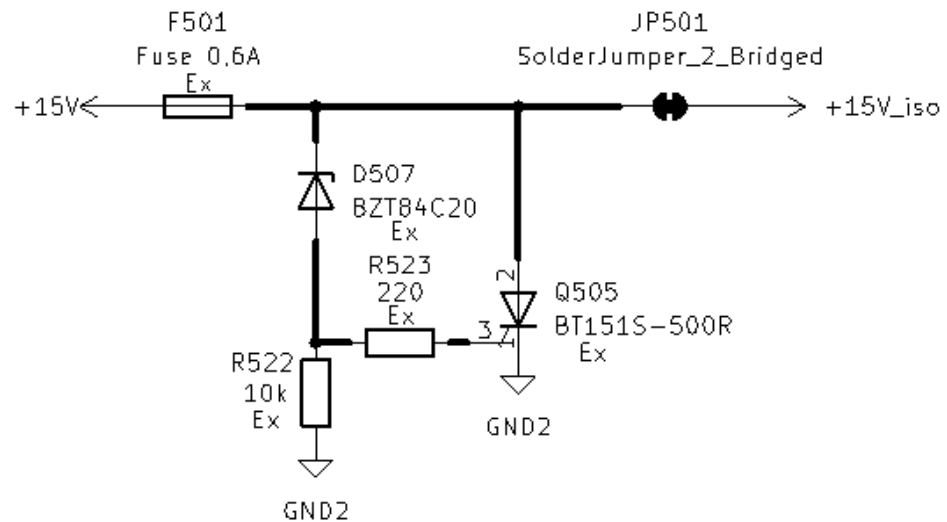


Рисунок 2.17 – Зібрана схема захисту «Ex» частини

Висновки до розділу 2

Виконано розробку та опис функціональної схеми апаратної частини, що дало змогу визначити структурні взаємозв'язки між її складовими. Проведено розрахунок буферної ємності живлення та джерела напруги 3,3 В, що забезпечує стабільну роботу вузлів системи. Розглянуто зворотноходовий DC/DC перетворювач (flyback) із подальшим розрахунком його параметрів, а також реалізовано схему зворотного зв'язку та компенсації для підтримки стабільності вихідної напруги. Окремо виконано розрахунок захисту вибухонебезпечної частини апаратної системи. Проведені роботи дозволили сформувати повну технічну базу для створення надійної та безпечної апаратної частини системи.

3 ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА КОНСТРУКТИВУ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Розроблена у попередньому розділі архітектура апаратної частини потребує практичної схемотехнічної та конструктивної реалізації. У зв'язку з цим у даному розділі виконано проєктування електричних принципових схем основних функціональних вузлів підсистеми віддаленого вводу-виводу, а також розроблено конструкцію друкованої плати та корпусу. Це дозволяє перейти від функціональної моделі пристрою до його фізичної реалізації.

3.1 Схема підключення мікроконтролера та мікросхем логіки

Для реалізації керування та підтримки IoT підсистемою, було обрано модуль ESP-WROOM-32, що представляє собою готовий Wi-Fi/BT модуль, що містить сам мікроконтролер ESP32, флеш-пам'ять, антенний модуль та необхідні радіочастотні елементи. Він використовується як центральний модуль для IoT-пристроїв, завдяки поєднанню низького енергоспоживання, потужної обчислювальної частини та широкої периферії.

Зовнішній вигляд модуля показано на рисунку 3.1 [50, 51], а ключові характеристики наведено в таблиці 3.1.



Рисунок 3.1 – Зовнішній та внутрішній вигляд модуля

Таблиця 3.1 – Характеристика модуля ESP-WROOM-32

Характеристика	Значення
1	2
Ядро процесора	Двоядерний LX6 (тактові частоти до 240 МГц)
Оперативна пам'ять (SRAM)	520 КБ
Об'єм ПЗУ (у складі чіпа ESP32)	448 КБ
Флеш-пам'ять	4 МБ (SPI Flash)
Робоча напруга	2.3...3.6 В (номінально 3.3 В)
1	2
Кількість GPIO	До 34 програмованих виводів
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi 802.11 b/g/n, діапазон 2.4 ГГц станція/точка доступу/одночасно Bluetooth Bluetooth v4.2 BR/EDR і BLE (Bluetooth Low Energy)
Інтерфейси	UART, SPI, I ² C, I ² S, CAN, PWM, ADC, DAC
Діапазон робочих температур	-40°C..+125°C
Споживання енергії	Глибокий сон: ~10 мкА Модемний сон (з підтримкою Wi-Fi): ~20 мА Активний режим (при 240 МГц): ~30-50 мА
Розміри модуля	18 × 25.5 × 3.1 мм

Модуль побудований на двоядерному процесорі Tensilica LX6, що забезпечує достатню продуктивність. Крім того, ESP32 має широкий набір апаратних можливостей. Залежно від версії доступно приблизно 34 GPIO-пінів, частина з яких може працювати як цифрові входи/виходи, ADC, DAC,

PWM, SPI, I2C, UART та інші інтерфейси. Це дає можливість підключати сенсори, виконавчі механізми й інші компоненти, не потребуючи додаткових контролерів. Усе це разом робить ESP32 оптимальним вибором для IoT-проектів.

Відповідно інформації у офіційній документації від виробника [53], складено таблицю підключення сигналів використаних у проєкті до модуля наведено в Додаток А та розглянуто підключення модуля, рисунки 3.2-3.3 .

Для контролю стану мікроконтролера на платі передбачено дві кнопки (рис. 3.2) SMD розміру SWS01, SWS02. Кнопка SWS02 виконує апаратне скидання мікроконтролера, що є обов'язковим елементом для ручного перезапуску системи під час налагодження або у разі програмного збою. Кнопка SWS01 використовується вибору режиму завантаження. В момент старту рівень напруги на виводі GPIO0 модуля визначає в який режим завантаження перейде ESP32.

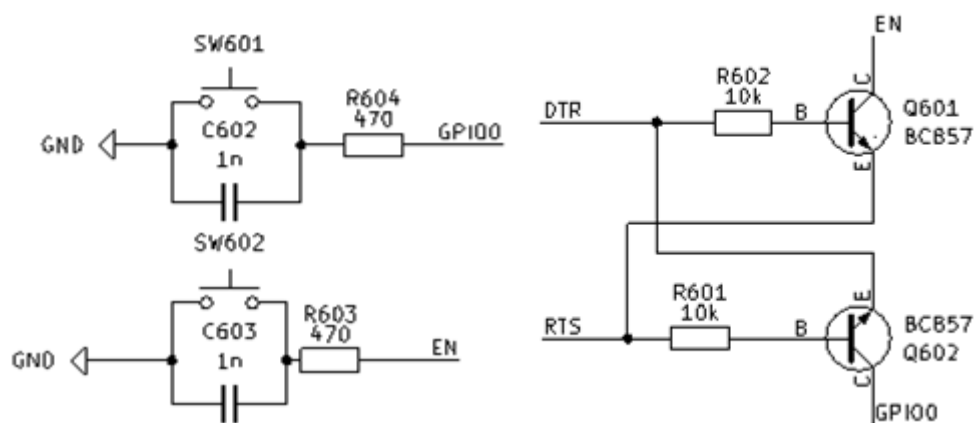


Рисунок 3.2 – Підключення сигналів кнопок керування модулем

Якщо GPIO0 у момент старту з'єднаний до логічного "0" (Gnd), мікроконтролер активує вбудований завантажувач (bootloader) і очікує команди для програмування флеш-пам'яті через UART-порт (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

Наведена схема з біполярними PNP-транзисторами служить для коректного узгодження виходів UART-адаптера з входами керування ESP 32. Кожен канал DTR (Data Terminal Ready) та RTS (Request To Send) реалізований за схемою із загальним емітером, що виконує роль інвертора та ключового підсилювача. Резистор на базі 10 кОм обмежує струм керування. Коли на вході високий рівень, транзистор закритий, і відповідна лінія ESP32 через підтягуючий резистор знаходиться у високому стані, що дозволяє нормальну роботу. При подачі активного низького рівня з UART-адаптера транзистор відкривається і надійно "притягує" лінію керування ESP32 до землі, формуючи необхідний низький логічний рівень. Дана схема забезпечує гальванічну розв'язку, захист виходів адаптера та інверсію сигналу для узгодження логіки, підсилення струмової здатності для чіткого перемикання та повну автоматизацію процесу програмування без ручного втручання.

Вивід EN (Enable) є активним за високого рівня напруги. За нормальних умов він підтягнутий резистором R601 до живлення +3.3V (рис. 3.3). При натисканні кнопки SWS02 вивід EN замикається на землю (GND) через резистор R603, що викликає миттєве скидання. Після відпускання кнопки знову підтягується до високого рівня, і ESP32 починає процес перезавантаження.

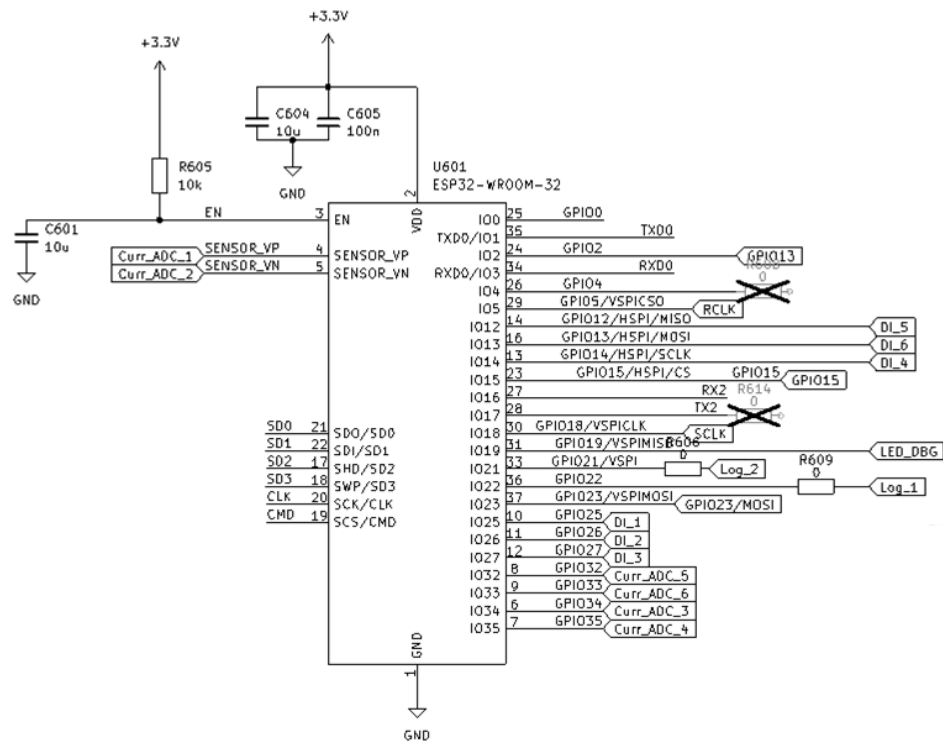


Рисунок 3.3 – Підключення сигналів до модуля ESP-WROOM-32

Для зменшення високочастотних перешкод безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера встановлені розв'язуючі конденсатори (C604, C605). Їхня наявність є обов'язковою вимогою і запобігає нестабільній роботі та перезавантаженням модуля через шуми в мережі живлення.

Сигнали Curr_ADC_1 – Curr_ADC_6 використовуються для вимірювання струмів 0-20 / 4-20 mA на кожному з шести терміналів, DI_1- DI_6 відповідають за стан відповідного дискретного входу.

Індикація стану програмно-конфігурованого вводу виводу та керуючі сигнали вирішено передавати з використанням зсувних регістрів 74HC595 [54], які керуються по єдиній шині VSPI. Для спрямування даних синхронного послідовного інтерфейсу у відповідну частину схеми використаємо логічну мікросхему 74HC08D [55] (чотири логічні елементи "І").

Сигнали Log_1 та Log_2, що формуються модулем програмно, визначають куди буде спрямовано інформацію по шині SPI, виконуючи

функцію дешифратора адреси та блокування. Це дозволяє виконати індикацію та значно розширити кількість сигналів керування, використовуючи мінімальну кількість пінів модуля. На рисунках 3.4-3.5 представлено підключення до каскаду 74HC595 та 74HC08D.

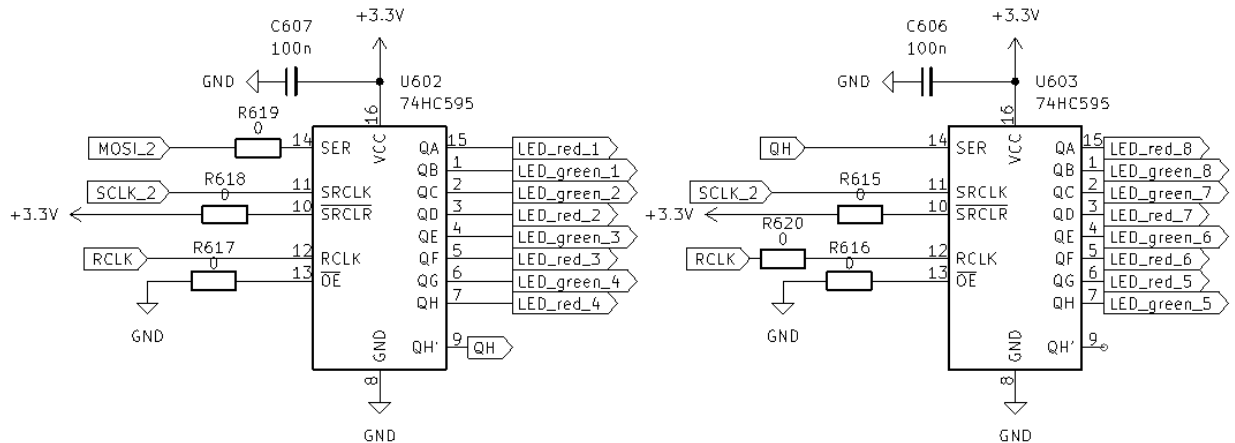


Рисунок 3.4 – Послідовне підключення 74HC595 для керування індикацією

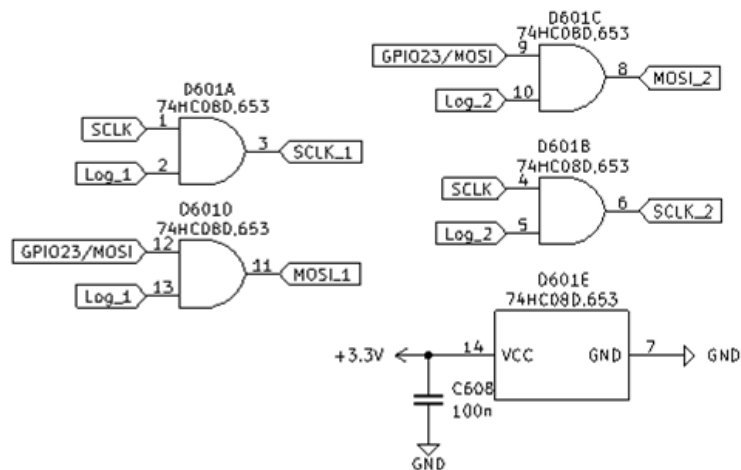


Рисунок 3.5 – Підключення 74HC08D

З метою оптимізації габаритних розмірів пристрою, модульності та забезпечення уніфікації компонентів було прийнято рішення про розподіл функціоналу на три окремі плати: основну, розробку апаратної частини якої проводимо, та дві ідентичні плати. Ті дві плати є уніфікованими та мають однаковий набір електричних схем, які забезпечують роботу трьох

конфігурованих входів/виходів, призначених для використання у промислових середовищах, та одного конфігурованого для вибухонебезпечного середовища. Зокрема, на платах реалізовано: схеми обмеження струму у режимах подачі живлення для аналогових та цифрових входів, схеми перетворення струмового сигналу $0...25$ мА у відповідну напругу $0...3,3$ В, схеми керування цифровим виходом із вбудованим обмеженням струму; універсальний компаратор із гістерезисом для формування сигналу цифрових входів, а також схеми формування невеликого постійного струму навантаження (приблизно 3 мА) для входів, які можуть працювати як у режимі «джерела», так і «стоку».

Ланцюжок керування реалізований так, що на обох уніфікованих платах розширення встановлено два 8-бітних зсувних реєстри послідовно, таким чином ми маємо послідовний каскад на 32 біти. Тобто з основної плати на плати розширення, для реалізації керування, подаються лише чотири сигнали шини SPI, після мікросхеми логічного I : SCLK_1 – тактовий сигнал; MOSI_1 – потік даних від мікроконтролера; RCLK – сигнал фіксації. На рисунку 3.6, показано з'єднання сигналів до роз'ємів для передачі.

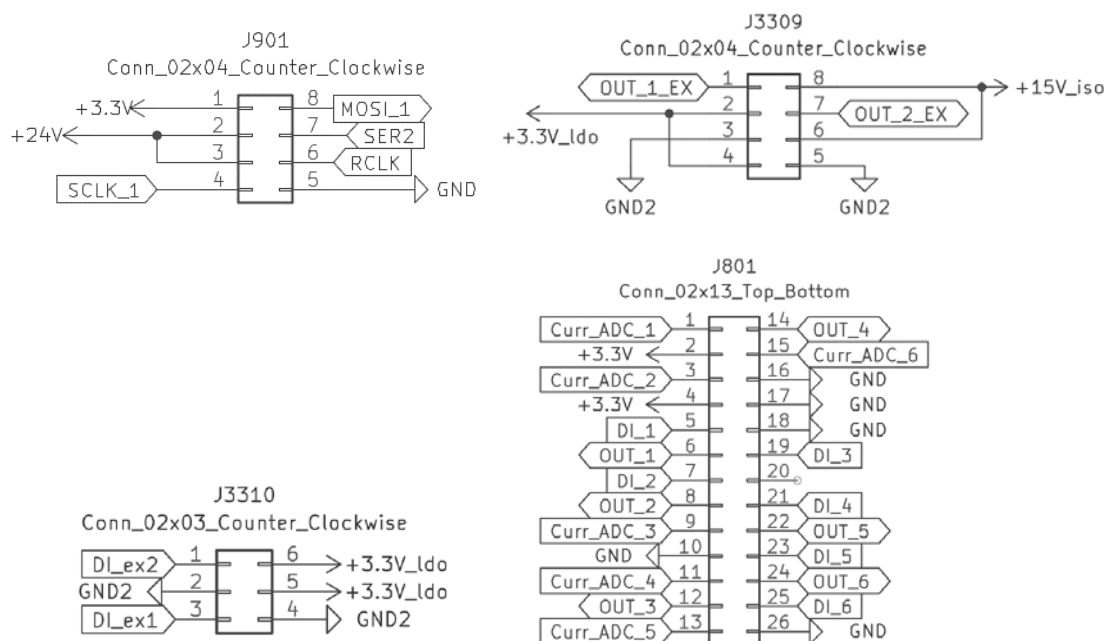


Рисунок 3.6 – Підключення сигналів до роз'ємів

Всі схеми електричні принципові наведені на аркуші А1, Додаток Б. Специфікацію до схем наведено в Додатку В.

3.2 Вибір корпусу та визначення габаритів плати

Згідно з технічним завданням, загальний пристрій віддаленого вводу виводу розробку апаратної частини якого проводимо має встановлюватися на DIN-рейку. На цьому етапі важливо обрати підходящий для застосування корпус і вже виходячи з його габаритних розмірів проєктувати плату.

Для промислових пристроїв важливими є захист від механічних впливів та відповідність заявленим рівням захисту, у нашому випадку режим захисту IP20, ІЕС 61131-2 тип 1 та 3. Також відповідно до завдання в нашому випадку можливість монтажу на DIN-рейку та компактність яка обумовлена тим, що модуль має зручно розташовуватися на дін рейці в шафах керування з іншими пристроями.

Корпус Z101 обрано як такий що оптимально підходить під задані характеристики та має низку переваг: стандартне кріплення на DIN-рейку 35 мм; достатній внутрішній об'єм для розміщення плати з урахуванням елементів різної висоти; наявність місць під клемники та отвори під світлодіодні індикатори; ударостійкість та теплостійкість до 103°C, що забезпечує працездатність пристроїв в умовах від -40°C до +90°C.

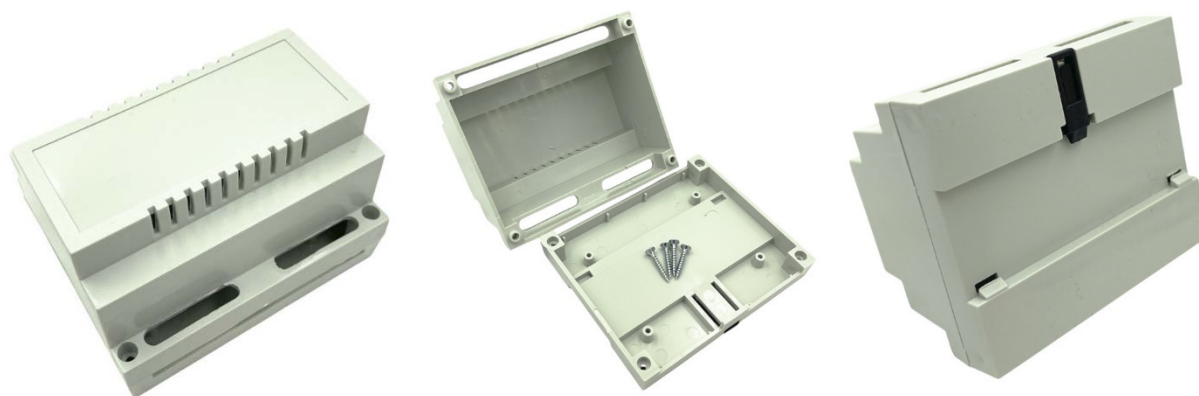


Рисунок 3.7 – Вигляд корпусу Z101

Габаритні розміри корпусу Z101 наведені на рисунку 3.8, [56]. Саме вони визначають максимально можливі розміри друкованої плати, включно з отворами для фіксації до корпусу, вентиляційних каналів та роз'ємів.

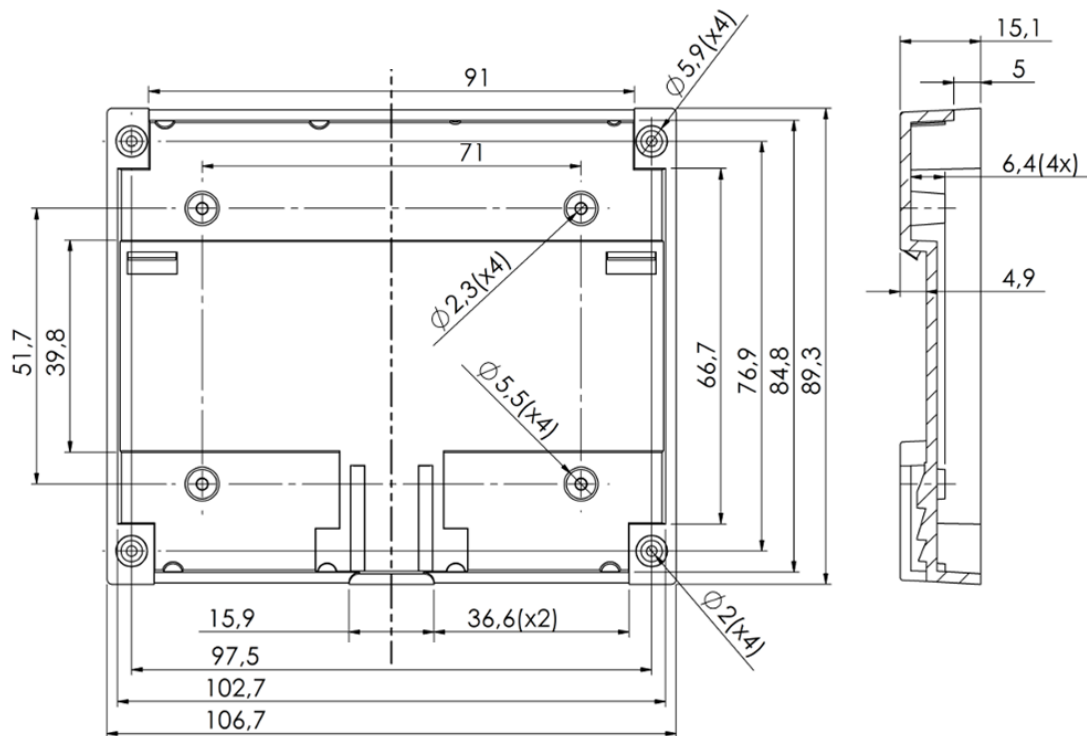


Рисунок 3.8 – Креслення нижньої частини корпусу Z101

Враховуючи внутрішні розміри обраного корпусу, було визначено розміри посадкової області та накреслено контур плати. Це дозволило правильно обрати форм-фактор плати, розташування клемників та точок на платі для з'єднання із загальною РЕ землею на дін-рейці.

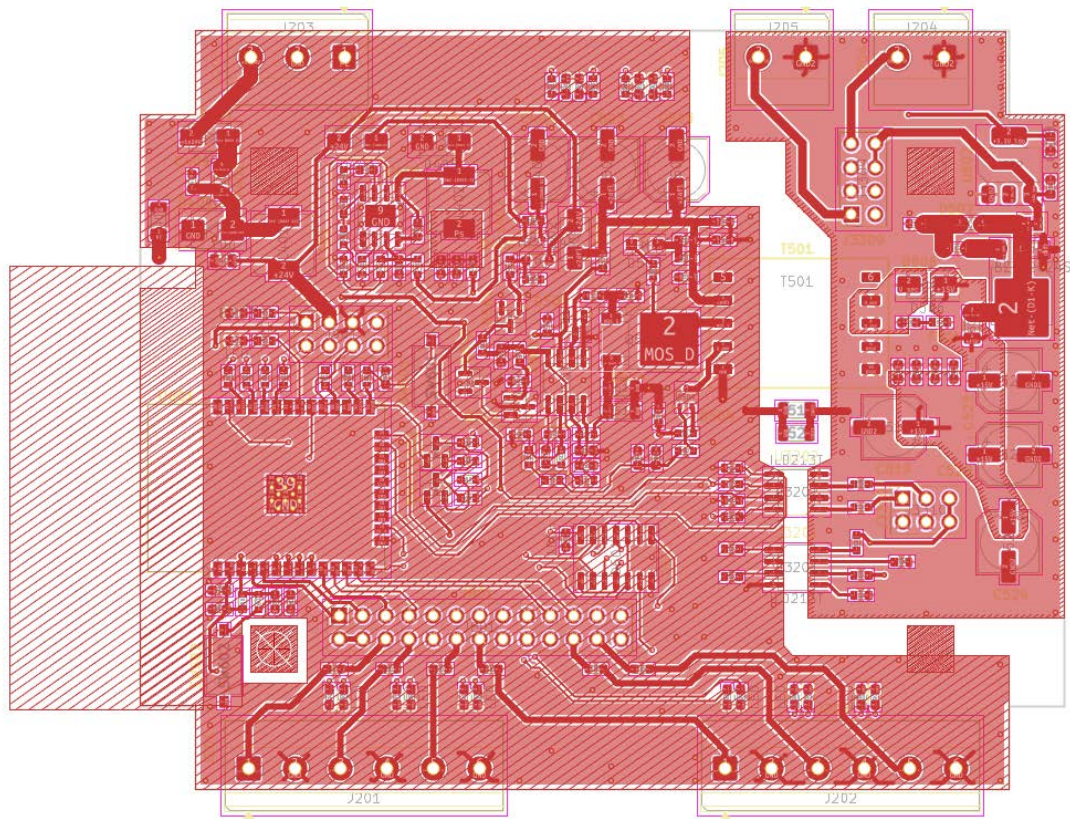


Рисунок 3.10 – Верхній шар плати

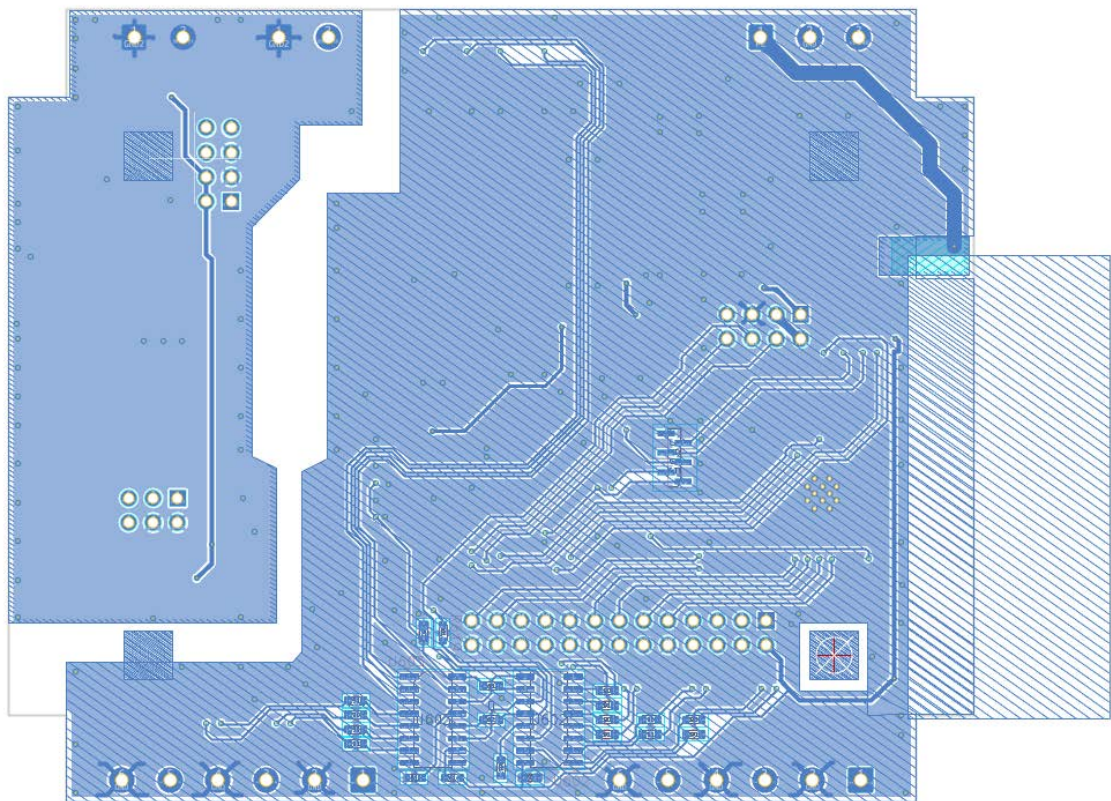


Рисунок 3.11 – Нижній шар плати

Значну частину на платі займають елементи схеми імпульсного джерела живлення та захисту для схем що стосуються вибухонебезпечної зони. На правій частині плати розташовано ізольовану гальванічно розв'язану частину яка відповідає за вибухозахищені входи та виходи. Виконано фізичне розділення полігонів заземлення двох частин плати. Для ділянки захисту crowbar дотримано збільшених ізоляційних відстаней та ширших доріжок (1–2 мм).

Окрему частину займає схема живлення 3,3 В, яка живить логічну частину та мікроконтролер. Поруч розміщено основний обчислювальний модуль — ESP32. Розташування мікроконтролера визначилося розмірами його інтегрованої антени. Відповідно до рекомендацій виробника модуля, в секторі перед антеною не допускається розміщення металізованих майданчиків, доріжок або компонентів.

3.4 Огляд 3D-моделі друкованої плати та корпусу

Після завершення трасування було створено 3D-модель плати (рис. 3.12–3.13) вбудованими засобами KiCad 9.0. Це дало змогу візуально оцінити конструкцію, перевірити розміщення та відстані між компонентами.

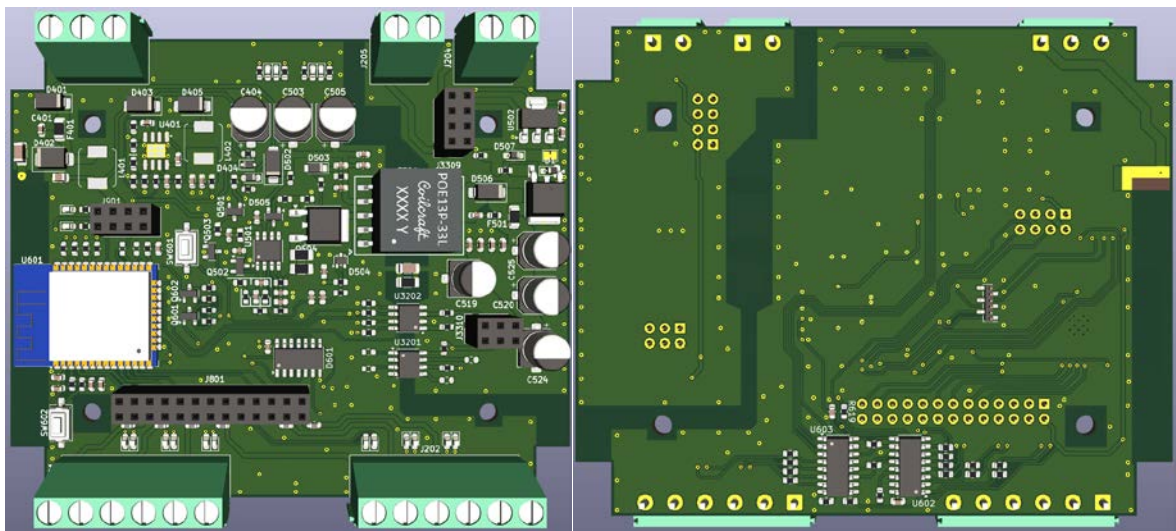


Рисунок 3.12 – 3D вигляд плати

Для візуалізації конструктиву пристрою та перевірки відповідності габаритів друкованої плати та корпусу, було виконано повноцінне 3D-моделювання в середовищі Autodesk Fusion 360. Використано модель корпусу [13356], всередину якого було розміщено три окремі друковані плати (рис. 3.13), розташовані одна над одною.

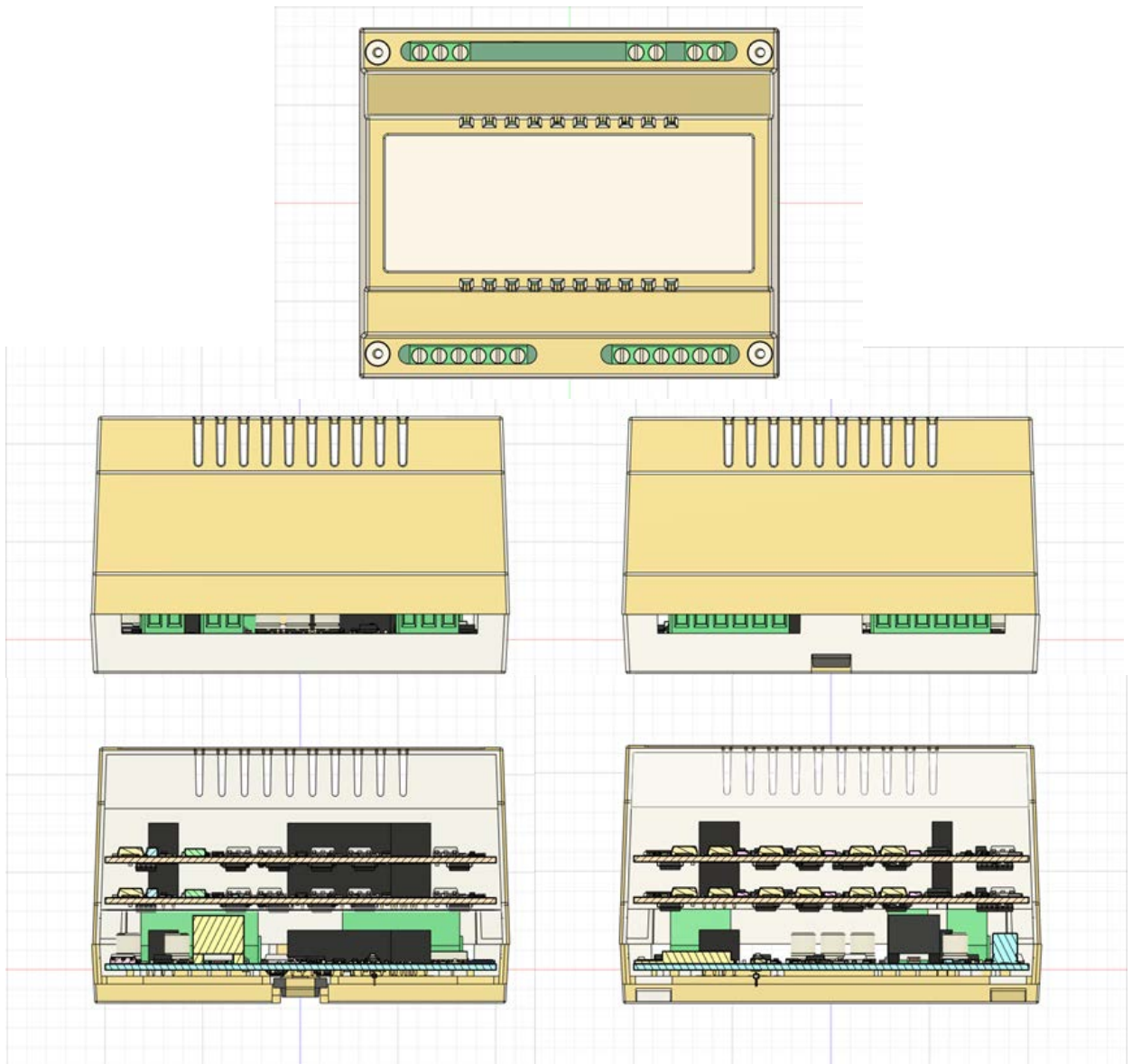


Рисунок 3.13 – Зовнішній 3D вигляд пристрою

Проведений аналіз тривимірної моделі підтвердив, що всі плати, роз'єми, монтажні елементи та інші компоненти розташовані всередині корпусу, не перетинаються між собою та повністю відповідають просторовим

обмеженням. Це дозволило ще на етапі проектування перевірити та усунути можливі помилки розташування елементів та забезпечити узгодженість елементів пристрою.

У роботі безпосередня розробка верхніх двох допоміжних плат, які показані в тривимірній моделі на рисунку 3.13 не представлена. Однак у моделі вони враховані, оскільки є невід’ємною частиною пристрою.

З’єднання між платами виконано за допомогою штифтових роз’ємів типу pbd/pls, які забезпечують надійне з’єднання та зручність обслуговування. На рисунку 3.14 представлено розташування роз’ємів на друкованій платі та вигляд з’єднання плат.

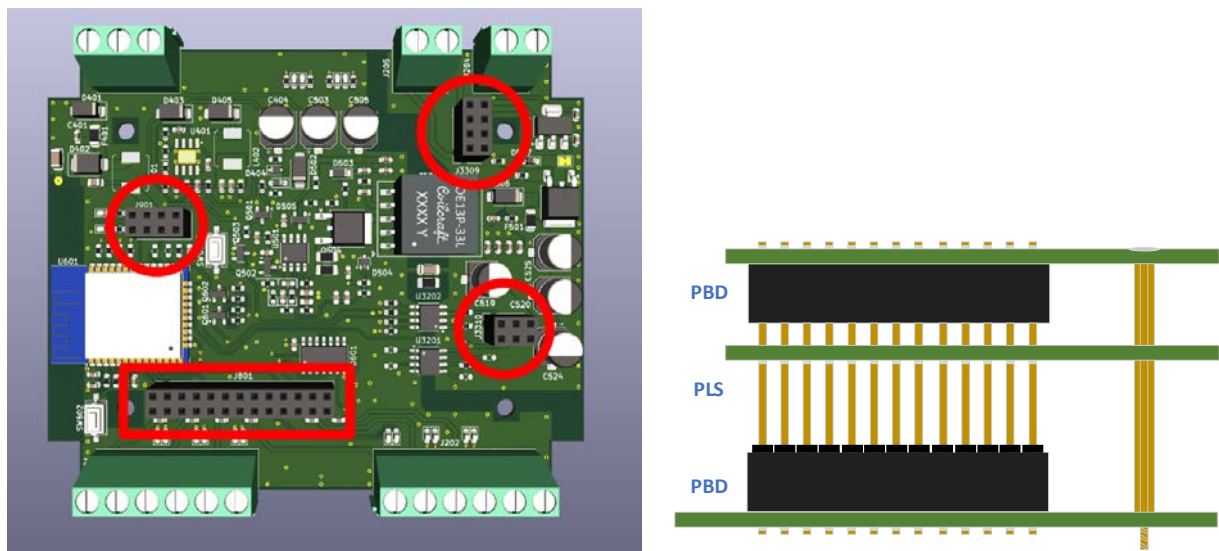


Рисунок 3.14 – Розташування роз’ємів та логіка з’єднання

Висновки до розділу 3

Послідовно виконано етапи, проєктування друкованої плати. Схеми електричні принципові наведено у Додатку Б. Обрано корпус Z101, його внутрішні розміри стали базою для визначення максимальних допустимих розмірів друкованої плати. Виконано трасування та конструктивне опрацювання друкованої плати. Виконано аналіз 3D-моделі пристрою, що продемонструвала реальну можливість розміщення трьох плат усередині корпусу та підтвердила правильність прийнятих конструктивних рішень. Загалом, проведена робота дозволила сформувати повністю готовий до виробництва комплект конструкторської документації.

4 МОДЕЛЮВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

Прийняті схемотехнічні рішення та розраховані параметри апаратної частини потребують перевірки їхньої працездатності та відповідності заданим вимогам. З цією метою у даному розділі проведено комп'ютерне моделювання ключових вузлів підсистеми, зокрема імпульсного зворотноходового DC/DC-перетворювача. Результати моделювання дозволяють оцінити режими роботи пристрою та слугують підґрунтям для подальших експериментальних досліджень.

4.1 Моделювання зворотноходового DC/DC перетворювача

На основі теоретичної схеми зворотноходового перетворювача було сформовано схему моделі з урахуванням основних елементів: ключового транзистора, трансформатора із роздільними обмотками, діода, вихідного фільтра (дроселя та конденсатора), а також навантаження. Для джерела керування використовувалося імпульсне джерело з параметрами, що відповідають реальному режиму роботи.

Перетворювач було змодельовано SPICE-симуляторі LTspice, рисунок 4.1.

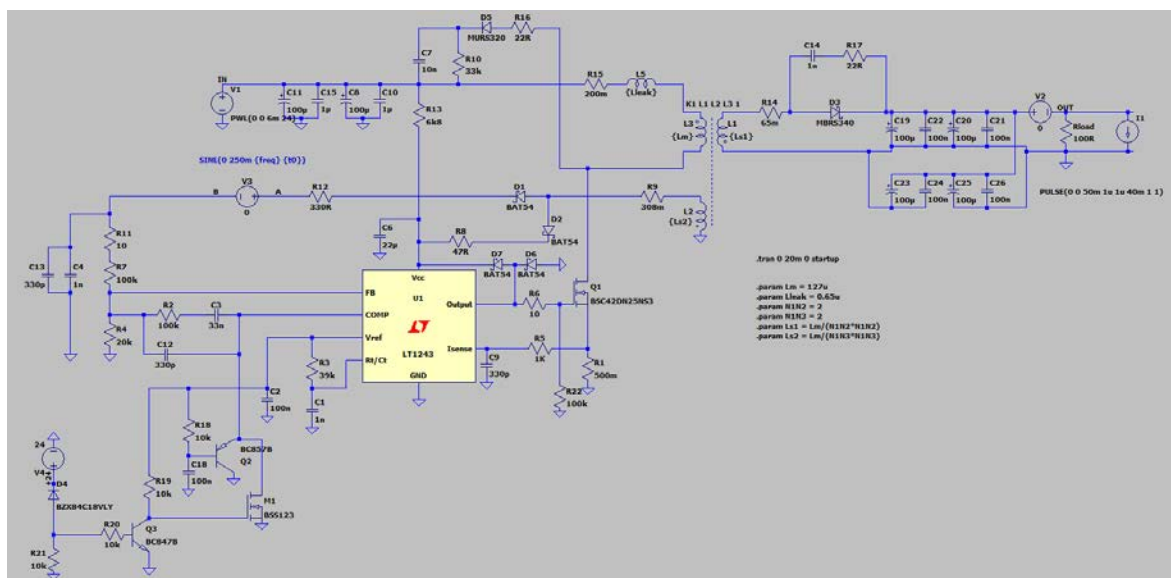


Рисунок 4.1 – Моделююча схема зворотноходового DC/DC перетворювача

На рисунку 4.2 зображено перехідний процес встановлення вихідної напруги $V(out)$ від 0 В до усталеного значення, при допустимих вхідних напругах 19 В, 24 та 28В.

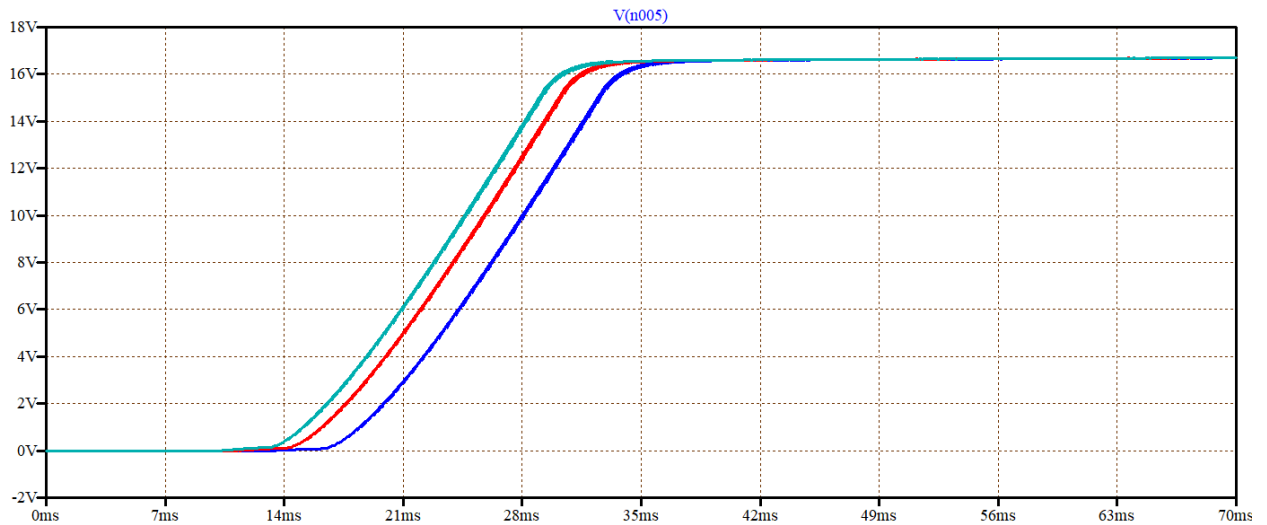


Рисунок 4.2 – Осцилограми вихідної напруги зворотного DC/DC перетворювача

Характеристики демонструють коректну роботу системи плавного пуску та стабільність флайбек-перетворювача в робочому діапазоні вхідних напруг. Вихідна напруга піднімається до номінального значення з контролем, без різких стрибків або коливань. Це підтверджує наявність та правильну роботу схеми плавного пуску, що обмежує струмові навантаження на вихідні компоненти під час ініціалізації.

Після завершення перехідного процесу пуску, що займає близько 20 мілісекунд, вихідна напруга стабілізується на номінальному рівні. Відсутність коливань на всіх трьох кривих свідчить про стабільну роботу системи керування та правильно розраховані параметри силової частини в сталому стані. Таким чином, перетворювач демонструє задовільну динаміку пуску та стабільність виходу в заданому діапазоні вхідних напруг, що є критичним для надійної експлуатації.

4.3 Дослідження режимів роботи зворотноходового перетворювача

Одним із ключових етапів перевірки якості та надійності імпульсного джерела живлення є аналіз його поведінки в умовах навантаження. Моделювання під навантаженням дозволяє оцінити динамічні властивості системи керування, швидкість її реакції на збурення та здатність підтримувати стабільність вихідних параметрів.

Наведені графіки на рисунку 4.3, демонструють динаміку двох ключових напруг, вихідної напруги флайбек-перетворювача $V(out)$ та випрямленої напруги з допоміжної обмотки трансформатора $V(b)$, під час навантаження.

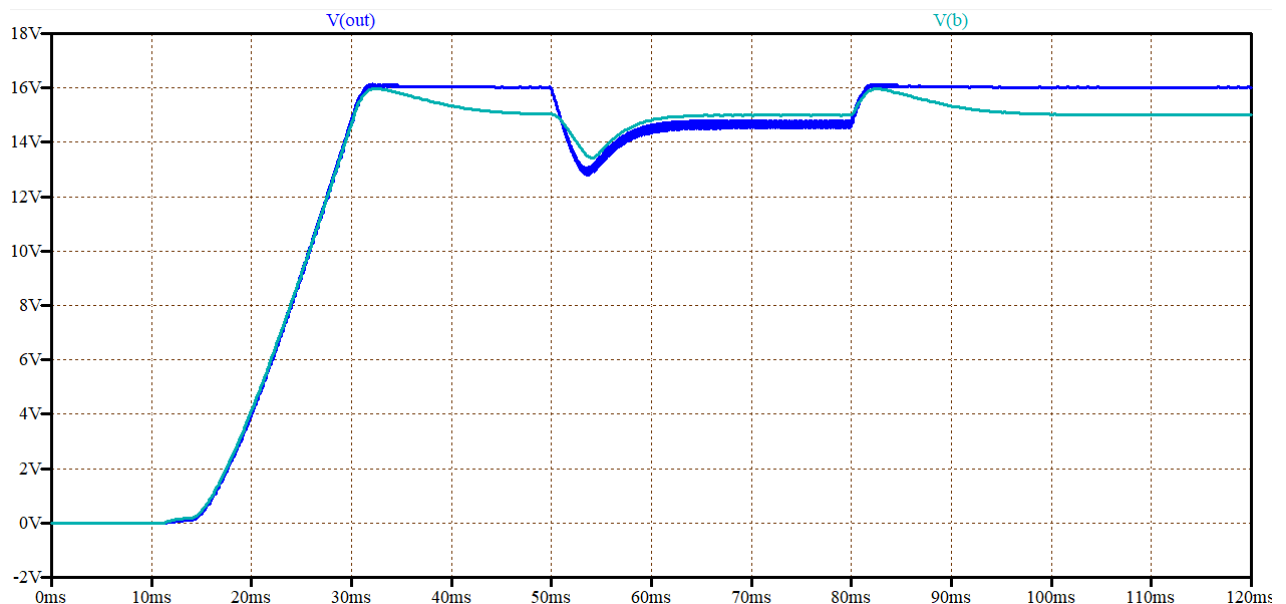


Рисунок 4.3 – Напруга на виході перетворювача та випрямлена напруга з додаткової обмотки

Вихідна напруга $V(out)$ підтверджує стабільність системи регулювання. Після різкого підключення навантаження, близького до максимального, спостерігається невелике просідання, яке швидко компенсується системою керування. Система має статичну похибку регулювання напруги. Вона викликана імпульсними викидами напруги на індуктивності розсіювання

трансформатора а також нелінійностями силового діода на виході і на додатковій обмотці. Форма сигналу не має значних низькочастотних коливань, що вказує на правильну роботу петлі зворотного зв'язку та достатній запас стійкості.

Одночасно, форма випрямленої напруги з допоміжної обмотки є показовою для роботи ланцюга живлення контролера та ізолюваного зворотного зв'язку. Наявність стабільних, чітко сформованих імпульсів на цій кривій безпосередньо підтверджує, що система зворотного зв'язку через обмотку функціонує коректно. Ці імпульси несуть інформацію про стан вихідної напруги та живлять мікросхему керування UC3843, замикаючи контур регулювання. Їхня правильна форма та стабільна амплітуда після навантаження підкреслюють, що як силова частина, так і ланцюг управління працюють узгоджено, забезпечуючи надійне регулювання виходу в сталому режимі.

Графік на рисунку 4.4 демонструє вигляд $V(out)$ в усталеному режимі, на якому чітко видно пульсації.

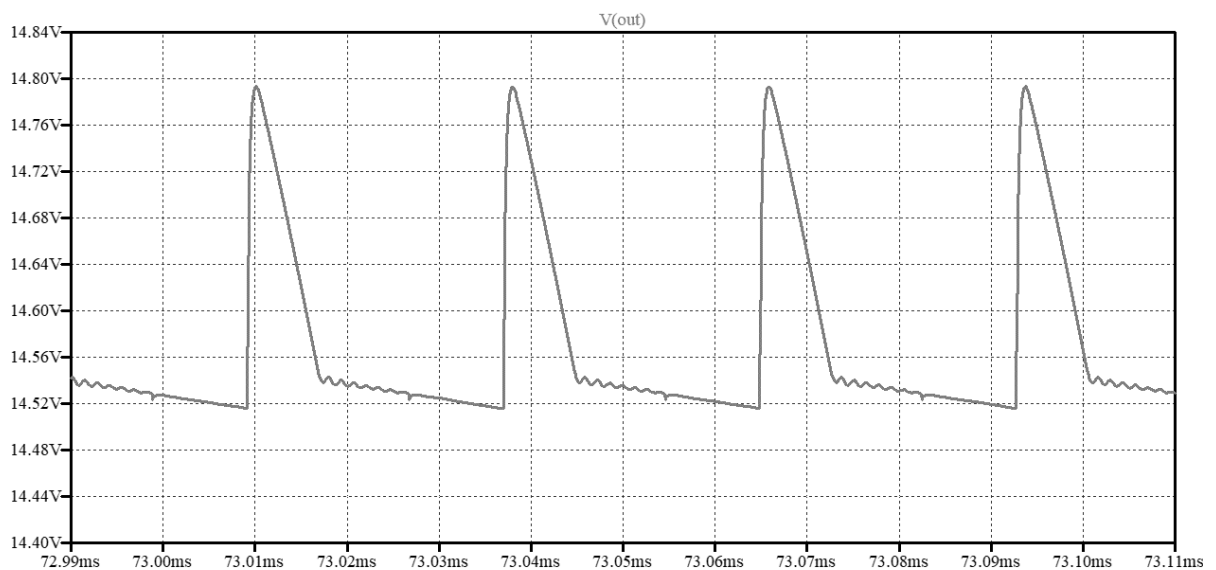


Рисунок 4.3 – Пульсації вихідної напруги під навантаженням

Аналіз струмів обмоток (рис. 4.4-4.5) є ключовим підтвердженням принципу роботи зворотноходового DC/DC перетворювача. З графіків видно, що струми первинної $I(L3)$ та вторинної $I(L1)$ обмоток знаходяться у строгій протифазі: струм зростає лише в одній обмотці за цикл, а в іншій спадає до нуля. Оскільки струми обох обмоток встигають розрядитися до нуля в межах комутаційного періоду, це вказує на роботу перетворювача в режимі розривних струмів.

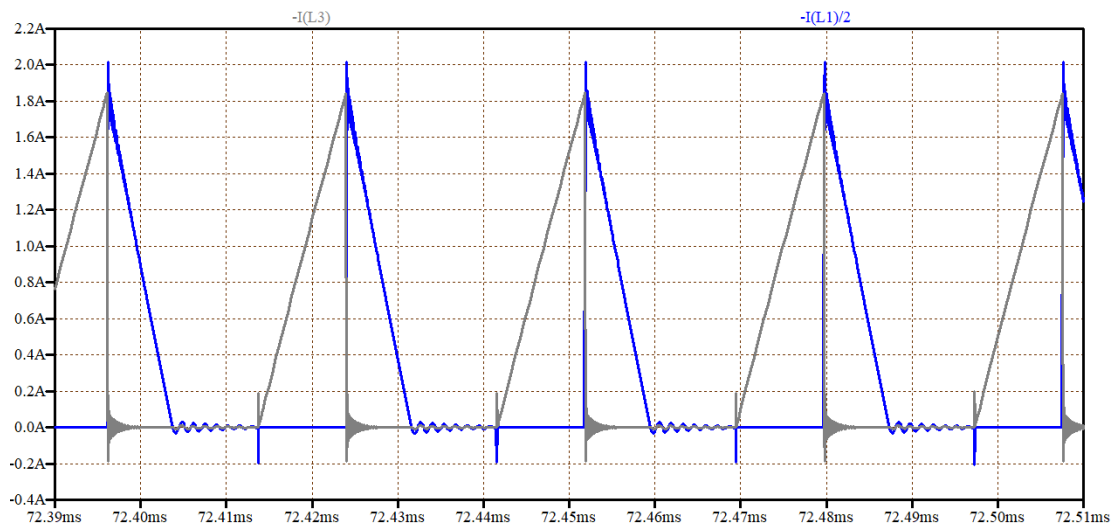


Рисунок 4.7 – Струми обмоток трансформатора в режимі навантаження

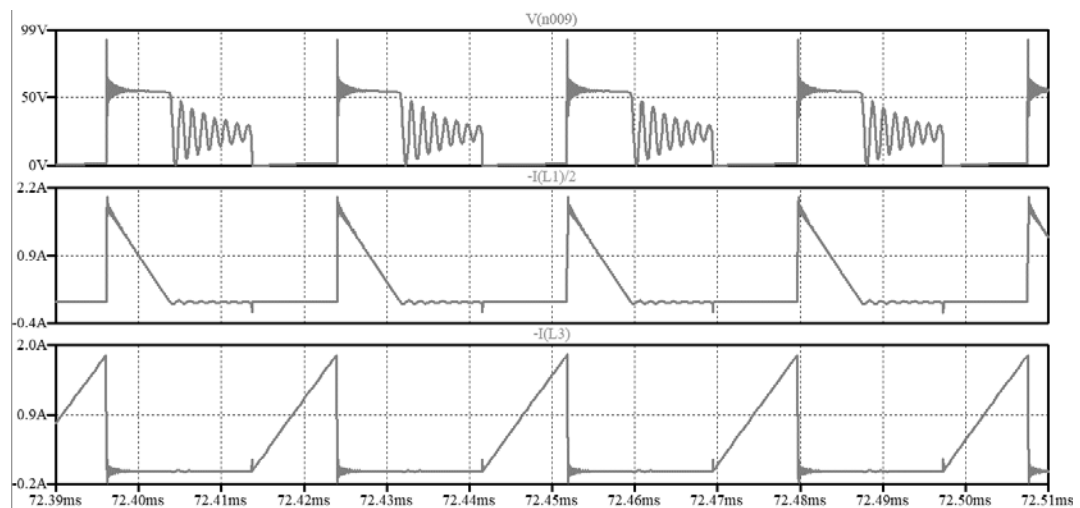


Рисунок 4.5 – Напруга на ключі та струми обмоток трансформатора в режимі навантаження

Висновки розділу 4

У розділі здійснено моделювання зворотноходового DC/DC перетворювача у середовищі LTspice, що дозволило перевірити працездатність розробленої схеми та визначити її основні робочі характеристики. Було отримано осцилограми напруги та струму на ключових елементах схеми, проведено аналіз перехідних процесів та стабільності вихідної напруги. Результати моделювання підтвердили правильність вибору параметрів компонентів та їх взаємодії в перетворювачі, що створює основу для подальшої оптимізації та практичної реалізації апаратної частини системи.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Етап фізичного тестування прототипу є критично важливим етапом розробки, оскільки перевіряється реальна поведінка схеми відносно ідеалізованих результатів моделювання. Верифікація відповідності роботи розробленої плати технічному завданню та перевірка стабільності роботи у всіх робочих режимах і навантаженні, є головним завданням тестування.

Крім того, відладка дозволяє виявити помилки, які могли бути допущені на етапі проєктування, трасування чи підготовки виробничих файлів плати.

5.1 Тестування ланцюгів живлення

Після завершення складання друкованої плати було проведено детальний візуальний огляд компонентів. Ще на етапі проєктування було додано нульові резистори (0 Ом) типорозміру 0603, для можливості ізолюваного тестування окремих функціональних блоків, що спрощує процес поетапної перевірки.

Оскільки явних помилок чи дифектів на друкованій платі не виявлено, виконали подачу номінальної вхідної напруги на відповідний термінал.

Всі експериментальні дослідження проведено при номінальних умовах живлення, вхідна напруга $U_{вх}=24\text{ В}$, $\pm 20\%$ та вихідне навантаження не перевищувало $I_{вих} = 0.5\text{ А}$.

Увімкнення пройшло успішно, силова частина, яка відповідає за комутацію та захист вхідного живлення, працювала відповідно до завдання. Було підтверджено коректність роботи схеми захисту від зворотної полярності.

Для тестування схеми DC-DC перетворювача, призначеного для формування напруги 3.3 В для живлення логічної частини, було встановлено

нульовий резистор у відповідну перемичку. Подача вхідного живлення показала штатну роботу перетворювача.

Перевірка мільтиметром підтвердила наявність коректного живлення на модулі ESP32-WROOM-32. Виміряна напруга становила 3.4 В, що є припустимим у межах вимог мікроконтролера.

Також було протестовано роботу запобіжника на вході, номінальний струм 5 А. Тестування на спрацювання захисту показало, що при напрузі 24 В та струмі, близькому до 5 А, запобіжник коректно розмикав ланцюг.

5.2 Тестування зворотноходового перетворювача (Flyback)

Наступним етапом було перевірити роботу ізолюваного перетворювача Flyback, побудованого на ШІМ-контролері UC3843. Ця схема призначена для формування ізолюваного живлення частини, що безпосередньо стосується входів/виходів для вибухонебезпечного середовища.

Для підтвердження коректності роботи схеми виконано тест із плавним підвищенням вхідної напруги від 0 до 24.2 В. На осцилограмі (рис. 5.2) видно момент запуску перетворювача: робота вузла розпочинається при досягненні вхідною напругою порогу близько 18 В.

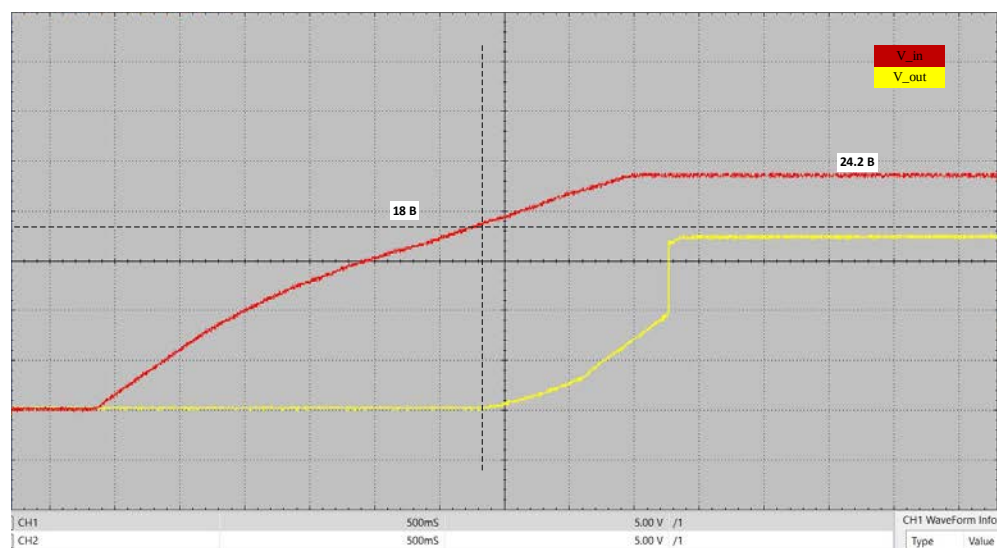


Рисунок 5.2 – Тестування пуску Flyback перетворювача

Це цілком відповідає очікуванням, оскільки у схемі керування (UVLO – Undervoltage Lockout) застосовано стабілітрон із номіналом 18 В, що задає мінімальну напругу для початку роботи контролера.

Після запуску, у режимі холостого ходу, вихідна напруга перетворювача плавно зростала. Така поведінка є характерною для роботи зворотноходового перетворювача без навантаження та свідчить про відсутність самозбудження або нестійкої роботи.

Для оцінки стабільності роботи зворотного зв'язку, коректності формування ШІМ-сигналу та адекватності роботи схеми керування були зняті осцилограми сигналів на основних керуючих виводах мікросхеми UC3843 : FB (Feedback), COMP (Compensation) та OUT (Gate Drive).

Осцилограму ШІМ-сигналу подано на рисунку 5.3. На кожній із них наведено два режими роботи синій сигнал - робота у режимі холостого ходу, червоний сигнал - робота під навантаженням.

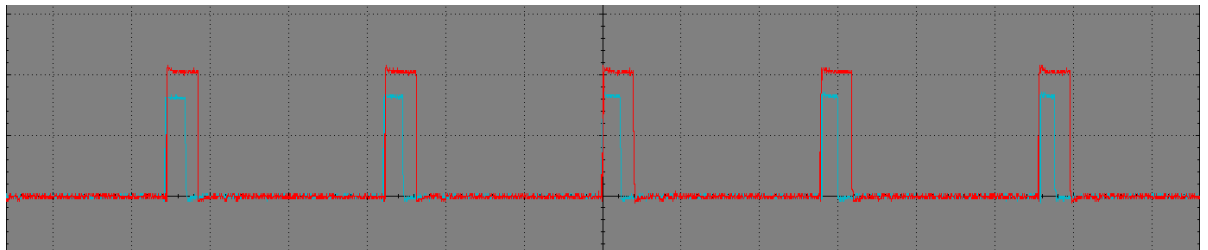


Рисунок 5.3 – Осцилограми керуючих виводів мікросхеми UC3843

Осцилограма сигналу OUT показує чіткі прямокутні імпульси керування MOSFET. У режимі холостого ходу імпульси мають малу тривалість, а під навантаженням імпульси стають ширшими та регулярними, що демонструє збільшення робочого циклу для підтримання стабільної вихідної напруги.

Додатково було проведено аналіз сигналу на допоміжній обмотці трансформатора (V_AUX), яка використовується для саможивлення ШІМ-контролера UC3843 після запуску перетворювача. Осцилограма наведена на рисунку 5.4.

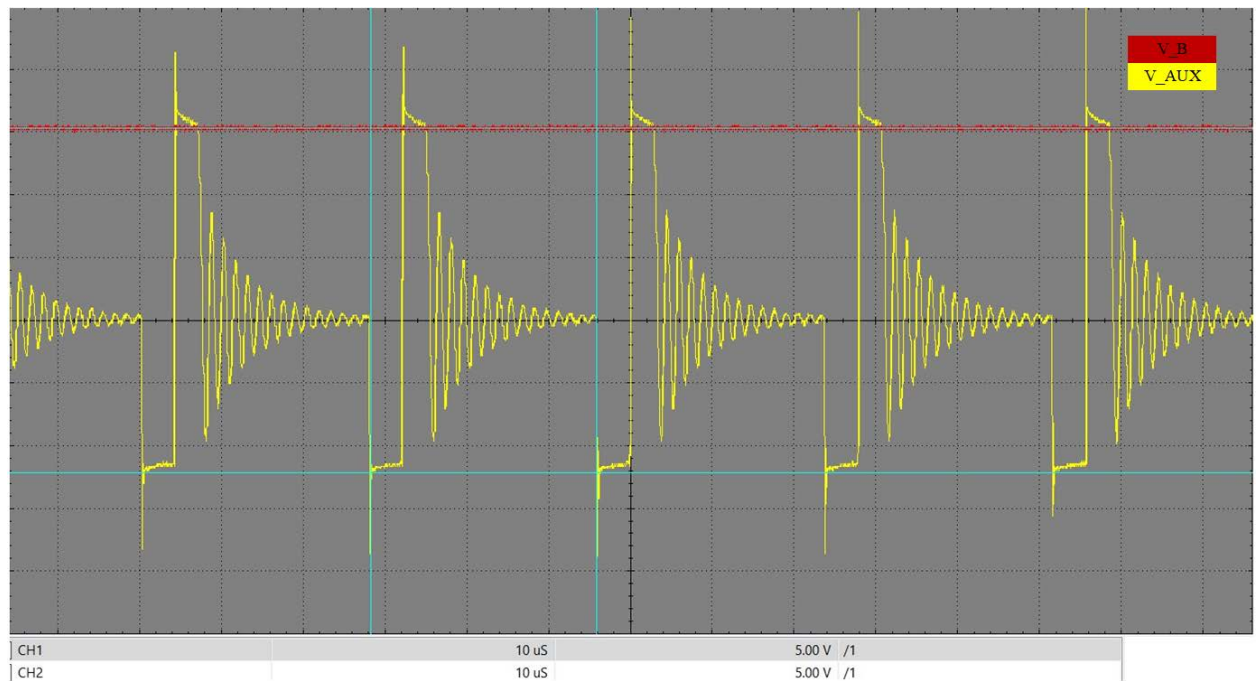


Рисунок 5.4 – Осцилограма сигналу V_AUX відносно випрямленої напруги

Накладення на V_{aux} (жовтий сигнал) випрямленого сигналу після (червоний) дозволяє візуально оцінити ефективність фільтрації та стабільності живлення. З осцилограми можна визначити, чи відбувається коректне заряджання конденсаторів C501 та C502, чи є надмірні пульсації або просідання напруги, що може свідчити про неправильні номінали або несправність компонентів. Якщо номінали C501/C502 занадто малі буде видно надмірні коливання (рис.5.5); якщо номінали резисторів, які розташовані до конденсаторів, підібрано невірно напруга може не встигати стабілізуватись між імпульсами. Таким чином, аналіз цієї осцилограми дозволив верифікувати коректність номіналів елементів, що критично для стабільної роботи джерела живлення.

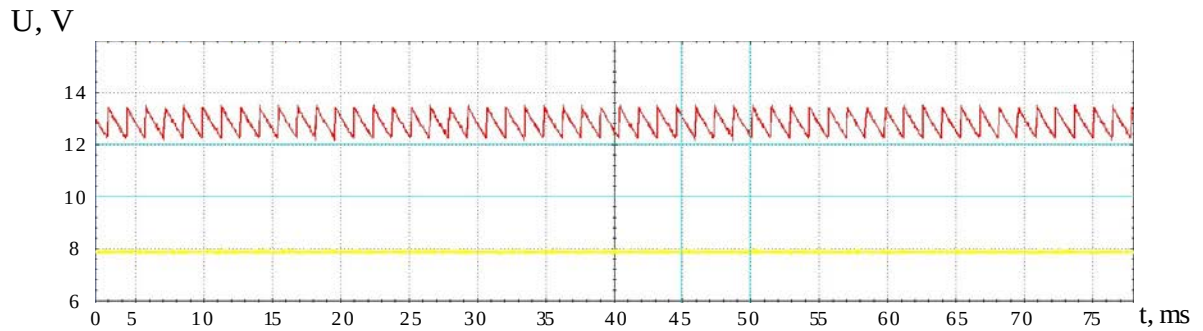


Рисунок 5.5 – Осцилограма надмірних пульсації на конденсаторах C501/C502

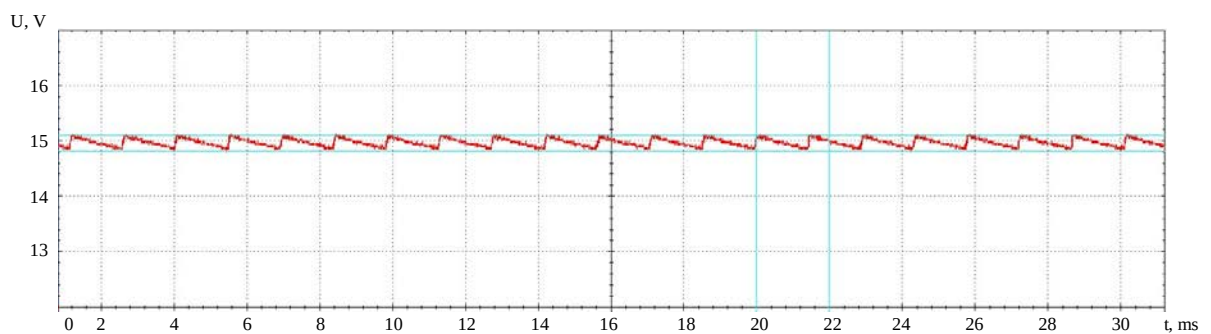


Рисунок 5.6 – Осцилограма коректних пульсації на конденсаторах C501/C502

5.3 Аналіз статичної характеристики

Для оцінки експлуатаційних якостей перетворювача Flyback було знято його зовнішню навантажувальну характеристику. На вихід перетворювача підключали активне навантаження у вигляді реостату, змінюючи споживаний струм, як приклад, на рисунку 5.8 показано осцилограму тестування навантаження.

Всі випробування проводилися при номінальній вхідній напрузі 24 В, а результати вимірювань записано в таблиці 5.1.

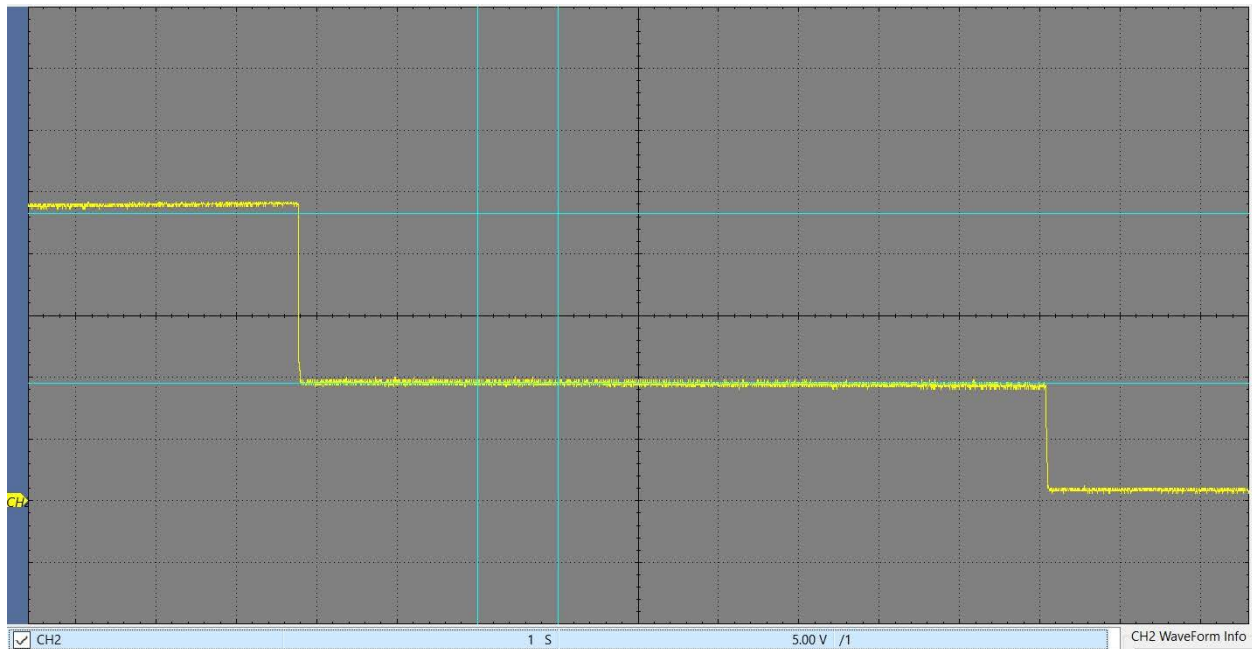


Рисунок 5.8 – Осцилограма напруги на виході при навантаженні 30 Ом

Таблиця 5.1 – Зафіксовані точки статичного навантаження

U_{вих} (В)	I_{вих} (А)	R_{нав} (Ом)	P_{вих} (Вт)
15,60	0,031	500	0,480
15,40	0,053	304	0,816
15,30	0,064	260	0,979
15,20	0,076	205	1,155
15,20	0,100	152	1,520
15	0,150	100	2,250
14,90	0,195	76	2,906
14,80	0,290	52	4,292
14,60	0,360	40	5,256
13,30	0,430	31	5,719
13,30	0,430	30	5,719
12,40	0,460	26,5	5,704
11,80	0,480	24	5,664

Випробування проводилися до струму близького до максимального. Навіть при такому навантаженні перетворювач продемонстрував стабільну роботу.

На основі представлених у таблиці значень побудовано вольт-амперну характеристику для схеми, показану на рисунку 5.9.

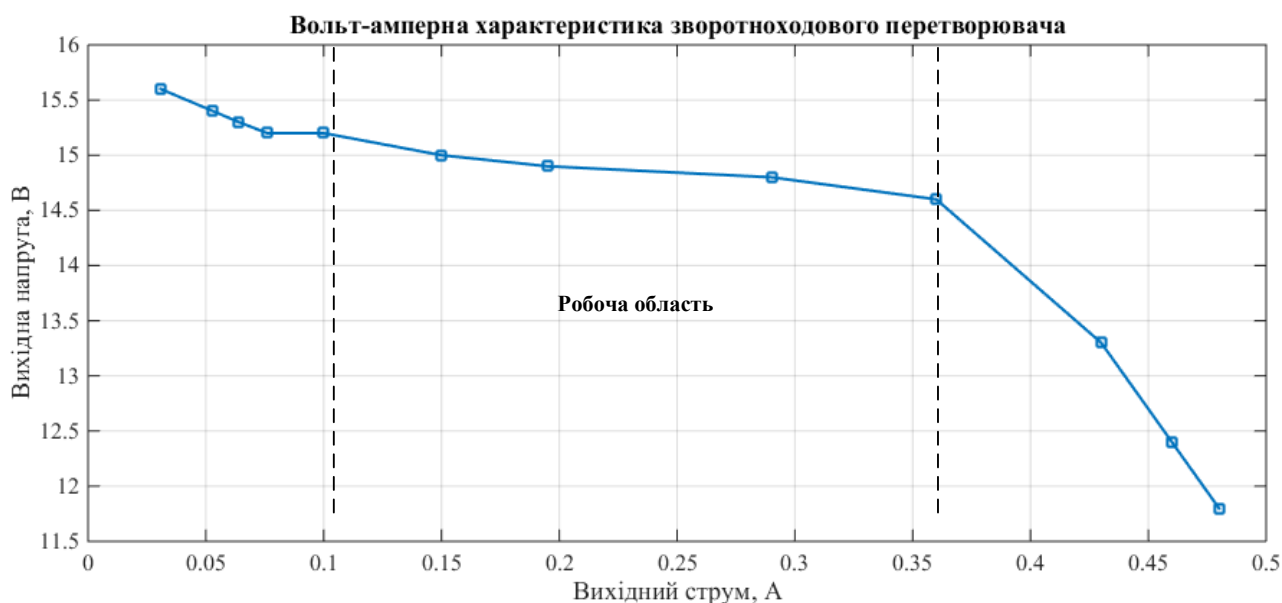


Рисунок 5.9 – Графік залежності $U_{\text{вих}} = f(I_{\text{out}})$

При збільшенні струму навантаження від 35 мА до 480 мА вихідна напруга перетворювача закономірно знижується з 14.6 В до 11.8 В. Таке падіння напруги характерне для імпульсних джерел живлення побудованих з первинним регулюванням по струму та розімкнутим контуром по вихідній напрузі.

Отримана вольт-амперна характеристика зворотного перетворювача повністю відповідає проєктним вимогам. Згідно з технічним завданням, ізольована частина має забезпечувати живлення двох виходів на 120 мА. Таким чином, сумарне очікуване навантаження становить 350 мА.

Як видно з графіків в робочій точці вихідна напруга перетворювача становить близько 15.3 В. Це підтверджує, що перетворювач не лише забезпечує необхідний струм, але й зберігає достатній запас по напрузі для стабільної роботи підсистеми.

Висновки розділу 5

Успішна верифікація роботи підсистем. Проведені поетапні випробування всіх основних вузлів плати підтвердили їхню повну працездатність.

Схема вхідного живлення та захисту, включаючи захист від зворотної полярності та плавкий запобіжник на 0.5 А, функціонує в точності відповідно до завдання. Поріг спрацьовування захисту відповідає номіналу, що гарантує безпеку при експлуатації.

Перетворювач DC/DC на MP1584EN стабільно формує напругу 3.3 В для мікроконтролера ESP32 при вхідній напрузі від 17 В, що задовольняє вимоги щодо живлення логічної частини. Напруга на модулі ESP32 перебуває в припустимих межах.

Зворотноходовий перетворювача (Flyback) успішно запускається при досягненні порогу UVLO та стабільно функціонує в усьому робочому діапазоні вхідної напруги. Внутрішні процеси не виходять за допустимі межі.

Для підтвердження розрахункових характеристик та відповідності завданню. Знята вольт-амперна характеристика перетворювача Flyback наочно демонструє його поведінку під навантаженням: перетворювач здатний віддавати потужність до 5.7 Вт при струмі близько 0.48 А, що відповідає завданню.

Всі випробування пройшли успішно. Апаратна частина підсистеми віддаленого вводу/виводу для вибухонебезпечних зон повністю відповідає вимогам технічного завдання. Отримані результати є підставою для переходу до етапу інтеграції програмного забезпечення та комплексного тестування функціоналу системи.

6 РОЗРОБКА WEB-ІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ

Після підтвердження працездатності апаратної частини виникає необхідність забезпечення її зручної конфігурації та інтеграції у сучасні системи автоматизації. У зв'язку з цим у даному розділі розглядається розробка web-інтерфейсу для керування та моніторингу підсистеми віддаленого вводу-виводу. Реалізація програмної частини дозволяє розширити функціональні можливості пристрою та забезпечити його відповідність концепції IIoT.

6.1 Вимоги до web-інтерфейсу підсистеми віддаленого вводу-виводу

Web-інтерфейс має надавати зручний та інтуїтивно зрозумілий спосіб конфігурації та візуалізації стану входів і виходів. Основна сторінка має бути візуально зрозумілою, містити графічне зображення модуля введення-виведення, на якому мають бути представлені всі доступні. Кожен канал повинен мати індикатор, що відображає його поточний стан (активний чи неактивний) та тип конфігурації. Для кожного з шести конфігурованих каналів користувач повинен мати можливість вибирати режим роботи з розширеного списку, що включає: Disabled (вимкнено); DI Sourcing (дискретний вхід, струмовий сигнал); DI Sinking (дискретний вхід, потенційний сигнал); DQ (дискретний вихід); AI 0..20mA (аналоговий вхід, діапазон 0-20 мА); AI 4..20mA (аналоговий вхід, діапазон 4-20 мА). Це забезпечить універсальність системи, дозволяючи адаптувати один апаратний модуль під різноманітні завдання моніторингу та керування, що є ключовим принципом IIoT-рішень.

Під час першого запуску або після апаратного скидання модуль працюватиме в режимі налаштування мережі. Варто реалізувати сторінку підключення до локальної мережі, де користувач зможе налаштувати основні мережеві параметри для інтеграції пристрою в інфраструктуру (вибір мережі

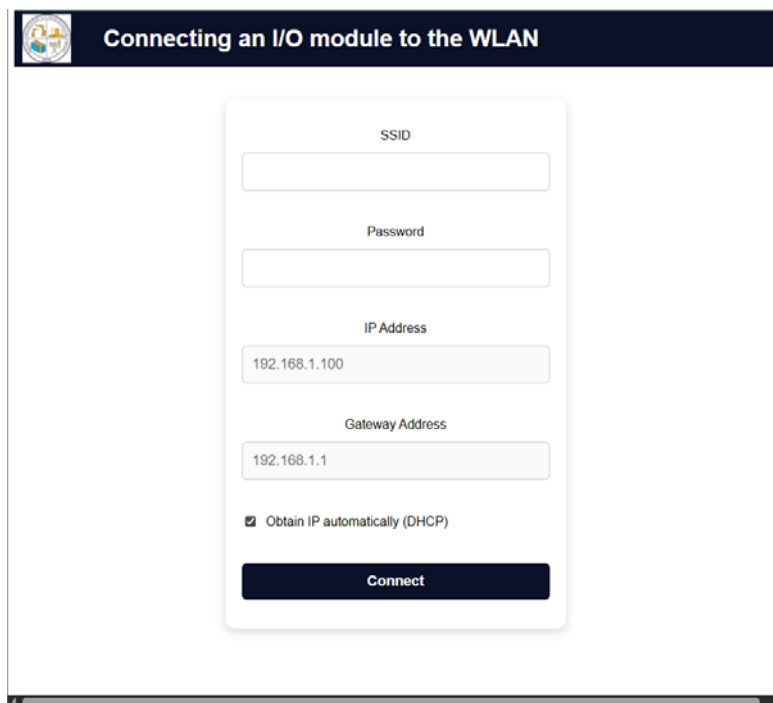
Wi-Fi, введення пароля, запис статичної IP-адреси). Це є необхідним для забезпечення фізичної зв'язності пристрою.

Система безпеки має бути заснована на обов'язковій автентифікації. Доступ до інтерфейсу налаштувань має починатися зі сторінки логіну для введення даних. Після успішного входу користувач отримує доступ до основної панелі моніторингу та конфігурації та окремої сторінки налаштування мережевого підключення.

6.2 Огляд реалізованого веб-інтерфейсу

Інтуїтивно зрозумілий і функціональний веб-інтерфейс забезпечить повний цикл взаємодії користувача з пристроєм — від моніторингу до гнучкого налаштування параметрів кожного каналу. Зручний доступ через будь-який веб-браузер, значно спрощує можливості взаємодії з апаратною платформою без необхідності використання спеціалізованого програмного забезпечення. В основі роботи лежить клієнт-серверна архітектура, де модуль ESP32 виконує роль веб-сервера та обробляє HTTP-запити.

Логіка роботи інтерфейсу починається з перевірки наявності підключення до локальної мережі. При першому запуску або при відсутності збережених мережевих налаштувань система автоматично переходить у режим точки доступу (Access Point), створює власну WiFi-мережу "IO-Wifi-manager". У цьому режимі користувач отримує доступ до сторінки налаштування WiFi, показаної на рисунку 6.1, де може ввести параметри своєї локальної мережі.



Connecting an I/O module to the WLAN

SSID

Password

IP Address

192.168.1.100

Gateway Address

192.168.1.1

☒ Obtain IP automatically (DHCP)

Connect

Рисунок 6.1 – Вигляд сторінки налаштування доступу до локальної мережі

Сторінка WiFi Manager створена для конфігурації мережевих параметрів. Інтерфейс включає форму з обов'язковими полями для введення SSID та пароля WiFi-мережі, а також розширені налаштування для вибору між динамічним (DHCP) та статичним отриманням IP-адреси. Для користувачів, які вибирають статичну адресацію, надаються додаткові поля для введення IP-адреси пристрою, адреси шлюзу та маски підмережі.

Після збереження налаштувань система автоматично ініціює перезавантаження та спробу підключення до вказаної мережі. У разі успіху користувач перенаправляється на головну сторінку, у разі невдачі — залишається можливість повторного заповнення форми.

SSID

drozd

Password

.....

IP Address

192.168.1.100

Gateway Address

192.168.1.1

☒ Obtain IP automatically (DHCP)

Connect

Connect

 **Connecting to WiFi network: drozd**
Please wait...

Рисунок 6.2 – Вигляд елементів сторінки при з'єднанні до мережі

Після успішного підключення пристрій отримує IP-адресу, на активній сторінці відображає відповідне повідомлення з інформацією про підключення, показано на рисунку 6.3.

☒ Obtain IP automatically (DHCP)

Connect

Successfully connected to WiFi!

IP Address: 192.168.0.101

Gateway: 192.168.0.1

DHCP Mode Active
IP address may change after restart. Check your router's device list.

Access the device at: <http://192.168.0.101>

Restart Device Now

Device is restarting...

Since DHCP is enabled, the device may get a different IP address.

After restart:

1. Check your router's connected devices list
2. Look for device named "ESP32" or similar
3. Use that IP address to access the device

Current IP: 192.168.0.101

This page can be closed now.

Рисунок 6.3 – Вигляд сторінки при успішному з'єднанні з мережею

У випадку перезавантаження, якщо збережені мережеві налаштування є та вони вірні. Пристрій підключиться до вказаної мережі автоматично.

Для забезпечення безпеки системи реалізовано веб-автентифікацію на сторінці «Login» (рис. 6.4), де користувач повинен ввести логін та пароль (за замовчуванням admin та admin123). Після успішної автентифікації встановлюється доступ до головної сторінки керування (рис. 6.5).

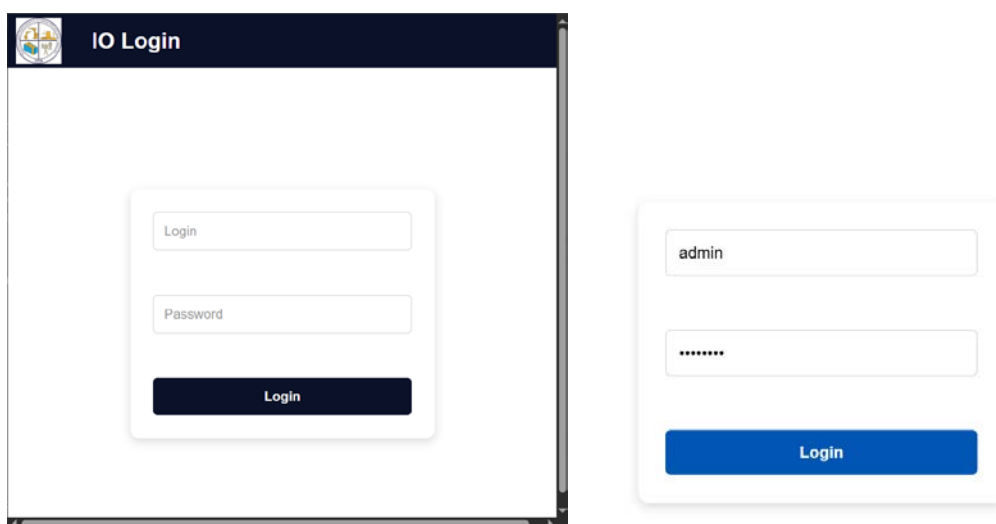


Рисунок 6.4 – Сторінка «Login» для входу на основну

На основній сторінці реалізовано механізм виходу (logout), який розриває автентифікований доступ та перенаправляє користувача на сторінку входу. Такий підхід забезпечує захист від несанкціонованого доступу та дозволяє обмежити права доступу для різних категорій користувачів у майбутніх модифікаціях системи.

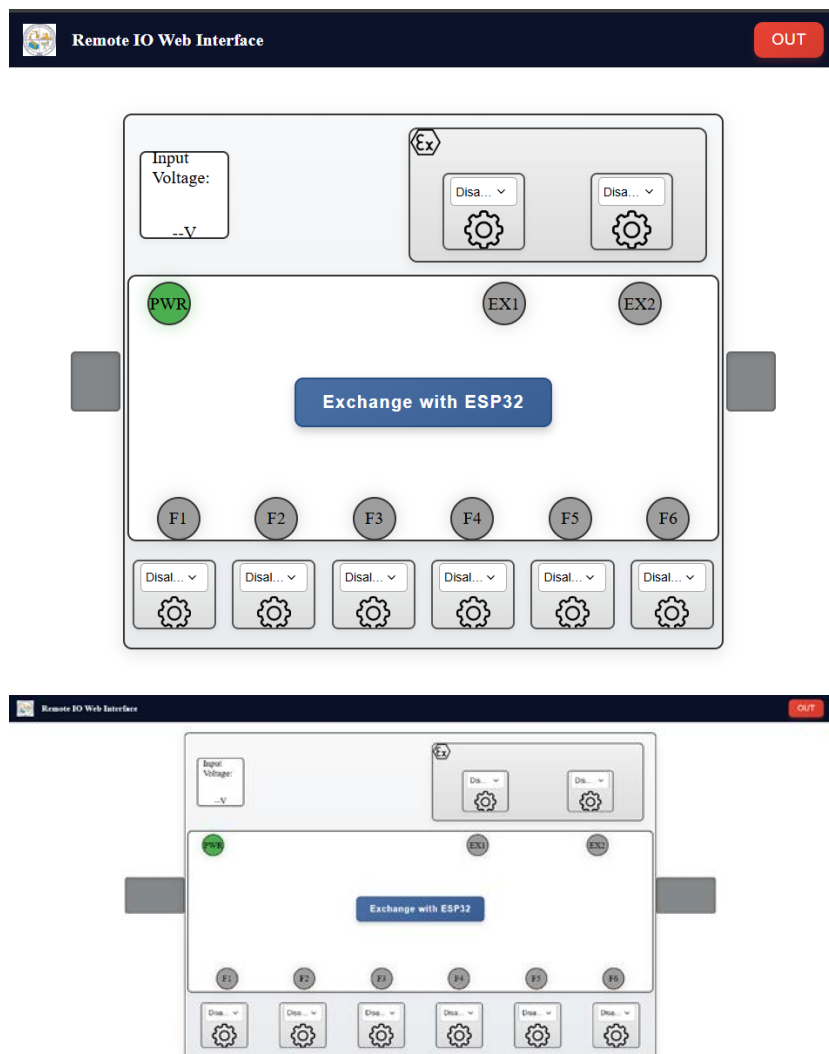


Рисунок 6.5 – Вигляд головної сторінки різного формату

Головною сторінкою є сторінка керування, яка реалізує інтуїтивний інтерфейс для моніторингу та конфігурації пристрою. Візуальна структура сторінки імітує фізичну компоновку пристрою, що спрощує розуміння оператору.

Приділено увагу візуальній індикації стану системи. Кожен канал обладнаний світлодіодним індикатором, який змінює колір залежно від режиму роботи: зелений для активних каналів, сірий для вимкнених, червоний для станів помилки.

Для шести входів-виходів надається вибір із шести режимів роботи: вимкнений (Disabled), цифровий вхід з джерелом струму (DI Sourcing), цифровий вхід зі стоком струму (DI Sinking), цифровий вихід (DQ),

аналоговий вхід 0-20 мА (AI 0..20mA) та аналоговий вхід 4-20 мА (AI 4..20mA). Для двох вибухозахищених входів-виходів доступні чотири режими (без аналогових входів).

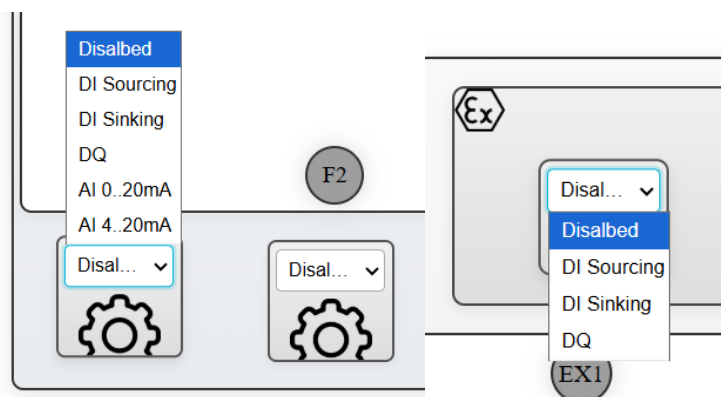


Рисунок 6.6 – Вигляд розгорнутих списків

Вибір режиму здійснюється через розгорнути списки, що забезпечує зручність та швидкість налаштування. Кожен режим показаний відповідним зображенням (рис.6.7), що полегшує візуальну ідентифікацію конфігурації.

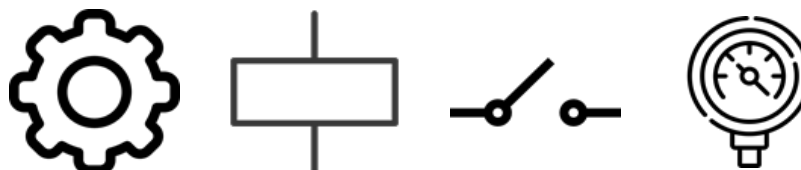


Рисунок 6.7 – Символи що використовуються для візуального сприйняття

Важливо відзначити, що зміна конфігурації відбувається у два етапи: спочатку параметри зберігаються в пам'яті ESP32, а потім активація відбувається при натисканні кнопки "Exchange with ESP32". Такий підхід запобігає випадковим змінам та дозволяє перевірити всі налаштування перед застосуванням.

При виборі відповідної конфігурації над кожним індикатором відображається поточне значення (рис.6.8) — для цифрових входів це стан 0

чи 1, для аналогових — значення струму у міліамперах з точністю до двох знаків після коми.

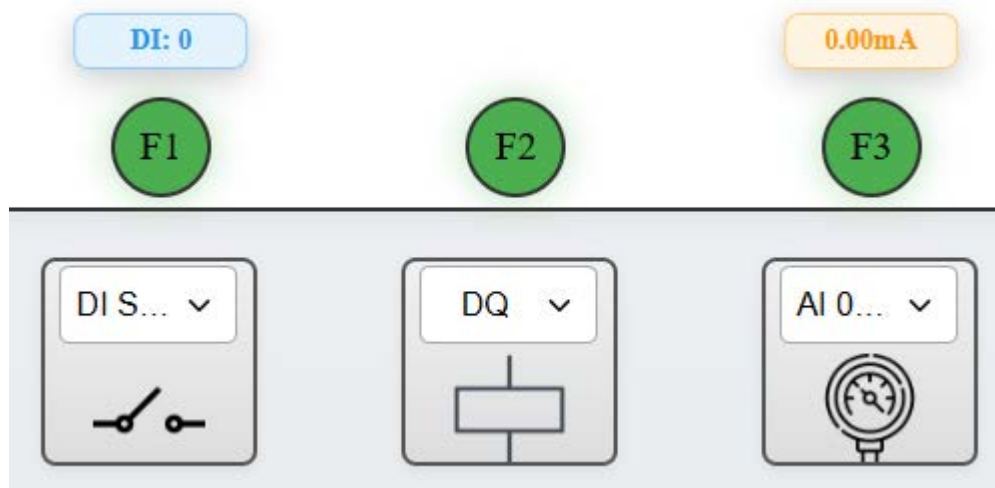


Рисунок 6.8 – Індикатор та поточне значення відповідно до конфігурації

Система реалізує двосторонній механізм обміну даними між веб-інтерфейсом та модулем. З боку клієнта використовується технологія AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) для асинхронного запиту даних без перезавантаження сторінки. Дані передаються у форматі JSON, що забезпечує ефективність та легкість обробки.

Для конфігурації пристрою реалізовано протокол передачі, який включає два етапи: спочатку передаються біти стану, потім — біти конфігурації. Така послідовність забезпечує правильну ініціалізацію апаратних компонентів. Для моніторингу реалізовано періодичне оновлення значень, що забезпечує актуальність інформації на дисплеї оператора.

Архітектура веб-інтерфейсу спроектована з розрахунком на подальшу модернізацію програмного коду та розширення функціоналу інтерфейсу.

Висновки розділу 6

Розроблений веб-інтерфейс для керування пристроєм віддаленого вводу/виводу забезпечує інтуїтивне керування апаратними конфігураціями через простий браузерний інтерфейс, що значно спрощує процес налаштування. Гнучка архітектура, що поєднує стабільність ESP32 як платформи та веб-технології для інтерфейсу користувача, створює основу для подальшого розвитку системи. Можливість віддаленого керування через мережу, поєднана з механізмами безпеки та надійності, робить розроблене рішення придатним для використання у промислових системах автоматизації.

Подальший розвиток системи може включати інтеграцію з хмарними сервісами, реалізацію механізмів записування, додаткового моніторингу чи аналізу, що робить платформу перспективною для широкого спектру застосувань у сфері промислової автоматизації.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Наявність працездатного апаратно-програмного рішення створює передумови для його практичного використання та впровадження у промислових умовах. У цьому розділі розглядаються питання комерціалізації розробленої підсистеми віддаленого вводу-виводу у форматі стартап-проєкту. Проведено аналіз ринкових можливостей, конкурентного середовища та сформовано базову бізнес-модель запропонованого рішення.

7.1 Інформаційна карта стартап-проєкту

Стартап-проєкт «Interface Module with IoT» передбачає розроблення інноваційного апаратно-програмного модуля для промислової автоматизації, що забезпечує віддалений ввід/вивід сигналів (Remote I/O) та підтримку IoT-технологій. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям цифровізації промисловості, що активно впроваджуються провідними міжнародними компаніями в рамках концепції Індустрії 4.0. Для узагальнення ключових характеристик проєкту у межах підрозділу сформовано інформаційну карту стартапу, яка подана далі у вигляді таблиць з пояснювальним текстом.

У таблиці 6.1 наведено базову інформацію про стартап, включаючи його стратегічну спрямованість, сферу використання та тип продукту. Ці відомості відображають загальну ідею та концепцію стартапу, визначають його позиціонування на ринку індустріальної автоматизації.

Таблиця 7.1 – Основні відомості про стартап-проєкт

Показник	Опис
Назва проєкту	Interface Module with IoT
Тип проєкту	Стартап у сфері промислової автоматизації
Сфера застосування	Індустрія 4.0, промислові системи керування, Remote I/O
Форма реалізації	Апаратно-програмний модуль
Стратегічна спрямованість	Підтримка інноваційної цифровізації виробництва, відповідність трендам великих промислових компаній

Складено автором на основі власних досліджень.

Для обґрунтування необхідності впровадження проєкту виконано аналіз проблем, з якими стикаються підприємства при експлуатації застарілих систем автоматизації. Сформульовані проблеми є відправною точкою для визначення споживчої цінності майбутнього продукту. Узагальнення наведено в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Ключові проблеми, що формують актуальність стартапу

Проблема	Опис прояву	Наслідки для підприємств
Застарілі системи автоматизації	Використання централізованих контролерів без IoT	Низька гнучкість, висока вартість модернізації
Відсутність доступних Remote I/O рішень	Імпортні аналоги дорогі та мають довгі терміни поставки	Затримки проєктів автоматизації
Низька інтегрованість у Smart Factory	Старе обладнання не підтримує Wi-Fi, хмарні сервіси	Обмеження цифрової трансформації
Складність монтажу	Велика кількість кабелів, відсутність діагностики	Зростання витрат і ризику аварій

Складено автором на основі власних досліджень.

Як бачимо з таблиці, ключові проблеми підприємств тісно пов'язані з відсутністю гнучких Remote I/O модулів, що і визначає ринкову нішу майбутнього продукту.

На основі виявлених проблем сформовано мету проєкту та перелік конкретних завдань, що забезпечують її досягнення. Таблиця 6.3 систематизує основні елементи планування.

Таблиця 7.3 – Мета та завдання стартап-проєкту

Елемент	Зміст
Мета проєкту	Створити універсальну апаратну частину підсистеми віддаленого вводу/виводу для промислових систем керування в тому числі для застосування у вибухонебезпечній зоні
Завдання	1. Розробити апаратну частину модуля; 2. Реалізувати підтримку Wi-Fi та веб-інтерфейс; 3. Забезпечити роботу 6 конфігурованих DIQ та 2 Ex-каналів; 4. Провести тестування; 5. Створити MVP (Minimum Viable Product); 6. Підготувати документацію та сертифікацію

Складено автором на основі власних досліджень.

Таким чином, завдання повністю відповідають технічним вимогам до пристрою та логіці його створення.

Оскільки майбутній продукт є апаратно-програмним пристроєм, важливим є формалізоване подання його технічних характеристик. Вони відображають функціональність, архітектуру та споживчі можливості.

Таблиця 7.4 – Технічні характеристики

Параметр	Значення
Тип пристрою	Пристрій віддаленого вводу/виводу
Робоча напруга	24 V DC
Монтаж	DIN-рейка TH 35
Підключення	Wi-Fi, режим точки доступу
Користувацький інтерфейс	Веб-сервер
Індикація станів	LED за NAMUR NE 107
Кількість входів/виходів	6 DIQ (цифрові входи/виходи, аналогові)
Можливість розташування в зонах	2 (зона 2/22)
Захисні функції	Від КЗ, зворотної полярності, перенапруги
Температура роботи	0...55°C

Складено автором на основі власних досліджень.

Для більш глибокого розкриття ціннісної пропозиції підсумовано ключові продуктово-орієнтовані особливості пристрою (таблиця 6.5).

Таблиця 7.5 – Продуктові особливості та їх переваги

Особливість	Переваги для споживача
Програмно-конфігуровані канали	Один модуль виконує функції DI/DO/AI
Веб-інтерфейс	Відсутність потреби у встановленні додаткового ПЗ
Wi-Fi AP	Можливість локальної діагностики
Ех-функціонал	Використання у вибухонебезпечних зонах

Складено автором на основі власних досліджень.

Важливо визначити, хто саме є потенційними користувачами продукту. Цільові сегменти подано в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Цільові сегменти та їх потреби

Сегмент	Характеристика	Потреби, які закриває продукт
Промислові підприємства	Обладнання та виробничі лінії	Модернізація, Remote I/O
Інтегратори автоматизації	SCADA/PLC рішення	Швидка інтеграція
Виробники обладнання (OEM)	Вбудовані технології	ІоТ-функціональність
Smart Factory компанії	Цифрові системи	ІоТ-збір даних
ІоТ стартапи	Модулі для нових продуктів	Готова платформа

Складено автором на основі власних досліджень.

Процес розроблення стартапу передбачає послідовне виконання етапів, наведене у таблиці 7.7.

Таблиця 7.7 – Основні етапи створення MVP

Етап	Зміст	Результат
1	Аналіз вимог	Технічне завдання
2	Розробка апаратної частини	Прототип плати
3	Розробка програмного коду	Базова функціональність
4	Створення веб-інтерфейсу	Панель моніторингу
5	Тестування	Перевірка роботи каналів
6	MVP	Робочий прототип
7	Пілотний запуск	Впровадження та модернізація

Складено автором на основі власних досліджень.

Завершальним елементом інформаційної карти є визначення ресурсів та прогнозованих результатів, що узагальнено у таблицях 6.8-6.9.

Таблиця 7.8 – Ресурсне забезпечення стартапу

Ресурс	Потреба
Інженер-розробник апаратної частини	Розробка схеми, плати
Інженер-розробник програмної частини	Розробка програмного коду
Розробник веб-UI	Створення інтерфейсу
Тестове обладнання	Лабораторні стенди
Фінансування	Матеріали, виробництво, сертифікація

Складено автором на основі власних досліджень.

Очікувані результати, наведені в таблиці 7.9, відображають потенційну ефективність упровадження пристрою у промислових системах керування. Зменшення витрат підприємств на рівні до 30% є обґрунтованим при переході від традиційних централізованих систем вводу/виводу до розподілених IoT-рішень. Це дозволяє суттєво скоротити витрати на кабельну інфраструктуру, монтаж та подальше технічне обслуговування, а також мінімізувати необхідність використання спеціалізованих контролерів.

Таблиця 7.9 – Очікувані результати

Показник	Очікуване значення
Зменшення витрат підприємств	до 30%
Прискорення монтажу	до 30%
Підвищення зручності збору даних	45%
Окупність проєкту	2–3 роки
Масштабованість	Розширення функціоналу пристроїв

Складено автором на основі власних досліджень.

Прискорення монтажу систем автоматизації до 30% досягається завдяки модульності пристрою, використанню стандартного DIN-рейкового кріплення, наявності Wi-Fi для початкової конфігурації та зменшенню кількості польових з'єднань. Віддалений доступ до конфігурації та діагностики дозволяє оперативно усувати несправності без зупинки обладнання, що особливо важливо для підприємств із безперервним циклом виробництва.

Підвищення зручності збору даних на 45% зумовлене використанням віддаленого доступу. Це дає можливість підвищити якість управлінських рішень на основі отриманої інформації, а також забезпечує можливість глибшої аналітики процесів.

Окупність проєкту в межах 2-3 років є реалістичним прогнозом з огляду на невисоку собівартість виробництва пристрою, широку сферу його застосування та зростаючий попит на промислові IoT-рішення. Додаткову

економічну вигоду забезпечує можливість серійного виробництва та удосконалення шляхом зміни програмного коду.

Крім того, важливою перевагою є масштабованість проєкту. Реалізація MVP створює базу для подальшого розширення продуктової лінійки, включаючи модулі різних конфігурацій відповідно потреб підприємств. Це відкриває перспективи комерціалізації не лише окремого пристрою, а цілої екосистеми рішень для цифрової трансформації виробництва.

Отже, представлена інформаційна карта стартап-проєкту забезпечує комплексне бачення його сутності, можливостей та перспектив, а також підтверджує доцільність реалізації рішення в умовах сучасної цифрової трансформації промисловості.

7.2 Бізнес-модель стартапу

У межах розроблення стартап-проєкту важливим етапом є створення бізнес-моделі, яка відображає логіку формування цінності, шляхи взаємодії з клієнтами та механізм отримання доходів. Для структуризації ключових елементів бізнес-моделі використано методологію Business Model Canvas, що охоплює дев'ять взаємопов'язаних блоків: ціннісну пропозицію, сегменти споживачів, канали збуту, взаємовідносини з клієнтами, ключові ресурси, ключові види діяльності, партнерів, структуру витрат і потоки доходів.

Застосування канвасу дає змогу комплексно оцінити позиціонування продукту на ринку, визначити стратегічні пріоритети та сформуванати цілісне бачення комерціалізації пристрою. На рисунку 7.1 наведено бізнес-модель стартап-проєкту, побудовану з урахуванням специфіки промислового сектору, технічних вимог до продукту та тенденцій розвитку Індустрії 4.0.



Рисунок 7.1 – Business Model Canvas

Подана бізнес-модель дозволяє чітко окреслити місце стартапу на ринку та визначити умови його успішного розвитку. Ціннісна пропозиція базується на поєднанні функціональної універсальності, низької вартості та простоти інтеграції, що робить продукт конкурентоспроможним у порівнянні з наявними рішеннями. Водночас виділені сегменти споживачів формують широке поле потенційного застосування – від промислових підприємств до виробників обладнання та інтеграторів автоматизації.

Ключові ресурси та види діяльності показують, що основний акцент зосереджено на R&D, тестуванні та виробництві, тоді як партнерська мережа забезпечує доступ до необхідних технологій, компонентів і каналів збуту. Структура витрат підтверджує, що найбільшу частку займають розробка та сертифікація, що є характерним для високотехнологічних продуктів. При цьому модель доходів включає як прямі продажі, так і можливість масштабування через OEM-поставки та додаткові сервіси.

Отже, Business Model Canvas демонструє цілісність і реалістичність бізнес-моделі стартапу. Її реалізація забезпечує потенціал комерційного успіху продукту, можливість подальшого розвитку лінійки IoT-пристроїв і формування конкурентної позиції на ринку рішень для промислової автоматизації.

7.3 Аналіз ринкових можливостей та конкурентного середовища

Сучасний ринок промислової автоматизації характеризується швидким зростанням попиту на автономні IoT-рішення, орієнтовані на збір даних, дистанційний моніторинг та гнучку інтеграцію у виробничу інфраструктуру. Традиційні системи централізованого керування на базі PLC поступово доповнюються пристроями класу Remote I/O з вбудованими бездротовими засобами комунікації, що дозволяє зменшити залежність від кабельної інфраструктури та скоротити витрати на модернізацію. У цьому контексті

пристрій відповідає тенденції переходу від класичних автоматизованих систем до архітектур типу Smart Factory.

Сегмент ІоТ демонструє стабільне зростання, обумовлене цифровою трансформацією промислових підприємств в тому числі галузей що мають норми підвищеної вибухонебезпечності. Для підтвердження відповідності продукту ринковим очікуванням сформовано таблицю порівняння вимог та характеристик модуля.

Таблиця 7.10 – Технічні вимоги ринку та відповідність продукту

Вимога ринку	Пояснення	Відповідність модулю
Бездротова передача даних (Wi-Fi)	Зменшує потребу в кабельній інфраструктурі	Повна (вбудований Wi-Fi AP)
Веб-інтерфейс без ПЗ	Налаштування через браузер	Так
Гнучкі ІО (DI/DO/AI)	Один модуль – кілька типів сигналів	6 конфігурованих DIQ
Потреба автоматизації вибухонебезпечних виробництв	Потреба в пристроях з можливістю використання у вибухонебезпечних ронах	2 Ех-канали зона 2/22
Легка інтеграція	Мінімальні витрати на впровадження	Так
Доступна вартість	Зменшення витрат підприємства	Нижча за імпорتنі аналоги

Складено автором на основі власних досліджень.

Ринок представлений обмеженою кількістю рішень, більшість яких орієнтована на дорогі системи автоматизації великих підприємств. У той час як конкуренти зосереджені на інтеграції в складні PLC-архітектури, розроблений модуль є автономним пристроєм, що не вимагає контролера для роботи.

Розроблений модуль формує окрему нішу автономних Wi-Fi ІоТ-вузлів, які не потребують повноцінної PLC-системи та мають нижчу вартість у порівнянні з імпортними аналогами.

Для формування цілісного бачення перспектив стартап-проекту важливо не лише оцінити характеристику ринку та конкурентів, але й проаналізувати внутрішні та зовнішні фактори, що впливають на реалізацію продукту. Такий

аналіз дозволяє визначити стратегічні пріоритети, сформувавши реалістичний план розвитку та мінімізувати потенційні ризики.

Метод SWOT дає змогу структуровано дослідити сильні та слабкі сторони продукту, а також ринкові можливості та загрози, які можуть виникати в процесі комерціалізації. Проведення цього аналізу є важливим етапом при розробці маркетингової стратегії, оскільки він допомагає зрозуміти, на яких конкурентних перевагах варто зосередитись.

Нижче наведений розширений SWOT-аналіз для пристроя «Interface Module with IoT», що враховує його технічні, ринкові та організаційні особливості.

Таблиця 7.11 – SWOT-аналіз

Компонент	Опис
Сильні сторони (Strengths)	Wi-Fi AP, веб-конфігурація, Ех-канали, низька собівартість, гнучкі DIQ, локальна підтримка
Слабкі сторони (Weaknesses)	Мала впізнаваність бренду, необхідність сертифікації для ЄС, обмежені маркетингові ресурси
Можливості (Opportunities)	Зростання IIoT, імпортозаміщення, попит на швидку модернізацію, можливість експорту
Загрози (Threats)	Глобальні конкуренти, ринкова нестабільність, регуляторні вимоги

Складено автором на основі власних досліджень.

Отримані результати SWOT-аналізу демонструють, що «Interface Module with IoT» має чітко виражені конкурентні переваги саме у сегменті бездротових рішень для збору даних та контролю сигналів. Поєднання низької вартості, автономності та зручності інтеграції формує сильну ринкову позицію продукту.

Слабкою стороною, є потреба у сертифікації, але може бути компенсована детальним тестуванням. Натомість виявлені ринкові можливості – розвиток IIoT для виробництв в тому числі для роботи в вибухонебезпечних зонах та попит на недорогі рішення створюють сприятливі умови для масштабування проєкту.

Аналіз загроз свідчить про необхідність формування гнучкої стратегії, що враховуватиме конкуренцію та можливі зміни ринкових умов. Разом із тим, продукт має високий потенціал для закріплення у своїй ринковій ніші та подальшого розвитку.

7.4 Маркетингова стратегія

Маркетингова стратегія є ключовим інструментом формування конкурентних переваг та забезпечення успішного виходу стартап-проекту на ринок. Для пристрою «Interface Module with IoT», що належить до класу Wi-Fi Remote I/O модулів, стратегія має враховувати як технічні особливості продукту, так і специфіку ринку промислової автоматизації. На відміну від стандартних промислових модулів, даний пристрій робить акцент на підтримці IoT та конфігурованості DIQ та використанню у вибухонебезпечних галузях, що дозволяє сформувати окрему ринкову нішу.

Концепція просування ґрунтується на тому, що продукт вирішує ключові проблеми галузевих підприємств – модернізації обладнання, складність інтеграції та низьку гнучкість традиційних систем автоматизації. Таким чином, маркетингова стратегія спрямована на позиціонування модуля як технологічного інструменту для швидкої модернізації автоматизованих систем у вибухонебезпечних середовищах.

Основні принципи стратегії:

- фокус на практичній цінності, та технічних характеристиках;
- гнучкість інтеграції завдяки Wi-Fi, веб-інтерфейсу та конфігурованими DIQ;
- акцент на використанні у вибухонебезпечних зонах, що підвищує цінність у специфічних галузях.

Цей підхід дозволяє позиціонувати продукт одночасно у сегменті IoT і промислової автоматизації, що значно розширює ринкові можливості.

Позиціонування базується на трьох ключових повідомленнях:

1. Простота впровадження

Модуль не вимагає дорогого PLC, спеціалізованого програмного забезпечення або складної мережевої інфраструктури. Wi-Fi AP та веб-інтерфейс дозволяють легко виконати налаштування.

2. Автономність і бездротовість

На ринку мало пристроїв, що поєднують промислову надійність із можливістю роботи як бездротовий вузол збору даних.

3. Доступна альтернатива існуючим пристроям

Доступна ціна та локальна підтримка з можливістю модернізації роблять продукт привабливим для підприємств.

З огляду на характеристику продукту та результати аналізу ринку, визначено ключові цільові сегменти: промислові підприємства нафтогазового сектору, IoT-стартапи та компанії, що займаються впровадженням концепцій Smart Factory. Для кожного сегмента продукт забезпечує окремі переваги – від швидкого розгортання інфраструктури до можливості використання модуля як складової більших систем.

Для систематизації маркетингової стратегії використано класичну модель 4P (Product, Price, Place, Promotion), яка наведена у таблиці 7.12.

Таблиця 7.12 – Модель 4P для пристрою

Елемент	Характеристика
Product (продукт)	Автономний Wi-Fi Remote I/O модуль з DIQ та Ex-каналами; веб-інтерфейс; промислова надійність
Price (ціна)	На 30–50% нижча за імпорتنі аналоги; доступна виробнича собівартість;
Place (місце збуту)	Прямі B2B-продажі, системні інтегратори, OEM-партнери, онлайн-платформи, спеціалізовані каталоги
Promotion (просування)	Виставки, технічні демонстрації, вебінари, професійні статті, співпраця з університетами

Складено автором на основі власних досліджень.

Стратегія ціноутворення базується на поєднанні доступності, високої функціональної цінності та конкурентної переваги порівняно з міжнародними

аналогами. Для сегмента промислової автоматизації функціональність та ціна є одними із ключових факторів при ухваленні рішення про впровадження. Саме тому формування оптимальної, обґрунтованої та привабливої для ринку ціни має стратегічне значення для успішного запуску продукту.

Базова вартість модуля формується з урахуванням локальної збірки, відсутності логістичних накладних витрат, оптимізованої електронної платформи та значно нижчих витрат, ніж у міжнародних конкурентів. Це дозволяє позиціонувати продукт у сегменті доступних промислових IoT-рішень з підвищеною функціональністю.

Рекомендована ціна у 300–450 € забезпечує:

- цінову перевагу над міжнародними брендами;
- відповідність очікуванням підприємств щодо доступного IoT технологічного рішення;
- достатній рівень маржинальності для стартапу.

Після завершення етапу виходу на ринок можливе коригування ціни залежно від обсягів виробництва та модернізації проєкту за рахунок програмного коду.

Для стартапу критично важливо сформувати початкову групу користувачів. Для цього застосовується стратегія проникнення — встановлення нижчої ціни на старті для подолання бар'єру довіри, характерного для промислових клієнтів.

Висновки до розділу 7

Проведено комплексне дослідження та обґрунтування стартап-проєкту «Interface Module with IoT», спрямованого на розробку апаратно-програмного модуля для промислової автоматизації. В ході роботи було реалізовано системний підхід, що охопив всі ключові аспекти формування нового технологічного рішення – від концепції до стратегії виходу на ринок.

Глибокий аналіз виявлених галузевих проблем (застарілість інфраструктури, висока вартість та складність інтеграції існуючих рішень) дозволив чітко сформулювати споживчу цінність майбутнього продукту.

Виконана робота підтверджує, що стартап-проєкт «Interface Module with IoT» є технологічно обґрунтованим, економічно доцільним та ринково перспективним. Він має чітко визначену ціннісну пропозицію, цільову аудиторію та реалістичну стратегію комерціалізації. Реалізація цього проєкту може стати кроком у забезпеченні українських та міжнародних промислових підприємств сучасними, доступними та гнучкими рішеннями для їхньої цифрової трансформації, сприяючи підвищенню ефективності, конкурентоспроможності та технологічного суверенітету.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено комплексну розробку апаратної частини підсистеми віддаленого вводу-виводу для автоматизації технологічних процесів у вибухонебезпечних зонах із застосуванням сучасних IoT-технологій. В результаті теоретичного аналізу та експериментальних досліджень отримано наступні результати:

1. На основі аналітичного огляду систем автоматизації та вимог нормативної бази сформовано комплексні технічні вимоги підсистеми віддаленого вводу-виводу для експлуатації у вибухонебезпечних зонах. Ці вимоги охоплюють забезпечення іскробезпеки, електромагнітної сумісності, надійності та функціональної гнучкості.

2. Розроблено та обґрунтовано архітектуру апаратної частини, яка поєднує універсальні програмно-конфігуровані I/O-канали з окремими вибухозахищеними Ex-каналами, що мають гальванічну ізоляцію. Це забезпечує безпечне з'єднання з датчиками та виконавчими механізмами у вибухонебезпечній зоні та централізованою системою керування у безпечній зоні.

3. Створені схемотехнічного рішення системи живлення, що забезпечує стабільну роботу при широкому діапазоні вхідної напруги ($24\text{ В} \pm 25\%$), захист від переполюсовки, короткочасних провалів напруги та суворе обмеження енергії, що передається у вибухонебезпечну частину.

4. Удосконаленні підходу до реалізації Ex-каналів типу Ex іс шляхом комплексного застосування ізольованого DC/DC-перетворювача, оптронної розв'язки та прецизійних схем обмеження струму та напруги, що підвищує рівень іскробезпеки.

5. Отриманні результатів комп'ютерного моделювання в spice-симуляторі LTspice та експериментальних випробувань прототипу, які підтвердили працездатність імпульсного перетворювача, ефективність захистів та відповідність електричних характеристик поставленим вимогам.

6. Демонстрації можливості повноцінної ПоТ-інтеграції завдяки вбудованому мікроконтролеру з підтримкою мережевого стека та web-інтерфейсу для дистанційної конфігурації та моніторингу, що розширює функціонал традиційних модулів вводу-виводу.

7. Експериментальні дослідження розробленого прототипу підсистеми підтвердили його основні функціональні можливості щодо збору, перетворення аналогових і дискретних сигналів, стабільності роботи системи живлення та ефективності гальванічної ізоляції. Отримані характеристики відповідають критеріям технічного завдання.

8. Оцінено можливість практичного застосування розробленої апаратної частини, зокрема її інтеграції в розподілені системи автоматизації та ПоТ-рішення. Показано, що запропонований підхід може бути використаний як основа для створення промислових модулів віддаленого вводу-виводу для вибухонебезпечних виробництв.

9. Встановлено практичне значення результатів роботи, яке полягає в можливості прямого використання розроблених схемотехнічних та конструктивних рішень для:

1. Створення серійних промислових модулів віддаленого I/O для вибухонебезпечних зон (класи 2, 22).
2. Проєктування стабільних джерел живлення та іскробезпечних інтерфейсів для широкого кола промислових пристроїв.
3. Виготовлення дослідних зразків на основі готових принципових схем та конструкції друкованої плати.
4. Використання отриманих даних моделювання для подальшої оптимізації енергоефективності та надійності.
5. Адаптації реалізованого web-інтерфейсу як шаблону для ПоТ-пристроїв промислового призначення.
6. Використання матеріалів дослідження в навчальному процесі для підготовки фахівців електротехнічних спеціальностей та як основи для подальших наукових розробок.

Отримані результати підтверджують, що досягнення поставленої мети магістерської дисертації – розроблення, дослідження та експериментальне обґрунтування апаратної частини вибухозахищеної підсистеми віддаленого вводу-виводу – виконано шляхом повного виконання поставлених завдань. Результати підтверджують ефективність запропонованих рішень, їх відповідність нормативним вимогам та перспективність практичного використання для подальшого вдосконалення апаратних засобів автоматизації, а також у навчальному процесі та дослідно-конструкторських роботах .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інститут електродинаміки НАН України [Електронний ресурс]. – URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Інститут_електродинаміки_НАН_України (дата звернення: 08.09.2025).
2. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine [Електронний ресурс]. – URL: <https://ied.org.ua/> (дата звернення: 08.09.2025).
3. The Internet Gopher Protocol (a Distributed Document Search and Retrieval Protocol) [Електронний ресурс]. – IETF RFC 1436. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1436> (дата звернення: 08.09.2025).
4. Berners-Lee, T., Cailliau, R. WorldWideWeb: Proposal for a HyperText Project. CERN, 1990. – The little-known story of the first IoT device [Електронний ресурс]. – IBM. – URL: <https://www.ibm.com/blogs/industries/littleknown-story-first-iot-device/> (дата звернення: 08.09.2025).
5. Weiser, M. The Computer for the 21st Century. Scientific American, September 1991.
6. Ashton, K. That “Internet of Things” Thing. RFID Journal, 2009.
7. International Telecommunication Union. Overview of the Internet of Things. Recommendation ITU-T Y.2060, June 2012.
8. Van Kranenburg, R. The Internet of Things: A Critique of Ambient Technology and the All-Seeing Network of RFID. Amsterdam: Institute of Network Cultures, 2007.
9. Internet of Things (IoT) [Електронний ресурс]. – IT Enterprise. – URL: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/internet-veschej-internet-of-things-iot> (дата звернення: 09.09.2025).
10. In/Out Output Modules Explained [Електронний ресурс]. – Shoplogix. – URL: <https://shoplogix.com/inout-output-modules-explained/> (дата звернення: 09.09.2025).

11. I/O Modules Overview [Електронний ресурс]. – AT Automation. – URL: <https://www.at-automation.nl/en/knowledge-base/i-o/> (дата звернення: 09.09.2025).
12. Understanding Remote I/O [Електронний ресурс]. – Festo Blog. – URL: https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/blog/innovation/understanding-remote-i-o-id_2048677/ (дата звернення: 10.09.2025).
13. What is an I/O Module and its Crucial Role in Industrial Automation [Електронний ресурс]. – ITG India. – URL: <https://www.itgindia.com/blogs/what-is-an-i-o-module-and-its-crucial-role-in-industrial-automation/> (дата звернення: 10.09.2025).
14. IO-Link Communication [Електронний ресурс]. – Siemens. – URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industrial-communication/io-link.html> (дата звернення: 10.09.2025).
15. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок [Електронний ресурс]. – URL: <https://ukrstone.org/files/NPAOP/40.1-1.32-01.pdf> (дата звернення: 17.09.2025).
16. ДСТУ EN 60079-10-2:2016 Атмосфери вибухонебезпечні. Частина 10-2. Класифікація зон – вибухонебезпечні пилові атмосфери [Електронний ресурс]. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78105 (дата звернення: 17.09.2025).
17. UNE EN 60079-10-2:2016 Explosive Atmospheres. Classification of Areas [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-60079-10-2-2016-explosive-atmospheres-part-10-2-classification-of-areas-explosive-dust-atmospheres/> (дата звернення: 28.09.2025).
18. FAQ: Explosion Hazardous Areas (Ex Zones) [Електронний ресурс]. – Atexcertified.eu. – URL: <https://www.atexcertified.eu/faq-explosion-hazardous-areas-ex-zones/> (дата звернення: 28.09.2025).
19. Demystifying ATEX Certification [Електронний ресурс]. – Atexcertified.eu. – URL: <https://www.atexcertified.eu/demystifying-atex->

certification-the-key-to-choosing-reliable-and-safe-atex-certified-products/ (дата звернення: 28.09.2025).

20. Hazardous Area Zones [Електронний ресурс]. – Heating and Process. – URL: <https://www.heatingandprocess.com/product/hazardous-area-zones/> (дата звернення: 28.09.2025).

21. Explosive Atmospheres Safety and Reliability [Електронний ресурс]. – WEG. – URL: <https://www.weg.net.ua/pdf/w22x/WEG-explosive-atmospheres-safety-and-reliability-50056895-brochure-english-web.pdf> (дата звернення: 29.09.2025).

22. Equipment Protection Level [Електронний ресурс]. – Atexor. – URL: <https://www.atexor.com/knowledgebase/equipment-protection-level/> (дата звернення: 02.10.2025).

23. IECEx – International Electrotechnical Commission System for Certification to Standards Relating to Equipment for Use in Explosive Atmospheres [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.iecex.com/> (дата звернення: 02.10.2025).

24. Monolithic Power Systems. MP1584 Datasheet [Електронний ресурс]. — URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/551592/MPS/MP1584.html> (дата звернення: 5.10.2025).

25. SS54 : datasheet [Електронний ресурс]. – Microdiode Electronics. – URL: https://jlcpcb.com/partdetail/mdd_microdiode_electronics-SS54/C22452 (дата звернення: 08.10.2025).

26. C2838920 : datasheet [Електронний ресурс]. – JLCPCB. – URL: <https://jlcpcb.com/parts/componentSearch?searchTxt=C2838920> (дата звернення: 08.10.2025).

27. SMBJ30CA : datasheet [Електронний ресурс]. – Liown. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/Liown-SMBJ30CA/C2925441> (дата звернення: 08.10.2025).

28. YAGEO CC0603KRX7R9BB104 : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/YAGEO-CC0603KRX7R9BB104/C14663> (дата звернення: 08.10.2025).
29. Murata GRM21BR61H106ME43L : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/2283010-GRM21BR61H106ME43L/C2190942> (дата звернення: 08.10.2025).
30. SHOUHAN CYA063015UH : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/SHOUHAN-CYA063015UH/C5189959> (дата звернення: 08.10.2025).
31. KNSCHA RVE100UF35V67RV0072 : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/KNSCHA-RVE100UF35V67RV0072/C2836437> (дата звернення: 08.10.2025).
32. VO-0805_1_220 : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: https://jlcpcb.com/partdetail/VO-0805_1_220/C2889520 (дата звернення: 08.10.2025).
33. MP1584 : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/551592/MPS/MP1584.html> (дата звернення: 12.10.2025).
34. Flyback Converter Design and Calculation [Электронный ресурс]. – Passive Components. – URL: <https://passive-components.eu/flyback-converter-design-and-calculation/> (дата звернення: 12.10.2025).
35. Flyback Converter Design [Электронный ресурс]. – Simon Bramble. – URL: https://www.simonbramble.co.uk/dc_dc_converter_design/flyback_converter/flyback_converter_design.html (дата звернення: 12.10.2025).
36. UC3843 : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/25562/STMICROELECTRONICS/UC3843.html> (дата звернення: 15.10.2025).

37. TMS521 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.worldwayelec.com/pro/bourns-inc/tms521/5765499/tms521.pdf> (дата звернення: 18.10.2025).

38. Basic Parts Library [Электронный ресурс]. – JLCPCB. – URL: https://jlcpcb.com/parts/basic_parts (дата звернення: 18.10.2025).

39. Flyback Converter Application Note [Электронный ресурс]. – URL: <https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/sYigsOfdqoUsZCmB.pdf> (дата звернення: 18.10.2025).

40. Erickson, R. W., Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. 2nd ed. – Boston: Springer, 2001. – 915 p. ISBN 978-1-4757-0559-1.

41. HonorElec RVT1E101M0607 : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/HonorElec-RVT1E101M0607/C3338> (дата звернення: 18.10.2025).

42. HONORCAP [Электронный ресурс]. – JLCPCB. – URL: <https://jlcpcb.com/api/file/downloadByFileSystemAccessId/8588893169551618048> (дата звернення: 18.10.2025).

43. SSL36 : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/2893295-SSL36/C2763585> (дата звернення: 18.10.2025).

44. Design Guidelines for RCD Snubber of Flyback Converters [Электронный ресурс]. – Texas Instruments. – URL: https://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/196/Design-Guidelines-for-RCD-Snubber-of-Flyback-Converters_2D00_Fairchild-AN4147.pdf (дата звернення: 18.10.2025).

45. 1N4148W : datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/2456-1N4148W/C2099> (дата звернення: 18.10.2025).

46. IRLR120NTRPBF [Электронный ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/InfineonTechnologies-IRLR120NTRPBF/C2594> (дата звернення: 18.10.2025).

47. IRLR120NTRPBF [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/542732/IRF/IRLR120NTRPBF.html> (дата звернення: 18.10.2025).
48. CL10A105KB8NNNC [Електронний ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/16531-CL10A105KB8NNNC/C15849> (дата звернення: 18.10.2025).
49. BAW56 : datasheet [Електронний ресурс]. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/hongjiacheng-BAW56/C7502729> (дата звернення: 18.10.2025).
50. How Crowbar Circuits Work [Електронний ресурс]. – Cadence. – URL: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/how-crowbar-circuits-work> (дата звернення: 28.10.2025).
51. ESP32 WiFi модуль [Електронний ресурс] // Mini-Tech. – URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/esp32-wifi-modul> (дата звернення: 28.10.2025).
52. ESP32 [Електронний ресурс] // Вікіпедія. Вільна енциклопедія. – Електрон. дані. – URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ESP32> (дата звернення: 15.12.2025).
53. ESP-WROOM-32 [Електронний ресурс] / Espressif Systems. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 12.11.2025)
54. 74HC595. Datasheet [Електронний ресурс]/ ALLDATASHEET.COM. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/12198/ONSEMI/74HC595.html> (дата звернення: 12.11.2025).
55. 74HC08D,653 Quad 2-input AND [Електронний ресурс] / JLCPCB. – URL: <https://jlcpcb.com/partdetail/Nexperia-74HC08D653/C5593> (дата звернення: 12.11.2025)
56. Z-101. Корпуси з кріпленням на DIN-рейку [Електронний ресурс] // Maszczyk. – URL: https://www.maszczyk.pl/pokaz_produkt/obudowy-z-mocowaniem-na-szyne-z-101.html (дата звернення: 12.11.2025)

57. PCB Capabilities [Электронный ресурс] // JLCPCB. – URL: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities> (дата звернення: 12.11.2025).