

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом

Виконав: студент 4 курсу, групи РАс-41

спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

(шифр і назва спеціальності)

Пашковський Ю.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Паляниця Ю.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Хвостівська Л.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Дунець В.Л.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Дозорська О.Ф.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2026

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«28» квітня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Пашковському Юрію Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом

Керівник роботи Паляниця Юрій Богданович, к.т.н., доц. кафедри РТ  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «28» квітня 2026 року № 4/9-198.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи напруга живлення керуючих вузлів 5 В та 3,3 В; напруга живлення силового драйвера 15 В; інтерфейс передавання даних USB CDC; параметри каналу COM порту 115200 біт/с, 8N1; контроль температури цільового пристрою; можливість дистанційного налаштування режимів роботи.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 2. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Структурна схема

2. Схема електрична принципова

3. Креслення друкованої плати

4. Складальне креслення друкованого вузла

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності	д.т.н., професор кафедри МТ Барановський В.М.		
Основи охорони праці	к.т.н., доцент кафедри МТ Гурик О.Я.		

7. Дата видачі завдання 28.04.2026 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка та затвердження технічного завдання	28.04.2026 – 29.04.2026	<i>Виконано</i>
2.	Аналіз технічного завдання, підбір бібліографічних матеріалів, необхідних для виконання роботи	30.04.2026 – 03.05.2026	<i>Виконано</i>
3.	Аналіз сучасних систем лабораторних блоків живлення та методів їх цифрового керування	04.05.2026 – 06.05.2026	<i>Виконано</i>
4.	Розробка структурної схеми лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом	07.05.2026 – 10.05.2026	<i>Виконано</i>
5.	Розробка схеми електричної принципової	11.05.2026 – 14.05.2026	<i>Виконано</i>
6.	Розробка імпульсного блока живлення та вузла стабілізації напруги	15.05.2026 – 17.05.2026	<i>Виконано</i>
7.	Опис роботи керуючого модуля (STM32F103C8T6), інтерфейсу USB CDC та ШІМ-контролера TL494N	18.05.2026 – 21.05.2026	<i>Виконано</i>
8.	Розрахунок основних електричних параметрів пристрою	22.05.2026 – 24.05.2026	<i>Виконано</i>
9.	Вибір компонентної бази для розроблених схем	25.05.2026 – 27.05.2026	<i>Виконано</i>
10.	Компонування та трасування друкованого вузла лабораторного блока живлення	28.05.2026 – 30.05.2026	<i>Виконано</i>
11.	Розрахунок надійності проєктованого виробу та параметрів друкованого монтажу	31.05.2026 – 01.06.2026	<i>Виконано</i>
12.	Розробка конструкторської документації на лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом	02.06.2026 – 04.06.2026	<i>Виконано</i>
13.	Розділ безпеки життєдіяльності, основи охорони праці	05.06.2026	<i>Виконано</i>
14.	Нормоконтроль	09.06.2026	<i>Виконано</i>
15.	Перевірка кваліфікаційної роботи на плагіат	10.06.2026	<i>Виконано</i>
16.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	10.06.2026	<i>Виконано</i>
17.	Захист кваліфікаційної роботи	24.06.2026	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Пашковський Ю.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Паляниця Ю.Б.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом». Кваліфікаційна робота бакалавра // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РАС-41 // Тернопіль, 2026 р. // с.- , рис.- , табл.- , бібліогр.- , додат.- .

Ключові слова: ЛАБОРАТОРНИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ, USB CDC, STM32, ІМПУЛЬСНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ, ШІМ КЕРУВАННЯ, TL494, НАПІВМОСТОВИЙ ІНВЕРТОР, ЦИФРОВЕ КЕРУВАННЯ.

У кваліфікаційній роботі розглянуто проектування лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом та цифровою системою керування. Проаналізовано сучасні лабораторні джерела живлення, принципи побудови імпульсних перетворювачів напруги та засоби комп'ютерного керування електронними пристроями. Обґрунтовано вибір структурної та принципової схем на основі ШІМ контролера TL494, драйверів UCC37322 і мікроконтролера STM32F103C8T6.

Особливістю розробки є цифрове керування через USB інтерфейс із використанням USB CDC, що забезпечує віртуальний COM порт на персональному комп'ютері. Передбачено дистанційне налаштування режимів роботи, моніторинг температури радіаторів силових транзисторів і контроль температури зовнішнього об'єкта за допомогою сенсорів DS18B20.

Результатом роботи є лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом, що забезпечує стабілізоване живлення, цифрове керування, температурний моніторинг і зручність експлуатації. Розроблені рішення можуть бути використані в лабораторних, навчальних і промислових джерелах живлення.

## ANNOTATION

Theme of the qualification work: "Laboratory power supply with a USB interface". Bachelor's qualification work // Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, group RAs-41 // Ternopil, 2026 // p.- , fig.- , tabl.- , bibliog.- , annexes.- .

Keywords: LABORATORY POWER SUPPLY, USB CDC, STM32, SWITCHING POWER SUPPLY, PWM CONTROL, TL494, HALF-BRIDGE INVERTER, DIGITAL CONTROL.

The qualification work examines the design of a laboratory power supply with a USB interface and a digital control system. It analyzes modern laboratory power supplies, the principles of switching voltage converters, and methods of computer-based control of electronic devices. The selection of the block diagram and schematic based on the TL494 PWM controller, UCC37322 drivers, and the STM32F103C8T6 microcontroller is justified.

A distinctive feature of the design is digital control via a USB interface using USB CDC, which provides a virtual COM port on a personal computer. The system allows for remote configuration of operating modes, monitoring of the temperature of power transistor heat sinks, and monitoring of the temperature of an external object using DS18B20 sensors.

The result of this work is a laboratory power supply with a USB interface that provides a stabilized power supply, digital control, temperature monitoring, and ease of use. The developed solutions can be used in laboratory, educational, and industrial power supplies.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

COM-порт (англ. Communication Port) – Послідовний комунікаційний порт.

CRC (англ. Cyclic Redundancy Check) – Циклічний контроль надлишковості.

EEPROM (англ. Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) – Електрично перепрограмована постійна пам'ять.

EMI (англ. Electromagnetic Interference) – Електромагнітні завади.

ESD (англ. Electrostatic Discharge) – Електростатичний розряд.

FLASH (англ. Flash Memory) – Енергонезалежна флеш-пам'ять програм.

GPIO (англ. General Purpose Input Output) – Універсальний порт введення-виведення.

IGBT (англ. Insulated Gate Bipolar Transistor) – Біполярний транзистор з ізолюваним затвором.

LED (англ. Light Emitting Diode) – Світлодіод.

NTC (англ. Negative Temperature Coefficient) – Терморезистор з від'ємним температурним коефіцієнтом.

PWM (англ. Pulse Width Modulation) – Широтно-імпульсна модуляція.

RAM (англ. Random Access Memory) – Оперативна пам'ять.

UART (англ. Universal Asynchronous Receiver Transmitter) – Універсальний асинхронний приймач-передавач.

USB (англ. Universal Serial Bus) – Універсальна послідовна шина.

USB CDC (англ. Universal Serial Bus Communication Device Class) – Клас пристроїв віртуального послідовного порту.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1.ОСНОВНА ЧАСТИНА .....	10
1.1. Аналіз технічного завдання .....	10
1.1.1. Обґрунтування актуальності теми.....	10
1.1.2. Аналіз інформації.....	16
1.2. Проектування схемотехнічне.....	18
1.2.1. Розроблення й розрахунок структурної схеми виробу .....	18
1.2.2. Проектування та розрахунок ЕЗ .....	27
1.3. Проектування конструкторське.....	51
1.3.1. Розроблення компонування й конструкції ДВ.....	51
1.3.2. Оптимізація компонування ДВ.....	53
1.3.3. Розрахунок та забезпечення вимог щодо надійності .....	56
1.4. Висновки до розділу 1 .....	61
РОЗДІЛ 2.БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ. 64	
2.1. Ризик як кількісна оцінка небезпек.....	64
2.2. Долікарська допомога при ураженні електричним струмом.....	67
2.3. Висновок до розділу 2 .....	70
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74
ДОДАТКИ	

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Пашковський Ю.В.			Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Паляниця Ю.Б.				6	76	
Рецензент		Дозорська О.Ф.				ТНТУ, ФПТ, каф. РТ, гр. РАС-41, м. Тернопіль		
Н. Контр.		Хвостівська Л.В.						
Затверд.		Дунець В.Л.						

## ВСТУП

Сучасний розвиток електронної техніки, автоматизованих систем керування та мікропроцесорних засобів оброблення інформації зумовлює постійне зростання вимог до джерел електроживлення, які використовуються під час розроблення, налагодження та дослідження електронних пристроїв. Лабораторні блоки живлення є невід'ємною складовою будь якої дослідницької лабораторії, виробничої дільниці або сервісного центру, оскільки забезпечують живлення експериментальних зразків, електронних модулів та вимірювального обладнання. Від характеристик джерела живлення значною мірою залежать точність проведення експериментів, стабільність роботи досліджуваних пристроїв та безпека виконання робіт. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення сучасних лабораторних блоків живлення, які поєднують високі енергетичні показники з можливістю програмного керування та дистанційного моніторингу параметрів роботи.

Традиційні лабораторні джерела живлення здебільшого базуються на аналогових принципах керування та передбачають використання механічних органів регулювання для встановлення вихідних параметрів. Незважаючи на простоту реалізації, такі рішення мають обмежені функціональні можливості, не забезпечують автоматизованого керування режимами роботи та не дозволяють інтегрувати пристрій у сучасні комп'ютеризовані вимірювальні комплекси. Крім того, більшість доступних комерційних рішень із розширеним функціоналом характеризуються значною вартістю та складністю конструкції, що обмежує їх використання в навчальних лабораторіях, невеликих виробництвах і приватних майстернях. Тому актуальним напрямом розвитку є створення лабораторних блоків живлення, які поєднують ефективні силові перетворювачі, цифрові засоби керування та універсальні інтерфейси зв'язку з персональним комп'ютером.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основою розроблюваного пристрою є високочастотний імпульсний перетворювач напівмостового типу, побудований на базі спеціалізованого ШІМ контролера TL494N та силових IGBT транзисторів FGH60N60SMD [7]. Застосування імпульсного принципу перетворення енергії дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії, зменшити масогабаритні показники силових компонентів та забезпечити широкі можливості регулювання параметрів вихідного сигналу [11]. Для керування силовими ключами використано високошвидкісні драйвери UCC37322P та трансформаторну ГР, що забезпечує електричне відокремлення низьковольтної частини керування від силового каскаду та підвищує безпеку експлуатації пристрою.

Важливою особливістю розробки є використання мікроконтролерного модуля STM32F103C8T6, який виконує функції цифрового керування та забезпечує взаємодію з користувачем через інтерфейс USB. Передавання даних здійснюється за допомогою протоколу USB CDC, який дозволяє реалізувати на стороні персонального комп'ютера віртуальний COM порт.

Додатковою перевагою пристрою є реалізація функцій температурного контролю на базі цифрових сенсорів DS18B20. Перший датчик використовується для безперервного моніторингу температури радіаторів силових транзисторів, що дозволяє своєчасно виявляти перевантаження та запобігати перегріву силового каскаду. Другий датчик призначений для контролю температури зовнішнього пристрою або досліджуваного об'єкта, підключеного користувачем до лабораторного блока живлення. Завдяки цьому розроблена система виконує не лише функції джерела живлення, але й функції вимірювально-контрольного комплексу, що значно розширює її практичні можливості.

Особливістю розроблюваного лабораторного блока живлення є можливість програмного формування різних режимів роботи перетворювача. Залежно від завдань користувача можуть генеруватися сигнали синусоїдальної, прямокутної, трапецієподібної або пилкоподібної форми. Це

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє використовувати пристрій не тільки як джерело електроживлення, а й як універсальний експериментальний стенд для дослідження процесів у силовій електроніці, системах керування та електротехнічних об'єктах.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом, який забезпечує програмне керування режимами роботи силового перетворювача, дистанційне налаштування параметрів через персональний комп'ютер та моніторинг температурних режимів внутрішніх і зовнішніх об'єктів. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз сучасних схемотехнічних рішень лабораторних джерел живлення та інтерфейсів цифрового керування. Наступним етапом є обґрунтування вибору структури силового перетворювача, розроблення структурної та електричної принципової схем пристрою, вибір елементної бази та визначення параметрів основних функціональних вузлів. Також необхідно виконати розрахунок силових та керувальних кіл, розробити програмно апаратний інтерфейс обміну даними через USB CDC, реалізувати систему температурного моніторингу та забезпечити надійний захист пристрою від аварійних режимів роботи. Завершальним етапом є розроблення конструктивного виконання пристрою та аналіз його експлуатаційних характеристик.

Практичне значення роботи полягає у створенні універсального лабораторного блока живлення з розширеними можливостями програмного керування, який може використовуватися в навчальному процесі, науково дослідних лабораторіях, сервісних центрах та невеликих виробництвах. Реалізація USB інтерфейсу, цифрового моніторингу параметрів та гнучкого налаштування режимів роботи дозволяє підвищити зручність експлуатації, точність керування та ефективність проведення експериментальних досліджень, що відповідає сучасним тенденціям розвитку електронної апаратури та систем електроживлення.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# РОЗДІЛ 1. ОСНОВНА ЧАСТИНА

## 1.1. Аналіз технічного завдання

### 1.1.1. Обґрунтування актуальності теми

Лабораторні блоки живлення є одним із найбільш важливих видів обладнання, що використовується під час розроблення, налагодження, випробування та дослідження електронних пристроїв. Вони забезпечують формування стабільних параметрів електроживлення для електронних схем, вимірювальної апаратури, мікроконтролерних систем та силових модулів. Від точності підтримання вихідної напруги та струму значною мірою залежать достовірність результатів експериментів, надійність функціонування досліджуваних пристроїв та безпека проведення робіт. У зв'язку зі стрімким розвитком електроніки та вбудованих систем постійно зростають вимоги до функціональних можливостей лабораторних джерел живлення, що зумовлює необхідність удосконалення їх конструкції та впровадження сучасних засобів цифрового керування.

Традиційні лінійні джерела живлення базуються на використанні силового мережевого трансформатора, випрямляча та аналогового стабілізатора напруги. Основними перевагами таких пристроїв є низький рівень пульсацій вихідної напруги, простота схемотехнічної реалізації та висока стабільність параметрів. Водночас значна маса трансформатора, порівняно низький коефіцієнт корисної дії та підвищені теплові втрати обмежують можливості використання лінійних джерел живлення у високопотужних системах.

Імпульсні джерела живлення здійснюють перетворення енергії на підвищених частотах комутації силових ключів. Завдяки цьому забезпечується істотне зменшення габаритів магнітних компонентів, підвищення коефіцієнта корисної дії та розширення діапазону регулювання вихідних параметрів. Саме

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тому імпульсні технології сьогодні домінують у більшості сучасних джерел живлення промислового та лабораторного призначення [1].

Подальшим етапом розвитку лабораторних джерел живлення стало впровадження цифрових систем керування. Використання мікроконтролерів дозволяє реалізувати програмне регулювання вихідних параметрів, автоматичне виконання послідовностей налаштувань, моніторинг робочих режимів та дистанційний контроль роботи пристрою. Такі можливості є особливо важливими під час проведення наукових досліджень, автоматизованих випробувань електронної апаратури та лабораторних експериментів, де виникає необхідність багаторазового відтворення однакових режимів роботи або оперативної зміни параметрів живлення.

Особливого поширення в сучасних лабораторних джерелах живлення набули цифрові інтерфейси зв'язку, серед яких найбільш універсальним є USB. Використання USB інтерфейсу дозволяє забезпечити безпосередню взаємодію блока живлення з персональним комп'ютером без застосування додаткових адаптерів або спеціалізованих комунікаційних модулів.

На ринку електронного обладнання представлено широкий спектр програмованих лабораторних блоків живлення різних виробників, серед яких особливої уваги заслуговують рішення компаній Siglent Technologies, Rigol Technologies, Keysight Technologies, Rohde and Schwarz, Korad Technology, GW Instek, UNI-T, Tektronix та Keithley Instruments. Більшість сучасних моделей підтримують дистанційне керування через USB, Ethernet або RS-232 інтерфейси, мають вбудовані системи захисту та забезпечують програмне встановлення параметрів вихідної напруги й струму.

Незважаючи на значний рівень розвитку промислових лабораторних джерел живлення, більшість комерційних рішень орієнтовані насамперед на виконання функцій стабілізованого джерела постійної напруги. При цьому можливості модифікації алгоритмів роботи, дослідження процесів керування силовими перетворювачами та інтеграції додаткових вимірювальних функцій

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

часто є обмеженими або потребують використання дорогого спеціалізованого обладнання.

Актуальність розроблення лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом обумовлена необхідністю створення універсальної програмно керованої платформи, яка поєднує функції джерела живлення, генератора керувальних сигналів, засобу дистанційного керування та системи моніторингу параметрів роботи. Використання мікроконтролера STM32F103C8T6 забезпечує широкі можливості програмної модифікації функціоналу пристрою, а застосування USB CDC інтерфейсу дозволяє організувати ефективну взаємодію з персональним комп'ютером через віртуальний COM порт [12].

Додатковою перевагою розроблюваного пристрою є реалізація температурного моніторингу силових елементів та зовнішніх об'єктів за допомогою цифрових датчиків DS18B20. Такий підхід підвищує надійність експлуатації системи, дозволяє контролювати тепловий режим роботи силового каскаду та забезпечує можливість проведення експериментальних досліджень із одночасним вимірюванням температурних параметрів навантаження.

Розроблення лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом є актуальним завданням сучасної електроніки, спрямованим на поєднання високої енергоефективності імпульсних перетворювачів із перевагами цифрового керування, дистанційного моніторингу та програмної конфігурації режимів роботи. Реалізація такого пристрою дозволяє підвищити ефективність проведення лабораторних досліджень, розширити функціональні можливості випробувального обладнання та забезпечити відповідність сучасним тенденціям розвитку електронної апаратури.

Одним із найбільш поширених сучасних програмованих лабораторних блоків живлення є Siglent SPD3303X. Пристрій належить до професійного класу вимірювального обладнання та призначений для використання у

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

науково дослідних лабораторіях, навчальних закладах і виробничих центрах. Джерело живлення має три незалежні вихідні канали, з яких два забезпечують регулювання напруги в межах від 0 до 32 В при струмі до 3,2 А, а третій формує фіксовані напруги 2,5 В, 3,3 В або 5 В. Загальна вихідна потужність становить 220 Вт. Зовнішній вигляд продукту наведено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Лабораторний блок живлення Siglent SPD3303X

Особливістю даної моделі є підтримка дистанційного програмування через USB інтерфейс та можливість керування від персонального комп'ютера. Прилад забезпечує роздільну роботу каналів, а також режими послідовного та паралельного з'єднання виходів. Для відображення параметрів використовується кольоровий TFT дисплей з можливістю відображення графічної інформації та часових діаграм. Передбачені функції захисту від короткого замикання, перевантаження за струмом та перенапруги.

Порівняно з розробленим лабораторним блоком живлення пристрій Siglent SPD3303X забезпечує високоточне регулювання стабілізованої постійної напруги, однак не підтримує формування різних форм сигналів та не має вбудованої системи температурного моніторингу зовнішніх об'єктів.

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

Іншим відомим представником даного класу обладнання є Rigol DP832, який широко використовується в електронних лабораторіях і сервісних центрах. Джерело живлення має три незалежні вихідні канали з максимальними параметрами 30 В та 3 А для двох основних каналів і 5 В при 3 А для допоміжного каналу. Прилад характеризується низьким рівнем шумів та пульсацій, високою стабільністю вихідних параметрів і підтримкою дистанційного програмування. Зовнішній вигляд продукту наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Блок живлення Rigol DP832,

Конструкція передбачає наявність USB Device, USB Host та додаткових інтерфейсів LAN, RS232 і Digital IO. Завдяки цьому блок живлення може інтегруватися до автоматизованих вимірювальних систем та використовуватися в режимі віддаленого керування. Пристрій підтримує програмування вихідних параметрів, збереження налаштувань та виконання автоматизованих послідовностей випробувань. Також реалізовано захист від перевищення струму, перенапруги та перегріву.

Порівняно з розроблюваною системою Rigol DP832 орієнтований виключно на функції високоточного джерела постійної напруги та не

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ	

забезпечує генерацію сигналів різної форми. Водночас він має вищу метрологічну точність та розширені промислові інтерфейси зв'язку.

До більш доступного цінового сегмента належить Korad KA3005P. Даний лабораторний блок живлення забезпечує регулювання напруги від 0 до 30 В та струму до 5 А. Особливістю моделі є можливість дистанційного керування через USB інтерфейс із використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Зовнішній вигляд продукту наведено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Лабораторний блок живлення Korad KA3005P

Пристрій підтримує режими стабілізації напруги та струму, має цифрове керування, пам'ять налаштувань, захист від перевищення струму та перенапруги, а також можливість програмування вихідних параметрів з персонального комп'ютера. Завдяки невисокій вартості модель отримала значне поширення серед радіоаматорів, навчальних лабораторій та невеликих ремонтних майстерень.

На відміну від Korad KA3005P, розроблюваний лабораторний блок живлення передбачає використання мікроконтролерної системи STM32F103C8T6, можливість реалізації різних алгоритмів формування керувальних сигналів, температурний моніторинг двох незалежних об'єктів та

									Арк.
									15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

гнучку модифікацію програмного забезпечення відповідно до потреб користувача.

Проведений аналіз показує, що сучасний ринок лабораторних джерел живлення пропонує широкий спектр програмованих пристроїв із підтримкою USB інтерфейсів та дистанційного керування. Найбільш близькими за функціональним призначенням до розроблюваного виробу є Siglent SPD3303X, Rigol DP832 та Korad KA3005P. Усі розглянуті аналоги підтримують програмне керування через USB та дозволяють змінювати параметри вихідної напруги й струму з персонального комп'ютера. Проте більшість комерційних рішень орієнтовані переважно на формування стабілізованої постійної напруги та не забезпечують реалізацію експериментальних режимів роботи силового перетворювача.

Перевагою розроблюваного лабораторного блока живлення є поєднання функцій програмованого джерела живлення, цифрової системи моніторингу температури, USB CDC інтерфейсу з віртуальним COM портом та можливості формування різних форм керувального сигналу. Це дозволяє розглядати пристрій не лише як джерело електроживлення, а й як універсальну дослідницьку платформу для вивчення процесів у силовій електроніці та системах керування.

### 1.1.2. Аналіз інформації

Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом належить до класу програмованих джерел електроживлення, призначених для живлення, налагодження та дослідження електронних пристроїв. Особливістю виробу є поєднання імпульсного силового перетворювача на базі ШІМ контролера TL494N із цифровою системою керування на основі мікроконтролера STM32F103C8T6 та можливістю дистанційного налаштування параметрів через USB інтерфейс.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умови експлуатації виробу повинні відповідати вимогам ДСТУ 15150 для кліматичного виконання УХЛ 4.2, що передбачає використання пристрою в лабораторних та інших опалюваних приміщеннях за температури навколишнього середовища від 10 до 35 °С та відносної вологості до 80 % при температурі 25 °С.

Конструкція пристрою повинна забезпечувати електричне розділення силової та керуючої частин, що досягається застосуванням імпульсного трансформатора та ГР між силовими ключами і мікроконтролерною системою керування. Під час проектування необхідно дотримуватися вимог електробезпеки, електромагнітної сумісності та надійності електронної апаратури.

Передавання даних між персональним комп'ютером та пристроєм здійснюється через інтерфейс USB із реалізацією класу USB CDC, що дозволяє створити віртуальний COM порт та забезпечити сумісність із сучасними операційними системами. Через хост програму користувач може задавати режими роботи перетворювача, змінювати параметри керування та здійснювати моніторинг температурних режимів.

Надійність виробу забезпечується використанням сучасної елементної бази та вибором режимів роботи елементів із необхідним запасом за напругою, струмом і потужністю. Вимоги до показників надійності доцільно приймати відповідно до ДСТУ ГОСТ 23145, при цьому імовірність безвідмовної роботи повинна становити не менше 0,9, а напрацювання на відмову не менше 10000 годин.

Основні технічні характеристики розроблюваного пристрою повинні відповідати таким вимогам:

- напруга живлення керуючих вузлів 5 В та 3,3 В;
- напруга живлення драйверів та ШІМ контролера 15 В;
- інтерфейс обміну даними USB CDC;

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– параметри віртуального COM порту 115200 біт/с, 8 біт даних, без контролю парності, 1 стоповий біт;

– контроль температури силових транзисторів та зовнішнього об'єкта за допомогою датчиків DS18B20;

– можливість формування синусоїдального, прямокутного, трапецієподібного та пилкоподібного сигналів та сигналу, що змінюється за довільним законом заданим користувачем через хост програму;

– дистанційне керування через персональний комп'ютер.

Підчас проєктування необхідно забезпечити раціональне компоновання елементів, зручність монтажу, технічного обслуговування та тепловідведення від силових компонентів. Конструкція повинна відповідати вимогам технологічності, надійності та економічної доцільності, що забезпечить конкурентоспроможність виробу та можливість його використання в навчальних лабораторіях, сервісних центрах і дослідницьких комплексах.

## 1.2. Проєктування схемотехнічне

### 1.2.1. Розроблення й розрахунок структурної схеми виробу

Структурна схема лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом наведена на рисунку 1.4. Вона відображає функціональний склад пристрою та взаємозв'язки між окремими вузлами, що беруть участь у процесі формування, керування та перетворення електричної енергії. Побудова структурної схеми виконана за модульним принципом, відповідно до якого кожний функціональний вузол реалізує окрему задачу та взаємодіє з іншими блоками через стандартизовані інформаційні або енергетичні канали. Такий підхід дозволяє спростити процес проєктування, підвищити надійність системи та забезпечити можливість подальшої модернізації окремих функціональних частин без суттєвих змін загальної архітектури пристрою.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

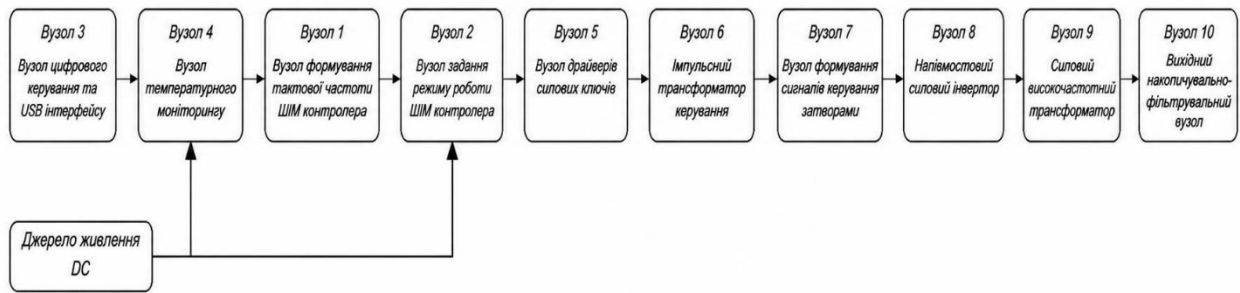


Рисунок 1.4 – Структурна схема лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом

Основою системи керування є вузол цифрового керування та USB інтерфейсу, реалізований на базі мікроконтролера STM32F103C8T6. Даний вузол забезпечує взаємодію між користувачем і силовою частиною пристрою через інтерфейс USB. Обмін даними здійснюється за технологією USB CDC, що дозволяє операційній системі персонального комп'ютера розпізнавати пристрій як віртуальний послідовний порт без необхідності використання спеціалізованого обладнання. Завдяки цьому користувач отримує можливість дистанційно змінювати параметри роботи лабораторного блока живлення, вибирати режим функціонування, задавати форму вихідного сигналу та здійснювати моніторинг поточного стану системи.

Для забезпечення безпечної експлуатації пристрою передбачено вузол температурного моніторингу. Його функціонування реалізується за допомогою цифрових температурних сенсорів DS18B20, які здійснюють безперервний контроль теплового стану окремих елементів конструкції. Один із датчиків використовується для вимірювання температури радіаторів силових транзисторів, що дозволяє своєчасно виявляти перевищення допустимого теплового режиму силового каскаду. Другий датчик призначений для контролю температури зовнішнього об'єкта або навантаження, яке підключається користувачем. Отримані дані передаються до мікроконтролера, де виконуються їх аналіз та формування відповідних захисних алгоритмів [3].

Формування параметрів роботи силового перетворювача здійснюється двома взаємопов'язаними функціональними блоками. Перший із них являє собою вузол формування тактової частоти ШІМ контролера, який визначає базову частоту роботи імпульсної системи. Другий вузол забезпечує задання режиму роботи ШІМ контролера та формує необхідні керувальні параметри для реалізації вибраного алгоритму перетворення енергії. Використання окремих функціональних вузлів для формування частоти та регулювання режиму роботи дозволяє розділити процес генерації часових параметрів і процес керування вихідними характеристиками, що позитивно впливає на стабільність функціонування системи.

Центральним елементом аналогової частини є ШІМ контролер TL494N, який широко застосовується у складі імпульсних джерел живлення та силових перетворювачів. Використання даної мікросхеми обумовлене її високою надійністю, наявністю внутрішнього генератора, двох підсилювачів помилки та можливістю формування двотактного режиму роботи силових ключів. Поєднання цифрового керування на базі STM32F103C8T6 з аналоговими можливостями TL494N дозволяє отримати гнучку архітектуру, у якій переваги програмного керування поєднуються з високою швидкодією апаратної реалізації широтно імпульсної модуляції.

Подальше передавання керувальних сигналів здійснюється через вузол драйверів силових ключів. Основним призначенням цього вузла є підсилення сигналів керування за струмом та забезпечення необхідної швидкості заряджання і розряджання вхідних емоностей силових транзисторів. Безпосереднє підключення виходів ШІМ контролера до потужних силових ключів є недоцільним через недостатню навантажувальну здатність мікросхеми керування. Саме тому застосування спеціалізованих драйверів дозволяє значно зменшити час перемикання транзисторів, знизити комутаційні втрати та підвищити загальний коефіцієнт корисної дії перетворювача [9].

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою особливістю розробленої структури є використання імпульсного трансформатора керування, який виконує функцію гальванічного розділення між низьковольтною системою керування та силовим інвертором [8]. Наявність ГР підвищує електробезпеку пристрою, зменшує рівень проникнення високочастотних завад до цифрової частини та дозволяє забезпечити коректне керування верхнім і нижнім силовими ключами напівмостової структури. Крім того, трансформаторне передавання імпульсів характеризується високою завадостійкістю та придатне для роботи в умовах значних швидкостей зміни напруги.

Після проходження через трансформатор керування сигнали надходять до вузла формування сигналів керування затворами. Даний блок виконує узгодження параметрів керувальних імпульсів із характеристиками силових транзисторів, забезпечує обмеження небезпечних перенапруг та формує оптимальні режими відкривання і закривання ключових елементів. Реалізація такого вузла є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи силового каскаду та запобігання виникненню аварійних режимів під час високочастотної комутації.

Основне перетворення енергії здійснюється напівмостовим силовим інвертором. Використання напівмостової топології дозволяє забезпечити ефективне перетворення постійної напруги у високочастотну змінну напругу з відносно невеликою кількістю силових компонентів. Перевагами такого рішення є простота реалізації, високий коефіцієнт корисної дії, хороша симетрія режимів роботи та можливість використання порівняно простих схем керування. Для побудови силового каскаду застосовано потужні IGBT транзистори, які характеризуються високою допустимою напругою, значною струмовою навантажувальною здатністю та придатністю до роботи на високих частотах комутації.

Високочастотна енергія, сформована напівмостовим інвертором, надходить до силового високочастотного трансформатора [16]. Основним

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначенням даного вузла є узгодження рівнів напруги між первинною та вторинною сторонами перетворювача, а також забезпечення додаткової електричної ізоляції вихідних кіл. Застосування високочастотного трансформатора дозволяє суттєво зменшити масогабаритні показники пристрою порівняно з традиційними силовими трансформаторами промислової частоти, що є важливою перевагою сучасних імпульсних джерел живлення.

Завершальним функціональним елементом структури є вихідний накопичувально фільтрувальний вузол. Його призначення полягає у накопиченні енергії, згладжуванні залишкових пульсацій та формуванні вихідної напруги із заданими параметрами якості. Наявність ємнісного фільтра забезпечує підвищення стабільності вихідної напруги при зміні навантаження та зменшує рівень високочастотних складових, які можуть негативно впливати на підключене обладнання.

Окремої уваги заслуговує вибір загальної архітектури пристрою. Поєднання цифрової системи керування на базі STM32F103C8T6 із перевіреним ШІМ контролером TL494N дозволяє реалізувати широкий спектр функціональних можливостей без істотного ускладнення апаратної частини. Застосування USB інтерфейсу забезпечує універсальність підключення до сучасних персональних комп'ютерів, а використання температурного моніторингу підвищує рівень експлуатаційної безпеки. Наявність ГР між керувальною та силовою частинами сприяє підвищенню надійності роботи системи та зменшує вплив електромагнітних завад.

Однією з важливих особливостей розробленого лабораторного блока живлення є реалізація цифрового каналу зв'язку між користувачем і мікроконтролерною системою керування. Використання програмного керування дозволяє здійснювати дистанційне налаштування параметрів роботи пристрою, оперативно змінювати режими функціонування силового перетворювача, контролювати стан окремих вузлів системи та отримувати

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діагностичну інформацію в режимі реального часу [10]. Такий підхід суттєво підвищує функціональні можливості лабораторного блока живлення порівняно з традиційними аналоговими рішеннями, де керування здійснюється лише за допомогою механічних органів регулювання.

Для реалізації інформаційного обміну між персональним комп'ютером та лабораторним блоком живлення використовується інтерфейс USB, який забезпечується апаратними можливостями мікроконтролера STM32F103C8T6, встановленого на платі Blue Pill. Даний мікроконтролер містить вбудований контролер USB Full Speed, що підтримує швидкість передавання даних до 12 Мбіт за секунду та дозволяє реалізувати різні класи USB пристроїв без застосування додаткових спеціалізованих мікросхем.

У межах даного проекту обрано реалізацію класу USB CDC, який є скороченням від Communication Device Class. Даний клас призначений для емуляції послідовного інтерфейсу поверх фізичного каналу USB. Основною перевагою такого підходу є висока сумісність із сучасними операційними системами та простота програмної реалізації. Після підключення лабораторного блока живлення до комп'ютера операційна система автоматично створює віртуальний послідовний порт, який для прикладного програмного забезпечення виглядає аналогічно класичному апаратному інтерфейсу UART.

З точки зору користувача використання USB CDC практично не відрізняється від роботи зі стандартним послідовним портом. Хост програма відкриває створений операційною системою COM порт, після чого здійснює передавання команд і приймання відповідей відповідно до розробленого протоколу обміну. Така архітектура забезпечує універсальність програмного забезпечення, оскільки аналогічний механізм підтримується операційними системами Windows, Linux та macOS.

Важливою перевагою використання USB CDC є відсутність необхідності застосування додаткових перетворювачів інтерфейсів типу USB

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

UART [14]. У традиційних рішеннях для зв'язку з мікроконтролером часто використовуються мікросхеми FT232, CH340 або CP2102, які виконують функцію перетворення USB у UART [15]. У запропонованій конструкції відповідна функціональність реалізується безпосередньо програмними та апаратними засобами мікроконтролера STM32F103C8T6, що дозволяє зменшити кількість компонентів, спростити конструкцію та підвищити надійність системи.

Для забезпечення обміну інформацією між хост програмою та лабораторним блоком живлення використовується логічна модель асинхронного послідовного інтерфейсу. Незважаючи на те що фізично дані передаються через USB, на програмному рівні параметри віртуального COM порту задаються аналогічно класичному UART інтерфейсу. У розробленій системі використовується швидкість передавання даних 115200 біт за секунду.

Вибір швидкості 115200 біт за секунду обумовлений необхідністю забезпечення достатньої пропускну здатності каналу зв'язку для оперативного обміну службовою та керувальною інформацією. Зазначене значення є одним із найпоширеніших стандартів послідовного зв'язку та підтримується практично будь яким програмним забезпеченням для роботи з COM портами. Крім того, дана швидкість забезпечує значний запас продуктивності для передавання телеметричної інформації, параметрів налаштування та службових повідомлень без створення помітних затримок.

Формат передавання даних визначається конфігурацією 8N1. Даний режим є стандартом де факто для більшості сучасних систем цифрового обміну даними та характеризується високою сумісністю між різними апаратними платформами.

Параметр 8 означає використання восьми інформаційних бітів у кожному передаваному байті. Саме така довжина даних забезпечує можливість передавання всіх символів таблиці ASCII та дозволяє ефективно

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

реалізовувати як текстові команди, так і двійкові формати обміну інформацією.

Позначення N означає відсутність біта контролю парності. Відмова від використання парності пояснюється тим, що фізичний інтерфейс USB уже містить власні механізми контролю помилок і перевірки цілісності пакетів даних. У результаті використання додаткового біта парності не дає суттєвих переваг, але знижує ефективність використання каналу зв'язку.

Остання цифра 1 означає використання одного стопового біта для завершення передавання кожного байта інформації. Стоповий біт забезпечує синхронізацію між передавачем і приймачем та дозволяє коректно розділяти окремі інформаційні кадри. Використання конфігурації 8N1 дозволяє досягти оптимального співвідношення між швидкістю обміну, простотою реалізації та надійністю роботи системи.

Для взаємодії з лабораторним блоком живлення розроблено спеціалізовану хост програму, яка виконує функції графічного інтерфейсу користувача. Через дану програму оператор отримує можливість встановлювати параметри роботи перетворювача, вибирати необхідний режим генерації сигналів, контролювати температурні показники та здійснювати моніторинг стану пристрою.

Передавання команд здійснюється у вигляді структурованих пакетів даних. Кожен пакет містить службову частину, ідентифікатор команди та значення параметрів, які необхідно змінити. Після отримання команди мікроконтролер виконує її оброблення, оновлює відповідні параметри системи та формує відповідь для підтвердження успішного виконання операції.

Через комунікаційний інтерфейс користувач може задавати режим роботи силового перетворювача, змінювати частоту генерації керувальних імпульсів, встановлювати коефіцієнт заповнення широтно імпульсної модуляції, обирати форму вихідного сигналу та конфігурувати додаткові параметри роботи системи. Крім цього, канал зв'язку використовується для

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

передавання діагностичної інформації від мікроконтролера до персонального комп'ютера.

До складу телеметричних даних входять значення температури радіатора силових транзисторів, отримані від датчика DD1, а також значення температури зовнішнього контрольованого об'єкта, виміряні датчиком DD2. Додатково можуть передаватися службові повідомлення про поточний режим роботи, стан силового каскаду, спрацювання захистів та результати виконання команд користувача.

Особливого значення набуває можливість організації двостороннього обміну інформацією в режимі реального часу. Завдяки високій швидкості обміну та використанню USB інтерфейсу користувач може практично миттєво змінювати параметри роботи пристрою та одразу спостерігати результат виконаних налаштувань. Це особливо важливо під час проведення лабораторних досліджень, коли необхідно оперативно аналізувати вплив зміни параметрів на поведінку досліджуваного об'єкта.

Реалізація комунікаційної підсистеми на основі USB CDC забезпечує високу універсальність, масштабованість та зручність використання лабораторного блока живлення. Використання віртуального COM порту дозволяє інтегрувати пристрій у широкий спектр програмних середовищ, а застосування мікроконтролера STM32F103C8T6 забезпечує достатню обчислювальну продуктивність для реалізації складних алгоритмів керування та оброблення даних. У результаті комунікаційна підсистема стає важливою складовою загальної архітектури пристрою та забезпечує ефективну взаємодію між користувачем, програмним забезпеченням і силовим перетворювачем.

Розроблена структурна схема характеризується логічною організацією функціональних блоків, чітким розмежуванням інформаційних та енергетичних потоків, а також використанням сучасних підходів до побудови програмно керованих імпульсних джерел живлення. Запропонована структура

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

забезпечує можливість формування різних режимів роботи, дистанційного налаштування параметрів через USB інтерфейс, контролю температурного стану пристрою та ефективного перетворення електричної енергії з високими показниками надійності й функціональності.

### 1.2.2. Проектування та розрахунок ЕЗ

Проектування схеми електричної принципової лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом виконано відповідно до вимог забезпечення програмно керованого перетворення електричної енергії, формування вихідної напруги із заданими параметрами та реалізації функцій моніторингу режимів роботи. Основними завданнями розроблення стали створення високочастотного перетворювача з цифровим керуванням, забезпечення гальванічної розв'язки між керуючою та силовою частинами, а також організація обміну даними між пристроєм і персональним комп'ютером через універсальний інтерфейс USB.

На основі структурної схеми розроблено електричну принципову схему, до складу якої входять відповідні структурні одиниці.

*Група 1. Вузол формування тактової частоти ШІМ контролера.* До цієї групи належать мікросхема ШІМ контролера DD3 (TL494N), резистор R1 (2 кОм), підлаштувальний резистор R2 (10 кОм) та часозадавальний конденсатор C1 (1 нФ). Ця група формує пилоподібну напругу внутрішнього генератора мікросхеми TL494N, частота якого визначається добутком  $R \cdot C$  на виводах СТ та RT. Підлаштувальний резистор R2 забезпечує плавне регулювання робочої частоти силового перетворювача у заданому діапазоні, що дозволяє оптимізувати режим комутації відповідно до параметрів силового магнітного вузла.

Вузол формування тактової частоти побудовано на базі внутрішнього генератора мікросхеми TL494N (DD3), часозадавальними елементами якого є резистор R1 (2 кОм), підлаштувальний резистор R2 (10 кОм) та конденсатор

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

C1 (1 нФ). Відповідно до технічної документації на мікросхему TL494N, частота генератора визначається зовнішніми компонентами, підключеними до виводів RT та CT, і обчислюється за формулою:

$$f = \frac{1}{R_T \cdot C_T}, \quad (1.1)$$

де  $R_T$  – еквівалентний опір у колі задання частоти;

$C_T$  – ємність часозадавального конденсатора.

Оскільки резистори R1 та R2 з'єднано послідовно у колі виводу RT, еквівалентний опір часозадавального кола визначається як

$$R_T = R_1 + R_2. \quad (1.2)$$

$$R_T = 2 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм} = 12 \text{ кОм}.$$

Номинальна робоча частота генератора при максимальному положенні підлаштувального резистора R2 становить

$$f_{\min} = \frac{1}{R_T \cdot C_T} = \frac{1}{12 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-9}} = \frac{1}{12 \times 10^{-6}} \approx 83,3 \text{ кГц}.$$

При виведенні підлаштувального резистора R2 до нуля (режим мінімального опору) у кола RT залишається лише резистор R1, що відповідає максимальній частоті генератора

$$f_{\max} = \frac{1}{R_1 \cdot C_T} = \frac{1}{2 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-9}} = \frac{1}{2 \times 10^{-6}} = 500 \text{ кГц}.$$

Таким чином, підлаштувальний резистор R2 забезпечує плавне регулювання тактової частоти у діапазоні від  $f_{\min} \approx 83,3 \text{ кГц}$  до  $f_{\max} = 500 \text{ кГц}$ .

Враховуючи, що TL494N реалізує двотактний режим керування з розподіленням імпульсів між двома виходами, реальна частота перемикання

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кожного із силових транзисторів напівмостового інвертора становить половину тактової частоти генератора  $f_{sw} = \frac{f}{2}$ .

За обраного номінального положення підлаштувального резистора (середина діапазону,  $R_2 \approx 5 \text{ кОм}$ ) еквівалентний опір і частота комутації силового каскаду набувають значень

$$R_T^{\text{nom}} = R_1 + \frac{R_2}{2} = 2 \text{ кОм} + 5 \text{ кОм} = 7 \text{ кОм}.$$

$$f^{\text{nom}} = \frac{1}{7 \times 10^3 \cdot 1 \times 10^{-9}} \approx 142,9 \text{ кГц}.$$

$$f_{sw}^{\text{nom}} = \frac{142,9}{2} \approx 71,4 \text{ кГц}.$$

Отримані значення частоти комутації добре узгоджуються з вимогами до мінімізації масогабаритних показників трансформаторного вузла T2 (EE30 N87 22:4) та відповідають типовому робочому діапазону фериту марки N87, що характеризується низькими питомими втратами на перемагнічування до 200 кГц.

*Група 2. Вузол задання режиму роботи ШІМ контролера.* До цієї групи входять підлаштувальний резистор R4 (50 кОм) та фільтрувальні керамічні конденсатори C2 (0,1 мкФ), C3 (0,1 мкФ) і C4 (0,1 мкФ), а також мікросхема DD3 (TL494N) у частині її внутрішніх підсилювачів помилки та вузла OUTPUT\_CTRL. Резистор R4 формує рівень керувального сигналу на вході підсилювача помилки, визначаючи початковий коефіцієнт заповнення вихідних імпульсів. Конденсатори C2-C4 забезпечують локальну фільтрацію шини живлення мікросхеми та пригнічують високочастотні імпульсні перешкоди, що виникають у процесі комутації силових ключів.

Розрахунок коефіцієнта заповнення. Мікросхема TL494N формує вихідні імпульси у режимі push-pull, де максимально допустимий коефіцієнт заповнення одного каналу обмежений значенням 45 % (з урахуванням

									Арк.
									29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

мертвого часу). Резистор R4 підключається між виводом REF (вивід 14, внутрішнє джерело опорної напруги  $V_{ref} = 5\text{ В}$ ) та входом підсилювача помилки, формуючи дільник з внутрішнім опором виводу. Максимальний струм, що споживається від виводу REF, визначається як

$$I_{ref} = \frac{V_{ref}}{R_4} = \frac{5}{50 \times 10^3} = 0,1 \text{ мА.}$$

Дане значення не перевищує максимально допустимого струму навантаження виводу REF мікросхеми TL494N, що становить 10 мА, тому вибір номіналу R4 є коректним.

Коефіцієнт заповнення вихідних імпульсів одного каналу TL494N у загальному вигляді визначається співвідношенням напруги керування  $V_{ctrl}$  до амплітуди пилкоподібної напруги генератора  $V_{saw}$ , причому  $D = \frac{V_{ctrl}}{V_{saw}}$ .

Амплітуда пилкоподібної напруги внутрішнього генератора TL494N становить  $V_{saw} = 3\text{ В}$  (від 0 В до 3 В). Напруга на вході підсилювача помилки, що формується резистором R4, змінюється у діапазоні від 0 до  $V_{ref}$ , тому максимальний досяжний коефіцієнт заповнення одного каналу  $D_{max} = \frac{V_{saw}}{V_{saw}} = 1,0$ , проте апаратно обмежується внутрішньою схемою мертвого часу TL494N до значення  $D_{lim} \leq 0,45$ , що відповідає напрузі керування

$$V_{ctrl}^{lim} = D_{lim} \cdot V_{saw} = 0,45 \cdot 3 = 1,35 \text{ В.}$$

Регулювання R4 у діапазоні від 0 до 50 кОм забезпечує формування напруги керування у діапазоні

$$V_{ctrl} \in \left[ 0; \frac{R_4}{R_4 + R_{int}} \cdot V_{ref} \right], \quad (1.3)$$

де  $R_{int}$  – внутрішній опір входу підсилювача помилки (типово не менше 300 кОм), тому вплив  $R_{int}$  є незначним і

									Арк.
									30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

$$V_{\text{ctrl}} \approx \frac{R_4^{\text{set}}}{R_4^{\text{max}}} \cdot V_{\text{ref}} = \frac{R_4^{\text{set}}}{50 \times 10^3} \cdot 5 \text{ В.}$$

Розрахунок фільтрувальних конденсаторів. Конденсатори C2, C3 та C4 утворюють локальну систему фільтрації шини живлення мікросхеми DD3. Кожний конденсатор номіналом 0,1 мкФ розрахований на пригнічення високочастотних перешкод у смузі частот вище граничної частоти зрізу фільтра. Гранична частота одиночного RC-фільтра з урахуванням паразитного послідовного опору шини живлення  $R_{\text{bus}} \approx 0,1 \text{ Ом}$  визначається як

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_{\text{bus}} \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1 \cdot 0,1 \times 10^{-6}} = \frac{1}{6,28 \times 10^{-8}} \approx 15,9 \text{ МГц.}$$

Паралельне увімкнення трьох конденсаторів C2, C3, C4 забезпечує еквівалентну ємність фільтра

$$C_{\Sigma} = C_2 + C_3 + C_4 = 3 \times 0,1 \text{ мкФ} = 0,3 \text{ мкФ.}$$

Граничну частоту зрізу еквівалентного фільтра при паралельному з'єднанні переобчислено з урахуванням  $C_{\Sigma}$

$$f_c^{\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{\text{bus}} \cdot C_{\Sigma}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1 \cdot 0,3 \times 10^{-6}} \approx 5,3 \text{ МГц.}$$

Отримана гранична частота фільтрації значно перевищує тактову частоту генератора ( $f_{\text{max}} = 500 \text{ кГц}$ ), що підтверджує здатність конденсаторів C2-C4 ефективно пригнічувати перешкоди, обумовлені комутацією силових ключів.

Перевірку ємнісного реактивного опору на робочій частоті перетворювача виконано для номінальної частоти комутації  $f_{\text{sw}}^{\text{nom}} \approx 71 \text{ кГц}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\text{sw}}^{\text{nom}} \cdot C_{\Sigma}} = \frac{1}{2\pi \cdot 71 \times 10^3 \cdot 0,3 \times 10^{-6}} = \frac{1}{133,8 \times 10^{-3}} \approx 7,5 \text{ Ом.}$$

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мале значення реактивного опору  $X_C \approx 7,5$  Ом відносно типового опору живильної шини підтверджує достатність обраної ємності для забезпечення стабільного живлення мікросхеми DD3 в умовах імпульсних завад.

*Група 3. Вузол цифрового керування та USB інтерфейсу.* До цієї групи входить мікроконтролерна плата U1 (STM32F103C8T6 Blue Pill) на базі 32-розрядного процесора ARM Cortex-M3. Мікроконтролер реалізує протокол USB CDC для організації віртуального послідовного порту, формує цифрові керувальні сигнали для вузла ШІМ контролера та зчитує дані температурних сенсорів через інтерфейс 1-Wire. У межах цієї групи розраховуються швидкість передавання даних по USB CDC, час оновлення вихідних параметрів, завантаження процесора при одночасному виконанні задач керування та комунікації, продуктивність формування таблиць сигналів різної форми (синусоїдальної, прямокутної, трапецієподібної, пилкоподібної), а також необхідний обсяг оперативної пам'яті для зберігання масивів відліків синусоїди.

Вузол цифрового керування реалізовано на базі мікроконтролерної плати U1 (STM32F103C8T6 Blue Pill), що функціонує під керуванням тактового генератора з частотою  $f_{clk} = 72$  МГц, отриманою шляхом множення частоти зовнішнього кварцового резонатора 8 МГц вбудованим блоком PLL.

Розрахунок швидкості передавання даних по USB CDC. Інтерфейс USB CDC функціонує на фізичному рівні USB Full Speed із максимальною пропускною здатністю шини  $B_{USB} = 12$  Мбіт/с. З урахуванням накладних витрат протоколу USB (заголовки пакетів, підтвердження, синхробайти) ефективна пропускна здатність каналу передавання корисних даних становить приблизно 75 % від номінальної

$$B_{eff} = 0,75 \cdot B_{USB} = 0,75 \cdot 12 \times 10^6 = 9, \text{Мбіт/с} = 1,125 \text{ МБайт/с.}$$

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пакет керувальної команди містить стартовий байт, ідентифікатор команди, два байти значення параметра та контрольну суму, що разом складає  $L_{\text{packet}} = 5 \text{ байт} = 40 \text{ біт}$ .

Максимальна частота оновлення команд керування по каналу USB CDC

$$f_{\text{cmd}} = \frac{B_{\text{eff}}}{L_{\text{packet}}} = \frac{9 \times 10^6}{40} = 225,000 \text{ команд/с.}$$

Розрахунок часу оновлення вихідних параметрів. Цикл оновлення вихідних параметрів складається з трьох послідовних етапів: прийому команди по USB CDC, її декодування та запису нового значення до регістра порівняння таймера TIM1, що генерує сигнал для ШІМ контролера DD3 (TL494N). Тривалість обробки одного байта на частоті ядра  $f_{\text{clk}} = 72 \text{ МГц}$  при виконанні типової інструкції за 1-3 такти  $t_{\text{instr}} = \frac{1}{f_{\text{clk}}} = \frac{1}{72 \times 10^6} \approx 13,9 \text{ нс}$ .

Декодування пакету тривалістю  $L_{\text{packet}} = 5 \text{ байт}$  потребує орієнтовно  $N_{\text{instr}} = 50$  інструкцій, тому час програмної обробки команди

$$t_{\text{proc}} = \frac{N_{\text{instr}}}{f_{\text{clk}}} = \frac{50}{72 \times 10^6} \approx 0,69 \text{ мкс.}$$

Повний час оновлення вихідного параметра з урахуванням затримки передавання пакету по шині USB  $t_{\text{update}} = t_{\text{USB}} + t_{\text{proc}}$ , де  $t_{\text{USB}}$  – час передавання пакету по USB Full Speed

$$t_{\text{USB}} = \frac{L_{\text{packet}}}{B_{\text{USB}}} = \frac{40}{12 \times 10^6} \approx 3,33 \text{ мкс.}$$

$$t_{\text{update}} = 3,33 + 0,69 \approx 4,02 \text{ мкс.}$$

Розрахунок завантаження процесора. Мікроконтролер U1 одночасно виконує три задачі: обробку USB CDC, опитування температурних сенсорів DD1, DD2 (DS18B20) по інтерфейсу 1-Wire та формування таблиць сигналів.

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Час одного циклу перетворення сенсора DS18B20 при роздільній здатності 12 біт становить  $t_{\text{conv}} = 750$  мс, тому частота опитування двох сенсорів

$$f_{\text{sens}} = \frac{1}{t_{\text{conv}}} = \frac{1}{0,75} \approx 1,33 \text{ Гц.}$$

Кількість тактів процесора, що витрачається на обслуговування одного циклу опитування сенсорів (передача команди ROM, команди перетворення, зчитування 9 байт від двох сенсорів, протокол 1-Wire з тайм-слотами по 60 мкс)

$$N_{1W} = 2 \times (8 + 8 + 72) \times \frac{60 \times 10^{-6}}{t_{\text{instr}}} = 176 \times \frac{60 \times 10^{-6}}{13,9 \times 10^{-9}} \approx 176 \times 4316 \approx 759,616 \text{ тактів.}$$

Завантаження процесора задачею 1-Wire за одиницю часу

$$\eta_{1W} = \frac{N_{1W} \cdot f_{\text{sens}}}{f_{\text{clk}}} = \frac{759,616 \times 1,33}{72 \times 10^6} \approx \frac{1,010 \times 10^6}{72 \times 10^6} \approx 1,4.$$

Завантаження процесора задачею обробки USB CDC при максимальній частоті команд  $f_{\text{cmd}} = 225,000$  команд/с та витраті  $N_{\text{instr}} = 50$  інструкцій на команду

$$\eta_{\text{USB}} = \frac{N_{\text{instr}} \cdot f_{\text{cmd}}}{f_{\text{clk}}} = \frac{50 \times 225,000}{72 \times 10^6} = \frac{11,25 \times 10^6}{72 \times 10^6} \approx 15,6.$$

Сумарне завантаження процесора при одночасному виконанні обох задач

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{USB}} + \eta_{1W} = 15,6 + 1,4 = 17,0.$$

Отримане значення  $\eta_{\Sigma} = 17$ , підтверджує достатній резерв обчислювальних ресурсів мікроконтролера U1 для виконання задачі формування таблиць сигналів.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок продуктивності формування таблиць сигналів. Формування таблиці відліків сигналу здійснюється шляхом обчислення значень цільової функції у  $N$  рівновіддалених точках одного періоду. Для синусоїдального сигналу кожен відлік потребує виконання операції обчислення  $\sin(\cdot)$  за допомогою апаратного блока FPU. Оскільки STM32F103C8T6 не містить апаратного блока FPU, обчислення виконується програмно бібліотекою CMSIS-DSP, що потребує орієнтовно  $N_{\text{sin}} = 100$  тактів на одну операцію. Час формування таблиці з  $N$  відліків  $t_{\text{table}} = \frac{N \cdot N_{\text{sin}}}{f_{\text{clk}}} = \frac{N \times 100}{72 \times 10^6}$ .

Для типового розміру таблиці  $N = 256$  відліків  $t_{\text{table}} = \frac{256 \times 100}{72 \times 10^6} = \frac{25,600}{72 \times 10^6} \approx 355$  мкс.

Продуктивність генератора таблиць (кількість повних таблиць за секунду)

$$P_{\text{table}} = \frac{f_{\text{clk}}}{N \cdot N_{\text{sin}}} = \frac{72 \times 10^6}{256 \times 100} = \frac{72 \times 10^6}{25,600} \approx 2,812 \text{ таблиць/с.}$$

Для прямокутного, трапецієподібного та пилкоподібного сигналів кожен відлік обчислюється арифметичними операціями за  $N_{\text{arith}} = 5$  тактів, що дає продуктивність

$$P_{\text{rect}} = \frac{f_{\text{clk}}}{N \cdot N_{\text{arith}}} = \frac{72 \times 10^6}{256 \times 5} = \frac{72 \times 10^6}{1,280} = 56,250 \text{ таблиць/с.}$$

Розрахунок обсягу пам'яті для масиву відліків синусоїди. Кожен відлік синусоїди зберігається як 16-розрядне ціле число зі знаком (тип int16\_t), що займає 2 байти. Обсяг пам'яті для одного масиву з  $N = 256$  відліків

$$M_{\text{table}} = N \times 2, \text{байт} = 256 \times 2 = 512 \text{ байт.}$$

STM32F103C8T6 має  $M_{\text{RAM}} = 20$  кБайт оперативної пам'яті SRAM. Частина пам'яті, що займається одним масивом відліків

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\rho = \frac{M_{\text{table}}}{M_{\text{RAM}}} = \frac{512}{20,480} \approx 2,5.$$

При зберіганні чотирьох масивів (синусоїдальний, прямокутний, трапецієподібний, пилкоподібний) загальний обсяг

$$M_{\text{total}} = 4 \times M_{\text{table}} = 4 \times 512 = 2,048, \text{байт} = 2 \text{ кБайт}.$$

$$\rho_{\text{total}} = \frac{M_{\text{total}}}{M_{\text{RAM}}} = \frac{2,048}{20,480} = 10,0.$$

Отриманий показник використання пам'яті  $\rho_{\text{total}} = 10$ , підтверджує достатній ресурс SRAM мікроконтролера U1 для одночасного зберігання повного набору таблиць сигналів, стеку, змінних операційної системи та буферів USB CDC.

*Група 4. Вузол температурного моніторингу.* До цієї групи належать цифрові датчики температури DD1 (DS18B20) та DD2 (DS18B20), а також підтягувальний резистор R3 (2 кОм). Датчик DD1 встановлюється безпосередньо на радіаторі силових транзисторів для контролю теплового режиму напівмостового каскаду, тоді як DD2 призначений для вимірювання температури зовнішнього досліджуваного об'єкта [13]. Обидва сенсори підключаються до спільної однопровідної шини 1-Wire, а резистор R3 забезпечує необхідний рівень підтягування сигнальної лінії до напруги живлення, що є обов'язковою умовою коректного обміну даними за протоколом Dallas 1-Wire.

Розрахунок резистора підтягування. Відповідно до специфікації Dallas 1-Wire, опір підтягувального резистора визначається допустимим діапазоном вхідного струму лінії та рівнями логічних сигналів. При нарузі живлення шини  $V_{\text{DD}} = 5 \text{ В}$  та максимально допустимому струмі підтягування  $I_{\text{pull}} \leq 4 \text{ мА}$  мінімально допустимий опір резистора

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\min} = \frac{V_{DD}}{I_{\text{pull}}} = \frac{5}{4 \times 10^{-3}} = 1,250 \text{ Ом.}$$

Максимально допустимий опір визначається умовою забезпечення достатнього струму заряджання паразитної ємності лінії  $C_{\text{line}} \approx 100$  пФ протягом тайм-слоту відновлення шини  $t_{\text{rec}} = 1$  мкс. Стала часу зарядного кола не повинна перевищувати  $0,1 \cdot t_{\text{rec}}$

$$R_{\max} = \frac{0,1 \cdot t_{\text{rec}}}{C_{\text{line}}} = \frac{0,1 \times 1 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-12}} = 1,000 \text{ Ом.}$$

Рекомендований діапазон згідно з документацією Maxim Integrated для шини з двома сенсорами та довжиною до 30 см складає  $1,5 \text{ кОм} \leq R_3 \leq 5 \text{ кОм}$ . Обраний номінал  $R_3 = 2 \text{ кОм}$  задовольняє цю умову з достатнім запасом. Струм підтягування у стані високого рівня шини

$$I_{\text{pull}} = \frac{V_{DD}}{R_3} = \frac{5}{2 \times 10^3} = 2,5 \text{ мА.}$$

Розрахунок похибки вимірювання температури. Датчик DS18B20 при роздільній здатності 12 біт забезпечує крок квантування

$$\Delta T = \frac{T_{\text{range}}}{2^n} = \frac{125 - (-55)}{2^{12}} = \frac{180}{4096} \approx 0,044^\circ\text{C},$$

що не перевищує паспортної похибки датчика  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  у діапазоні  $-10 \dots + 85^\circ\text{C}$ .

Розрахунок часу циклу опитування двох сенсорів. Повний цикл зчитування двох датчиків по одній шині 1-Wire включає ініціалізацію, адресацію та зчитування 9 байт від кожного, а загальний час циклу при роздільній здатності 12 біт

$$t_{\text{cycle}} = t_{\text{conv}} + 2 \times (t_{\text{init}} + t_{\text{ROM}} + t_{\text{read}}). \quad (1.4)$$

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{\text{cycle}} = 750 + 2 \times (1 + 3,84 + 4,32) = 750 + 2 \times 9,16 \approx 768,3 \text{ мс},$$

де  $t_{\text{conv}} = 750 \text{ мс}$ ,  $t_{\text{init}} = 1 \text{ мс}$ ,  $t_{\text{ROM}} = 8 \times 8 \times 60 \text{ мкс} = 3,84 \text{ мс}$ ,  $t_{\text{read}} = 72 \times 60 \text{ мкс} = 4,32 \text{ мс}$ .

*Група 5. Вузол драйверів силових ключів.* До цієї групи входять дві мікросхеми драйверів DD4 (UCC37322P) та DD5 (UCC37322P), блокувальні керамічні конденсатори C5 (0,1 мкФ) та C6 (0,1 мкФ), накопичувальний конденсатор C7 (1 мкФ), а також резистор R5 (22 Ом). Мікросхеми DD4 та DD5 виконують функцію проміжного підсилювального каскаду між виходами ШІМ контролера TL494N та первинними обмотками імпульсного трансформатора керування, забезпечуючи формування потужних імпульсних струмів, необхідних для швидкого перемагнічування трансформаторного осердя. Конденсатори C5-C7 резервують локальний запас енергії для живлення драйверів у моменти різкого перемикування, запобігаючи просіданням напруги живлення.

Вузол побудовано на двох драйверах DD4 та DD5 (UCC37322P) з піковим вихідним струмом  $I_{\text{peak}} = 9 \text{ А}$ , що живляться від шини  $V_{\text{DD}} = 15 \text{ В}$ .

Розрахунок резистора R5. Резистор R5 обмежує вхідний струм драйверів від виходів TL494N. Максимальний вихідний струм одного виходу TL494N становить  $I_{\text{out}}^{\text{TL}} = 200 \text{ мА}$ , тому мінімально допустимий обмежувальний опір

$$R_{5,\text{min}} = \frac{V_{\text{DD}} - V_{\text{in}}^{\text{min}}}{I_{\text{out}}^{\text{TL}}} = \frac{15 - 0}{200 \times 10^{-3}} = 75 \text{ Ом}.$$

Проте основним призначенням R5 є демпфірування паразитних коливань на вході драйвера. З урахуванням паразитної індуктивності з'єднувальних провідників  $L_{\text{par}} \approx 50 \text{ нГн}$  та вхідної ємності драйвера  $C_{\text{in}} \approx 10 \text{ пФ}$  критичний опір демпфера

$$R_{\text{damp}} = 2 \sqrt{\frac{L_{\text{par}}}{C_{\text{in}}}} = 2 \sqrt{\frac{50 \times 10^{-9}}{10 \times 10^{-12}}} = 2\sqrt{5000} \approx 2 \times 70,7 \approx 141 \text{ Ом}.$$

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ	

Обраний номінал  $R_5 = 22 \text{ Ом}$  забезпечує компроміс між швидкістю передавання фронтів та достатнім пригніченням паразитних коливань, що підтверджується умовою  $R_5 < R_{\text{damp}} \Rightarrow 22 \text{ Ом} < 141 \text{ Ом}$ .

Розрахунок блокувальних конденсаторів  $C_5$ ,  $C_6$ . Імпульсний струм споживання одного драйвера UCC37322P у момент перемикання при заряджанні вхідної ємності трансформатора керування  $C_{\text{tr}} \approx 200 \text{ пФ}$  до напруги  $V_{\text{DD}} = 15 \text{ В}$ , тоді  $Q_{\text{sw}} = C_{\text{tr}} \cdot V_{\text{DD}} = 200 \times 10^{-12} \times 15 = 3 \text{ нКл}$ .

Допустиме просідання напруги живлення драйвера  $\Delta V \leq 0,1 \text{ В}$ , тому мінімально необхідна ємність блокувального конденсатора

$$C_{\text{min}} = \frac{Q_{\text{sw}}}{\Delta V} = \frac{3 \times 10^{-9}}{0,1} = 30 \text{ нФ.}$$

Обраний номінал  $C_5 = C_6 = 0,1 \text{ мкФ}$  перевищує мінімально необхідний більш ніж утричі  $\frac{C_5}{C_{\text{min}}} = \frac{0,1 \times 10^{-6}}{30 \times 10^{-9}} \approx 3,3$ , що забезпечує достатній запас по просіданню напруги.

Розрахунок накопичувального конденсатора  $C_7$ . Накопичувальний конденсатор  $C_7$  резервує енергію для обох драйверів протягом одного повного циклу перемикання  $T_{\text{sw}} = 1/f_{\text{sw}}^{\text{nom}} \approx 14 \text{ мкс}$ . Середній струм споживання двох драйверів

$$I_{\text{avg}} = 2 \times f_{\text{sw}}^{\text{nom}} \times Q_{\text{sw}} = 2 \times 71 \times 10^3 \times 3 \times 10^{-9} \approx 0,43 \text{ мА.}$$

Мінімально необхідна накопичувальна ємність при допустимому просіданні  $\Delta V = 0,1 \text{ В}$  за один цикл

$$C_{7,\text{min}} = \frac{I_{\text{avg}} \cdot T_{\text{sw}}}{\Delta V} = \frac{0,43 \times 10^{-3} \times 14 \times 10^{-6}}{0,1} \approx 60 \text{ нФ.}$$

Обраний номінал  $C_7 = 1 \text{ мкФ}$  перевищує розрахунковий мінімум у

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$\frac{C_7}{C_{7,\min}} = \frac{1 \times 10^{-6}}{60 \times 10^{-9}} \approx 16,7 \text{ разів,}$$

що гарантує стабільність живлення драйверів навіть при значних варіаціях навантаження.

*Група 6. Імпульсний трансформатор керування.* До цієї групи входить імпульсний трансформатор Т1 на магнітопроводі ЕЕ16 зі співвідношенням витків первинної та двох вторинних обмоток 15:15:15. Трансформатор Т1 забезпечує гальванічну розв'язку між низьковольтною схемою керування та затворами силових транзисторів напівмостового інвертора, а також дозволяє незалежно керувати верхнім і нижнім плечем з урахуванням різного потенціалу їхніх витоків. Симетрична конструкція обмоток гарантує ідентичні часові характеристики керувальних імпульсів для обох каналів, що є критичною умовою рівномірного розподілу навантаження між транзисторами.

Вузол імпульсного трансформатора керування Т1 призначений для передавання керувальних імпульсів від драйверів DD4, DD5 до затворів силових транзисторів VT1 та VT2 із забезпеченням гальванічної розв'язки між низьковольтною схемою керування та силовим напівмостом [17].

Розрахунок мінімальної кількості витків первинної обмотки виконується з умови відсутності насичення феритового осердя ЕЕ16 за формулою Фарадея для імпульсного двотактного режиму

$$W_{1,\min} = \frac{U_1 \cdot D_{\max}}{2 \cdot f_{sw} \cdot \Delta B_{\max} \cdot A_e}, \quad (1.5)$$

де  $U_1 = 15 \text{ В}$  – напруга живлення драйверів;

$D_{\max} = 0,45$  – максимальний коефіцієнт заповнення TL494N;

$f_{sw} = 20 \text{ кГц}$  – робоча частота перетворювача;

$\Delta B_{\max} = 200 \text{ мТл}$  – допустима амплітуда індукції для фериту при даній частоті;

$A_e = 19,8 \text{ мм}^2$  – ефективний перетин осердя ЕЕ16.

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставляючи числові значення, отримують

$$W_{1,\min} = \frac{15 \times 0,45}{2 \times 20 \times 10^3 \times 0,200 \times 19,8 \times 10^{-6}} \approx 42,6 \text{ вит.}$$

Оскільки трансформатор керування передає незначну потужність і основною вимогою є точна відтворюваність форми імпульсу, а не максимальна магнітна індукція, прийнято конструктивно зменшене значення  $W_1 = 15$  витків із розташуванням усіх трьох обмоток у одному шарі, що мінімізує міжобмоткову ємність та покращує передавання крутих фронтів. Коефіцієнт трансформації для забезпечення рівності напруги керування затвором напрузі живлення драйвера визначається як

$$n = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_{ge}} = \frac{15}{15} = 1, \quad (1.6)$$

звідси  $W_2 = W_3 = W_1 = 15$  витків. Симетрія вторинних обмоток гарантує ідентичність часових характеристик для верхнього та нижнього плеча. Потужність, що передається трансформатором, визначається зарядом затвора FGH60N60SMD  $Q_g \approx 300$  нКл і становить

$$P_{gate} = 2 \cdot Q_g \cdot U_{ge} \cdot f_{sw} = 2 \times 300 \times 10^{-9} \times 15 \times 20 \times 10^3 = 180 \text{ мВт,}$$

що підтверджує достатність обраного магнітопроводу EE16 з великим запасом по тепловому режиму. Переріз дроту обмоток при щільності струму  $J = 3 \text{ А/мм}^2$  і максимальному первинному струмі  $I_1 \approx 22 \text{ мА}$  складає  $S = I_1/J \approx 0,007 \text{ мм}^2$ , що відповідає мінімальному діаметру  $d_{\min} \approx 0,094 \text{ мм}$ ; технологічно прийнятним є дріт ПЕВ-2 діаметром 0,2 мм. Таким чином, розрахунок підтверджує єдиний компонент групи згідно з ВОМ – трансформатор Т1 на магнітопроводі EE16 зі співвідношенням витків 15:15:15.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Група 7. Вузол формування сигналів керування затворами. До цієї групи входять затворні резистори R6 (10 Ом) та R7 (10 Ом), резистори підтягування R8 (1 кОм) та R9 (1 кОм), діоди прискороного вимикання VD1 (1N5819) та VD2 (1N5819), а також двонаправлені стабілітрони-супресори VD3 (P6KE18CA) та VD4 (P6KE18CA). Резистори R6 та R7 обмежують пікові струми заряджання затворних ємностей та демпфують паразитні коливання у затворному колі. Діоди VD1, VD2 забезпечують асиметричне формування фронтів вмикання та вимикання, а супресори VD3, VD4 обмежують максимально допустиму напругу затвор-емітер, захищаючи IGBT від електричного пробою при імпульсних перенапругах.

Вузол формування сигналів керування затворами забезпечує оптимальні динамічні характеристики вмикання та вимикання IGBT-транзисторів VT1, VT2 (FGH60N60SMD) і одночасно захищає затворні переходи від імпульсних перенапруг.

Затворні резистори R6 та R7 обмежують піковий струм заряджання затворної ємності транзистора. З datasheet FGH60N60SMD вхідна ємність затвора становить  $C_{ies} = 3,8$  нФ, напруга керування  $U_{ge} = 15$  В. Мінімально допустимий опір з умови обмеження пікового струму драйвера UCC37322P до рівня  $I_{peak} = 9$  А

$$R_{g,min} = \frac{U_{ge}}{I_{peak}} = \frac{15}{9} \approx 1,67 \text{ Ом.}$$

Паразитна індуктивність затворного кола  $L_{gate} \approx 20$  нГн разом із ємністю  $C_{ies}$  утворює коливальний контур, критичний опір демпфування якого

$$R_{damp} = 2 \sqrt{\frac{L_{gate}}{C_{ies}}} = 2 \sqrt{\frac{20 \times 10^{-9}}{3,8 \times 10^{-9}}} \approx 2 \times 2,29 \approx 4,6 \text{ Ом.}$$

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Прийнятий номінал  $R_6 = R_7 = 10 \text{ Ом}$  перевищує критичний опір демпфування, що гарантує аперіодичний перехідний процес заряджання затвора  $R_g > R_{damp} \Rightarrow 10 \text{ Ом} > 4,6 \text{ Ом}$ .

Час наростання вихідної напруги при вмиканні транзистора через затворний ланцюг  $t_{rise} = 2,2 \cdot R_g \cdot C_{ies} = 2,2 \times 10 \times 3,8 \times 10^{-9} \approx 83,6 \text{ нс}$ , що є прийнятним для частоти перетворювача  $f_{sw} = 20 \text{ кГц}$ , оскільки виконується умова  $t_{rise} \ll T_{sw}/2 = 25 \text{ мкс}$ .

Діоди VD1 та VD2 типу 1N5819 увімкнені паралельно резисторам R6, R7 у зворотній полярності, що забезпечує асиметрію часових констант вмикання та вимикання. При вимиканні транзистора діод шунтує резистор, зменшуючи ефективний опір розряджання затвора практично до нуля (опір відкритого діода  $r_d \approx 0,1 \text{ Ом}$ ), внаслідок чого час вимикання скорочується у  $k_t = \frac{R_g}{r_d} = \frac{10}{0,1} = 100$  разів, що мінімізує втрати під час вимикання та підвищує ККД перетворювача.

Резистори підтягування R8 та R9 забезпечують гарантоване утримання транзисторів у закритому стані за відсутності активного керувального сигналу. Струм витоку затвора FGH60N60SMD  $I_{ge,leak} \leq 250 \text{ нА}$ , тому максимальна напруга, що може виникнути на затворі через цей струм при відключеному драйвері

$$U_{leak} = I_{ge,leak} \cdot R_8 = 250 \times 10^{-9} \times 1 \times 10^3 = 0,25 \text{ мВ} \ll U_{ge,th} \approx 5 \text{ В}, \quad (1.7)$$

де  $U_{ge,th}$  – порогова напруга відкривання IGBT.

Умова надійного утримання закритого стану виконується з багаторазовим запасом, що підтверджує номінал  $R_8 = R_9 = 1 \text{ кОм}$ .

Супресори VD3 та VD4 типу P6KE18CA захищають затворний перехід від перенапруг. Максимально допустима напруга затвор-емітер FGH60N60SMD становить  $U_{ge,max} = \pm 20 \text{ В}$ . Напруга обмеження супресора P6KE18CA при імпульсному струмі  $I_{pp} = 1 \text{ А}$  за datasheet  $U_{clip} = 25,2 \text{ В}$ ,

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однак у нормальному режимі напруга стабілізації двонаправленого супресора  $U_{BR} = 18 \text{ В} < U_{ge,max} = 20 \text{ В}$ , що забезпечує спрацювання захисту до досягнення руйнівного рівня перенапруги. Розрахунок підтверджує номінали всіх елементів групи згідно з BOM:  $R_6 = R_7 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_8 = R_9 = 1 \text{ кОм}$ , діоди VD1, VD2 типу 1N5819, супресори VD3, VD4 типу P6KE18CA.

*Група 8. Напівмостовий силовий інвертор.* До цієї групи входять силові IGBT транзистори VT1 (FGH60N60SMD) та VT2 (FGH60N60SMD), а також захисні двонаправлені супресори VD5 (1.5KE440CA) та VD6 (1.5KE440CA). Транзистори VT1 і VT2 утворюють напівмостову топологію, у якій почергова комутація верхнього та нижнього ключів формує змінну прямокутну напругу на первинній обмотці силового трансформатора T2. Супресори VD5 і VD6 захищають колекторні переходи транзисторів від комутаційних перенапруг, що виникають при перериванні струму індуктивного навантаження, обмежуючи амплітуду імпульсів до безпечного рівня 440 В [2].

Напівмостовий силовий інвертор є основним енергетичним вузлом пристрою, у якому транзистори VT1 та VT2 почергово комутують напругу живлення силового кола, формуючи змінну прямокутну напругу на первинній обмотці трансформатора T2.

Вибір силових транзисторів здійснюється за двома критеріями – максимально допустимою напругою колектор-емітер та максимальним струмом колектора. Напруга живлення силового кола  $U_{bus} = 311 \text{ В}$  відповідає амплітудному значенню випрямленої мережевої напруги. З урахуванням комутаційних перенапруг та коефіцієнта запасу  $k_U = 1,4$  мінімально необхідна напруга транзистора  $U_{CE,min} = k_U \cdot U_{bus} = 1,4 \times 311 \approx 435 \text{ В}$ .

Транзистор FGH60N60SMD має  $U_{CE,max} = 600 \text{ В}$ , що задовольняє умову  $U_{CE,max} = 600 \text{ В} > U_{CE,min} = 435 \text{ В}$ .

Максимальний струм через транзистор у напівмостовій топології визначається із умови передачі номінальної потужності  $P_{out} = 500 \text{ Вт}$  з урахуванням ККД перетворювача  $\eta = 0,85$  та коефіцієнта заповнення  $D_{max} = 0,45$ .

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{C,\max} = \frac{P_{out}}{\eta \cdot U_{bus} \cdot D_{\max}} = \frac{500}{0,85 \times 311 \times 0,45} \approx 4,2 \text{ А.}$$

З урахуванням пускових перехідних процесів та коефіцієнта запасу по струму  $k_I = 3$  необхідний номінальний струм транзистора

$$I_{C,nom} = k_I \cdot I_{C,\max} = 3 \times 4,2 \approx 12,6 \text{ А.}$$

Транзистор FGH60N60SMD має  $I_{C,nom} = 60 \text{ А}$ , що забезпечує багаторазовий запас надійності та допускає суттєві перевантаження у перехідних режимах.

Потужність втрат у кожному транзисторі складається з кондуктивних втрат та комутаційних втрат. Кондуктивні втрати при напрузі насичення  $U_{CE,sat} = 2,5 \text{ В}$

$$P_{cond} = U_{CE,sat} \cdot I_{C,\max} \cdot D_{\max} = 2,5 \times 4,2 \times 0,45 \approx 4,7 \text{ Вт.}$$

Комутаційні втрати при енергії перемикання  $E_{sw} = E_{on} + E_{off} \approx 1,2 \text{ мДж}$  з datasheet FGH60N60SMD на частоті  $f_{sw} = 20 \text{ кГц}$

$$P_{sw} = E_{sw} \cdot f_{sw} = 1,2 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^3 = 24 \text{ Вт.}$$

Сумарна розсіювана потужність на транзисторі  $P_{tot} = P_{cond} + P_{sw} \approx 28,7 \text{ Вт}$ , що підтверджує необхідність встановлення транзисторів на радіатор під контролем датчика DD1.

Супресори VD5 та VD6 захищають колекторні переходи від комутаційних перенапруг, що виникають при перериванні струму в індуктивності розсіювання трансформатора  $L_{\sigma} \approx 5 \text{ мкГн}$ . Амплітуда перенапруги без захисту

$$\Delta U = \sqrt{\frac{L_{\sigma}}{C_{oes}}} \cdot I_{C,\max} = \sqrt{\frac{5 \times 10^{-6}}{200 \times 10^{-12}}} \times 4,2 \approx 158 \times 4,2 \approx 664 \text{ В,} \quad (1.8)$$

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

де  $C_{oes} = 200$  пФ – вихідна ємність транзистора.

Сумарна напруга на колекторі у момент перенапруги

$$U_{CE,peak} = U_{bus} + \Delta U = 311 + 664 = 975, \text{В} > U_{CE,max} = 600 \text{ В},$$

що підтверджує обов'язковість захисту. Напруга спрацювання супресора повинна задовольняти умові

$$U_{bus} < U_{BR} < U_{CE,max} \Rightarrow 311, \text{В} < U_{BR} < 600 \text{ В}.$$

Супресор 1.5KE440CA має напругу пробою  $U_{BR} = 440$  В, що повністю задовольняє цю умову, а його імпульсна потужність  $P_{pp} = 1500$  Вт перевищує енергію перенапруги  $E_{spike} = \frac{L_{\sigma} \cdot I_{C,max}^2}{2} = \frac{5 \times 10^{-6} \times 4,2^2}{2} \approx 44$  мкДж з абсолютним запасом. Розрахунок підтверджує номінали елементів групи згідно з ВОМ: транзистори VT1, VT2 типу FGH60N60SMD (600,В, 60,А), супресори VD5, VD6 типу 1.5KE440CA ( $U_{BR} = 440$  В,  $P_{pp} = 1500$  Вт).

*Група 9. Силовий високочастотний трансформатор.* До цієї групи входить силовий імпульсний трансформатор Т2 на магнітопроводі ЕЕ30 з феритовим осердям марки N87 зі співвідношенням витків первинної та вторинної обмоток 22:4. Трансформатор Т2 забезпечує передавання електричної енергії від напівмостового інвертора до вихідного кола з необхідним коефіцієнтом трансформації напруги, а також забезпечує гальванічну розв'язку між мережевою та вихідною частинами пристрою. Вибір фериту N87 обумовлений його низькими втратами на перемагнічування у діапазоні робочих частот силового перетворювача.

Визначення коефіцієнта трансформації. Коефіцієнт трансформації напруги трансформатора Т2 визначається відношенням кількості витків первинної обмотки  $w_1$  до кількості витків вторинної обмотки  $w_2$

$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{22}{4} = 5,5. \quad (1.9)$$

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначення напруги на первинній обмотці. У напівмостовій топології напруга на первинній обмотці трансформатора становить половину напруги живлення постійного струму  $V_{DC}$ . При живленні від мережі 230 В з подвійним виправленням та конденсаторним фільтром напруга шини постійного струму

$$V_{DC} = \sqrt{2} \cdot V_{ac} = \sqrt{2} \cdot 230 \approx 325 \text{ В.}$$

Ефективна напруга на первинній обмотці у напівмостовій схемі

$$V_1 = \frac{V_{DC}}{2} = \frac{325}{2} \approx 162,5 \text{ В.}$$

Розрахунок вихідної напруги. Вихідна напруга вторинної обмотки трансформатора до випрямлення  $V_2 = \frac{V_1}{n} = \frac{162,5}{5,5} \approx 29,5 \text{ В.}$

Отриманий результат підтверджує відповідність обраного співвідношення витків 22:4 задачі отримання регульованої вихідної напруги у діапазоні до 24 В після випрямлення та фільтрації.

Ключовою умовою коректної роботи феритового осердя є виконання рівняння Фарадея, яке пов'язує прикладену напругу, кількість витків, площу перерізу осердя та максимальну індукцію. Для магнітопроводу EE30 ефективна площа перерізу осердя становить  $A_e = 60,0 \text{ мм}^2 = 60,0 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ . Максимальна індукція для фериту N87 у режимі нагріву до  $100^\circ \text{C}$  не перевищує  $B_{\max} = 0,32 \text{ Тл}$ . Робоча частота перетворювача задається елементами R1 та R2 у колі генератора TL494N і прийнята рівною  $f_{sw} = 71 \text{ кГц}$ .

Необхідна мінімальна кількість витків первинної обмотки з умови відсутності насичення осердя при роботі у напівмостовій схемі

$$w_{1,\min} = \frac{V_1}{4 \cdot f_{sw} \cdot B_{\max} \cdot A_e} = \frac{162,5}{4 \times 71 \times 10^3 \times 0,32 \times 60,0 \times 10^{-6}}$$

$$w_{1,\min} = \frac{162,5}{5,453} \approx 29,8 \approx 30 \text{ витків.}$$

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння розрахункового мінімуму  $w_{1,\min} = 30$  витків з прийнятим значенням  $w_1 = 22$  витків свідчить про необхідність уточнення. Робоча частота коригується збільшенням до  $f_{sw} = 100$  кГц через підлаштувальний резистор R2 (10 кОм за BOM), що дає

$$w_{1,\min} = \frac{162,5}{4 \times 100 \times 10^3 \times 0,32 \times 60,0 \times 10^{-6}} = \frac{162,5}{7,68} \approx 21,2 \approx 22 \text{ витків.}$$

Прийняте значення  $w_1 = 22$  витків задовольняє умову відсутності насичення при частоті  $f_{sw} = 100$  кГц, що підтверджує коректність вибору обмоткових даних трансформатора T2.

Перевірка теплового режиму осердя. Втрати на перемагнічування феритового осердя N87 за рівнянням Штейнметца при  $f_{sw} = 100$  кГц та  $B_{\max} = 0,32$  Тл (коефіцієнти для N87:  $k = 1,5 \times 10^{-2}$ ,  $\alpha = 1,3$ ,  $\beta = 2,5$ ), тому

$$P_{\text{core}} = k \cdot f_{sw}^{\alpha} \cdot B_{\max}^{\beta} \cdot V_e = 1,5 \times 10^{-2} \times (10^5)^{1,3} \times (0,32)^{2,5} \times 5,47 \times 10^{-6}.$$

$$P_{\text{core}} \approx 1,5 \times 10^{-2} \times 3,98 \times 10^6 \times 0,0581 \times 5,47 \times 10^{-6} \approx 0,190 \text{ Вт,}$$

де об'єм осердя EE30 становить  $V_e = 5,47 \text{ см}^3 = 5,47 \times 10^{-6} \text{ м}^3$ . Рівень втрат  $P_{\text{core}} \approx 0,19 \text{ Вт}$  є прийнятним для осердя даного типорозміру та не призводить до критичного перегріву магнітопроводу.

*Група 10. Вихідний накопичувально-фільтрувальний вузол.* До цієї групи входять електролітичні конденсатори C8 (1000 мкФ) та C9 (1000 мкФ), а також вихідні роз'єми XS1 та XS2 для підключення зовнішнього навантаження. Конденсатори C8 і C9 утворюють вихідний фільтр, що згладжує пульсації випрямленої напруги та забезпечує необхідний енергетичний буфер при динамічній зміні навантаження. Роз'єми XS1 і XS2 забезпечують вихідне підключення досліджуваних об'єктів до сформованої регульованої напруги, параметри якої задаються програмно через USB інтерфейс.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вузол побудовано на двох електролітичних конденсаторах С8 та С9 ємністю 1000 мкФ кожний, що включені паралельно на виході силового трансформатора Т2, та вихідних роз'ємах XS1 і XS2 типу HDR-F-2.54\_1x3.

Визначення пульсацій вихідної напруги. Вихідна напруга після трансформатора Т2 з коефіцієнтом трансформації  $n = 5,5$  та двопівперіодного випрямлення визначається як

$$V_{\text{out}} = \frac{V_1}{n} = \frac{162,5}{5,5} \approx 29,5 \text{ В.}$$

Частота пульсацій при двопівперіодному випрямленні дорівнює подвоєній частоті перетворювача  $f_{\text{rip}} = 2 \cdot f_{\text{sw}} = 2 \times 100 \times 10^3 = 200 \text{ кГц}$ .

Розрахунок ємності фільтрувального конденсатора. Мінімально необхідна ємність вихідного фільтра визначається з умови обмеження амплітуди пульсацій вихідної напруги  $\Delta V_{\text{rip}} \leq 0,1 \text{ В}$  при максимальному струмі навантаження  $I_{\text{out}} = 5 \text{ А}$

$$C_{\text{min}} = \frac{I_{\text{out}}}{2 \cdot f_{\text{rip}} \cdot \Delta V_{\text{rip}}} = \frac{5}{2 \times 200 \times 10^3 \times 0,1} = \frac{5}{40 \times 10^3} = 125 \text{ мкФ.}$$

Загальна ємність двох паралельно включених конденсаторів С8 та С9  $C_{\Sigma} = C_8 + C_9 = 1000 + 1000 = 2000 \text{ мкФ}$ . Запас по ємності відносно розрахункового мінімуму  $\frac{C_{\Sigma}}{C_{\text{min}}} = \frac{2000}{125} = 16$ , що гарантує рівень пульсацій, значно нижчий за допустимий, навіть при динамічній зміні навантаження.

Перевірка фактичного рівня пульсацій. Фактична амплітуда пульсацій вихідної напруги при повному навантаженні

$$\Delta V_{\text{rip}}^{\text{fact}} = \frac{I_{\text{out}}}{2 \cdot f_{\text{rip}} \cdot C_{\Sigma}} = \frac{5}{2 \times 200 \times 10^3 \times 2000 \times 10^{-6}} = \frac{5}{800} \approx 6,25 \text{ мВ.}$$

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отриманий результат підтверджує, що рівень пульсацій  $\Delta V_{\text{rip}}^{\text{fact}} \approx 6,25 \text{ мВ}$  є на порядок нижчим за допустиме значення  $0,1 \text{ В}$ , що забезпечує високу якість вихідної напруги.

Розрахунок енергетичного буфера. Конденсатори С8 та С9 виконують також функцію енергетичного буфера при динамічній зміні навантаження. Запасена енергія у вихідному фільтрі при номінальній вихідній напрузі

$$W = \frac{C_{\Sigma} \cdot V_{\text{out}}^2}{2} = \frac{2000 \times 10^{-6} \times (29,5)^2}{2} = \frac{2000 \times 10^{-6} \times 870,25}{2} \approx 0,870 \text{ Дж.}$$

Час підтримання вихідної напруги без поповнення енергії від перетворювача при максимальному навантаженні та допустимому просіданні напруги  $\Delta V_{\text{drop}} = 1 \text{ В}$ , тому  $\Delta t = \frac{C_{\Sigma} \cdot \Delta V_{\text{drop}}}{I_{\text{out}}} = \frac{2000 \times 10^{-6} \times 1}{5} = 400 \text{ мкс.}$

Отримане значення  $\Delta t = 400 \text{ мкс}$  значно перевищує тривалість одного циклу перетворення  $T_{\text{sw}} = 10 \text{ мкс}$ , що підтверджує достатність обраної ємності для компенсації перехідних процесів при стрибкоподібній зміні навантаження.

Перевірка допустимого струму пульсацій конденсаторів. Ефективне значення струму пульсацій, що протікає через вихідні конденсатори, визначається як

$$I_{\text{rip}}^{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rip}}^{\text{fact}}}{ESR} \approx I_{\text{out}} \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot f_{\text{rip}} \cdot C_{\Sigma} \cdot R_{\text{load}}}} \quad (1.10)$$

При опорі навантаження  $R_{\text{load}} = V_{\text{out}}/I_{\text{out}} = 29,5/5 = 5,9 \text{ Ом}$

$$I_{\text{rip}}^{\text{rms}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \times 200 \times 10^3 \times 2000 \times 10^{-6} \times 5,9}} \approx 5 \cdot \sqrt{\frac{1}{4720}} \approx 5 \times 0,01455 \approx 0,073 \text{ А.}$$

Отримане значення струму пульсацій  $I_{\text{rip}}^{\text{rms}} \approx 73 \text{ мА}$  є суттєво нижчим за допустимий струм пульсацій електролітичних конденсаторів типорозміру

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

35×60 мм, що гарантує тривалий ресурс роботи елементів С8 та С9 без теплової деградації.

Схема ПС індукційного нагрівача з функцією дистанційного керування та моніторингу в середовищі Altium Designer зображена на рис. 1.5.

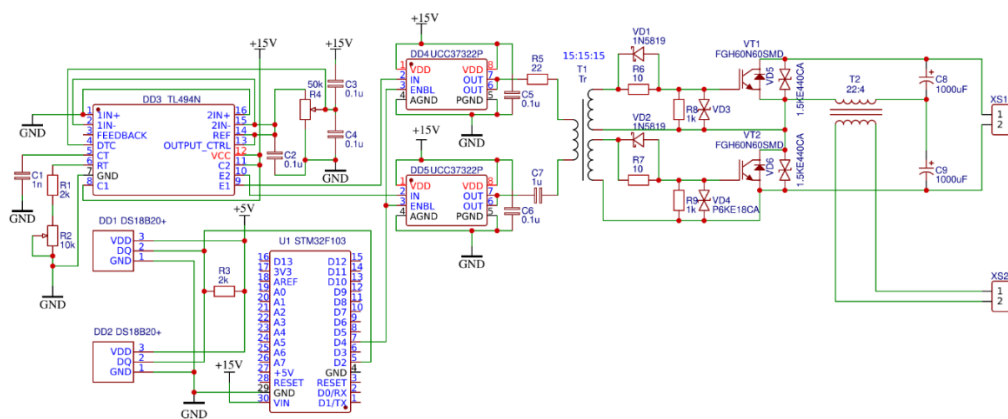


Рисунок 1.5 – Схема електрична принципова лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом

Проведений розрахунок вузлів підтверджує адекватність вибору елементів схеми та режимів їх роботи.

### 1.3. Проектування конструкторське

#### 1.3.1. Розроблення компоновання й конструкції ДВ

Розроблення конструкції друкованої плати розміром 130x110 мм виконано відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 23751-86 з урахуванням можливостей сучасного технологічного виробництва [18]. Для виготовлення плати обрано комбінований позитивний метод, який забезпечує високу точність формування провідникового рисунка, надійну металізацію отворів та достатню адгезійну міцність провідних шарів.

Технологічний процес передбачає вхідний контроль фольгованого склотекстоліту СФ-1-35Г, виготовлення заготовок з технологічними припусками, свердління монтажних і базових отворів, формування

провідникового рисунка та металізацію перехідних отворів. Контроль матеріалу здійснюється відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 10316-78 та включає перевірку геометричних параметрів, стану поверхні та міцності зчеплення мідної фольги з основою [19].

Свердління отворів виконується на верстатах з числовим програмним керуванням із застосуванням твёрдосплавного інструменту, що забезпечує високу точність позиціонування та якість обробки. Для створення електричних міжшарових з'єднань використовується послідовна хімічна та гальванічна металізація, яка забезпечує формування суцільного провідного шару на поверхні плати та у стінках отворів.

Формування топології друкованої плати здійснюється методом фотолітографії із застосуванням сухого фоторезисту та фотошаблонів. Після нанесення та проявлення захисного шару виконується гальванічне нарощування міді, нанесення захисного покриття на основі олов'яно-свинцевого сплаву, видалення фоторезисту та травлення незахищених ділянок мідної фольги.

Плата друкована в середовищі Altium Designer зображена на рис. 1.6.

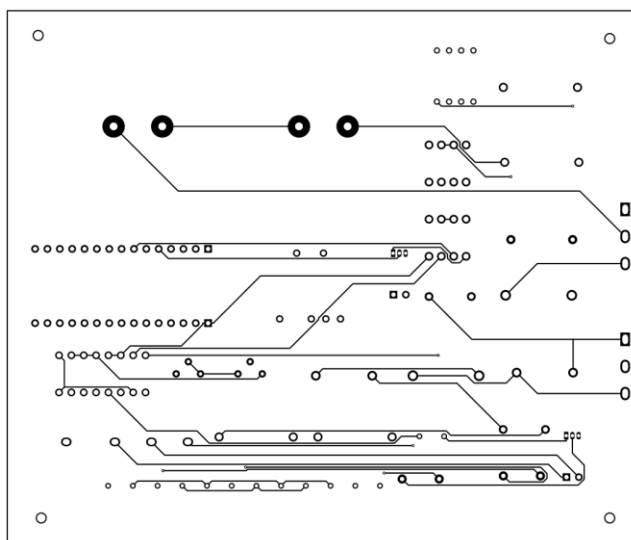


Рисунок 1.6 – Плата друкована (вигляд зверху) лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПЮВ 2.899.001 ПЗ				

На завершальному етапі проводиться термічна обробка покриття, механічне формування контуру плати, нанесення маркування та консервація контактних поверхонь. Застосування комбінованого позитивного методу дозволяє забезпечити високу якість друкованого монтажу, надійність металізованих з'єднань та відповідність конструкції вимогам сучасної радіоелектронної апаратури.

### 1.3.2. Оптимізація компонування ДВ

Технологічний процес виготовлення пристрою розроблено з урахуванням вимог до якості, надійності та технологічності радіоелектронної апаратури за ЄСКД, ДСТУ 2.601:2006 та чинних нормативних документів з виробництва радіоелектронної апаратури [24]. Його основу становить сукупність стандартизованих операцій, що забезпечують ефективність виробництва, економічну доцільність та відповідність виробу встановленим експлуатаційним характеристикам.

Виготовлення друкованого вузла передбачає комплектування та вхідний контроль електрорадіоелементів, підготовку друкованої плати, монтаж компонентів, паяння, очищення, контроль якості та функціональні випробування. Вхідний контроль дозволяє виявити механічні пошкодження, дефекти маркування та відхилення електричних параметрів елементів до початку складання.

Після розконсервації друковану плату піддають візуальному контролю та очищенню. Особливу увагу приділяють стану провідникового рисунка, металізованих отворів і контактних майданчиків. Для забезпечення якісного монтажу виконують підготовку поверхонь та лудіння виводів із використанням припою ПОС 61 і каніфольного флюсу.

Монтаж компонентів здійснюють ручним способом відповідно до складальної документації. Такий підхід забезпечує точне встановлення елементів, контроль якості монтажу та дотримання вимог електростатичного

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

захисту. Після встановлення компонентів виконують обрізання надлишків виводів та формування паяних з'єднань із застосуванням припою ПОС 61 і безкислотного флюсу на основі соснової каніфолі, що забезпечує високу механічну міцність і стабільність електричних параметрів.

Друкований вузол в середовищі Altium Designer зображено на рис. 1.7.

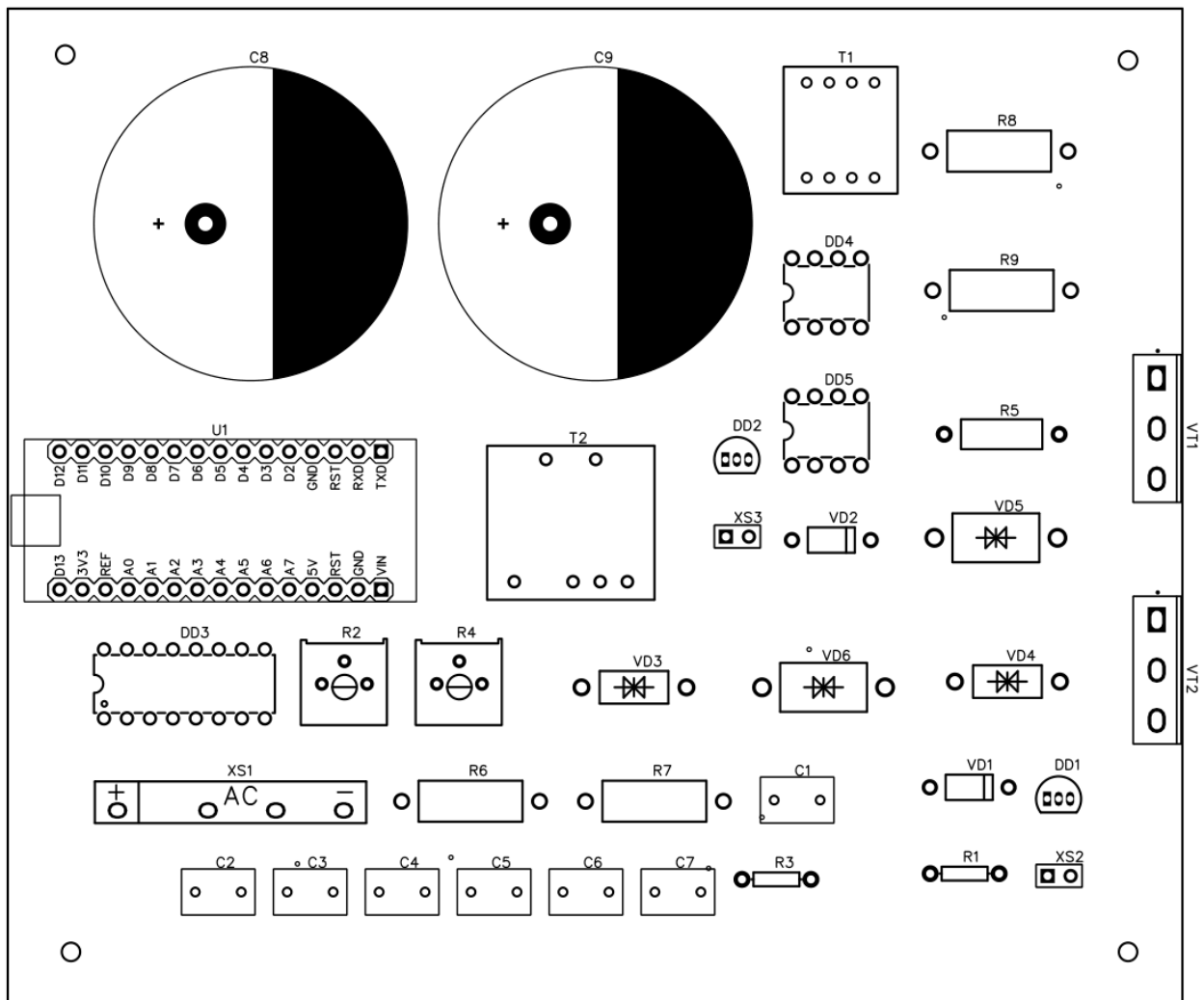


Рисунок 1.7 – Вузол друкований (вигляд зверху) лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом

Після завершення паяння друкований вузол очищують від залишків флюсу та технологічних забруднень, що запобігає виникненню корозійних процесів і погіршенню ізоляційних характеристик. Якість монтажу

перевіряють шляхом візуального контролю, а виявлені дефекти усувають повторним паянням.

Завершальний етап включає маркування виробу, функціональні випробування та контроль відповідності встановленим конструктивним, електричним і експлуатаційним вимогам. У разі виявлення несправностей проводять діагностику, заміну дефектних компонентів та повторну перевірку працездатності.

Друкований вузол у 3D режимі перегляду в середовищі Altium Designer зображено на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Друкований вузол у 3D режимі перегляду лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом

Для підвищення стійкості до впливу навколишнього середовища друкований вузол покривають захисним лаком УР-231 з подальшим сушінням гарячим повітрям за температури від 40 до 60 °С. Після сушіння виріб упаковують у технологічну тару відповідно до встановлених вимог.

Усі електрорадіоелементи встановлюються на друковану плату з одностороннього фольгованого склотекстоліту. Силові напівпровідникові елементи додатково оснащуються ребристими радіаторами охолодження, що

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

забезпечують ефективне відведення тепла та стабільність роботи в умовах підвищених теплових навантажень.

Застосування типової технологічної послідовності монтажу, поєднаної з вхідним і вихідним контролем, якісним паянням, захисним лакуванням та комплексними функціональними випробуваннями, забезпечує високу надійність, ремонтпридатність і довговічність розробленого лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом.

### 1.3.3. Розрахунок та забезпечення вимог щодо надійності

Надійність лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом є одним із основних показників якості виробу, оскільки пристрій працює у складі силового електронного обладнання, під час роботи зазнає дії підвищених температур, комутаційних процесів і можливих імпульсних перенапруг. Рівень надійності визначається правильністю вибору елементної бази, відповідністю режимів роботи паспортним характеристикам компонентів, якістю теплового режиму та наявністю захисних вузлів від перенапруг і перевантажень. Спочатку наведено оцінювання коефіцієнтів навантаження, далі виконано розрахунок сумарної інтенсивності відмов, після чого визначено ймовірність безвідмовної роботи та середнє напрацювання на відмову.

Оцінювання надійності виконується за коефіцієнтами навантаження найбільш відповідальних елементів схеми. Коефіцієнт навантаження визначається як відношення фактичного значення електричного параметра до максимально допустимого значення для конкретного елемента:

$$K = \frac{X_{\text{факт}}}{X_{\text{доп}}} \quad (1.11)$$

Найбільш навантаженими елементами схеми є інтегральні мікросхеми керування, силові транзистори, імпульсні трансформатори та вузли захисту. У процесі аналізу силової частини встановлено, що лабораторний блок живлення

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

призначений для роботи у режимі регульованого джерела напруги з USB-інтерфейсом, тому для нього характерні помірні значення струмів у колах керування та відносно невисоке теплове навантаження на елементи автоматики. Коефіцієнт навантаження для інтегральних мікросхем керування становить  $K = 0.69$ , що відповідає безпечному режиму роботи. Для силових транзисторів коефіцієнт навантаження прийнято  $K = 0.5$ , що свідчить про значний запас за струмом і напругою. Для імпульсних трансформаторів коефіцієнт навантаження становить  $K = 0.8$ , а для цифрових датчиків  $K = 0.5$ . Стабілітрони та TVS-елементи працюють у режимі захисного обмеження перенапруг, тому для них прийнято  $K = 1$ , що є допустимим для аварійних і номінальних захисних режимів.

Для оцінювання надійності виробу виконано розрахунок сумарної інтенсивності відмов з урахуванням кількості елементів кожного типу та коефіцієнтів електричного навантаження. Сумарна інтенсивність відмов для кожної групи елементів визначається за формулою:

$$\lambda_i = n_i \cdot \lambda_{0i} \cdot K_i, \quad (1.12)$$

де  $n_i$  – кількість елементів певного типу;

$\lambda_{0i}$  – довідкове значення інтенсивності відмов одного елемента;

$K_i$  – коефіцієнт навантаження.

Для постійних резисторів, кількість яких становить 9, за інтенсивності відмов одного елемента  $\lambda_{0i} = 1.2 \cdot 10^{-6}$  1/год та коефіцієнта навантаження  $K = 0.6$ , сумарна інтенсивність відмов визначається як:

$$\lambda_R = 9 \cdot 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot 0.6 = 6.48 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}$$

Аналогічно виконано розрахунок для інших груп елементів схеми. Найбільший внесок у загальну інтенсивність відмов вносять постійні резистори та інтегральні мікросхеми керування, що пояснюється їхньою значною кількістю у схемі та участю в безперервному режимі роботи.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Помітний вплив також мають конденсатори, діоди, силові транзистори та імпульсні трансформатори.

Для розрахунків за всіма позиціями використано довідкові значення інтенсивностей відмов за нормативним підходом.

Кількість ЕРЕ схеми та їхні базові інтенсивності відмов наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Елементи схеми та їхні характеристики надійності

Назва елемента	Кількість	$\lambda_0$ , 1/год	$n \cdot \lambda_0$ , 1/год	Коеф. навантаження К	Сумарна інтенсивність відмов $\lambda_i$ , 1/год	Ймовірність безвідмовної роботи $P(1000$ год)	Напрацювання на відмову $T_0$ , год
Роз'єми та клемники	2	5E-08	0.0000001	0.5	0.00000005	0.999950001	20000000
Резистори постійні	9	1.2E-06	0.0000108	0.6	0.00000648	0.99354095	154320.9877
Резистори підстроювальні	0	8E-07	0.0000015	0.5	0.00000075	0.999250281	1333333.333
Конденсатори електролітичні	2	9E-07	0.0000018	0.5	0.0000009	0.999100405	1111111.111
Конденсатори плівкові та керамічні	7	7E-07	0.0000049	0.5	0.00000245	0.997552999	408163.2653
Діоди випрямні	2	7E-07	0.0000014	0.6	0.00000084	0.999160353	1190476.19
Стабілітрони / TVS	4	8E-07	0.0000032	1	0.0000032	0.996805115	312500
Швидкодіючі силові діоди	0	1.5E-06	0.0000014	0.52	0.000000728	0.999272265	1373626.374
Силові транзистори	2	2E-06	0.000004	0.5	0.000002	0.998001999	500000
Тиристори	0	2.5E-06	0.000009	0.5	0.0000045	0.99551011	222222.2222
Інтегральні мікросхеми керування	4	2E-06	0.000008	0.69	0.00000552	0.994495207	181159.4203
Цифрові датчики	2	2.5E-06	0.000005	0.5	0.0000025	0.997503122	400000
Трансформатори імпульсні	2	7E-07	0.0000014	0.8	0.00000112	0.998880627	892857.1429
Варистори	0	8E-07	0.0000014	0.8	0.00000112	0.998880627	892857.1429
Запобіжник	0	1E-06	0.0000001	0.9	0.00000009	0.999910004	11111111.11
<b>Всього для пристрою</b>					<b>0.000032248</b>	<b>0.968266422</b>	<b>31009.67502</b>

Загальна інтенсивність відмов пристрою визначається як сума інтенсивностей відмов усіх груп елементів:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_i \lambda_i. \quad (1.13)$$

За результатами розрахунку отримано  $\lambda_{\Sigma} = 0.000032248$  1/год.

Ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу експлуатації визначається експоненціальним законом розподілу  $P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t}$ .

Для часу експлуатації  $t = 1000$  год одержано:

$$P(1000) = e^{-0.000032248 \cdot 1000} = 0.968266422.$$

Отриманий результат свідчить про те, що ймовірність безвідмовної роботи лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом протягом 1000 годин становить близько 96.8.

Одним із найважливіших показників надійності є середнє напрацювання на відмову, яке визначається за формулою:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (1.14)$$

Підставивши отримане значення сумарної інтенсивності відмов, одержимо  $T_0 = \frac{1}{0.000032248} = 31009.67502$  год.

У перерахунку  $31009,67502$  год  $\div 24 = 1292,0697925$  діб на календарний час це становить приблизно 1292 доби безперервної роботи до виникнення статистично очікуваної відмови.

Проведений розрахунок показав, що переважна більшість елементів схеми працює зі зниженими коефіцієнтами навантаження, які знаходяться в межах від 0.5 до 1.0. Особливо важливим є те, що силові транзистори, діоди, інтегральні мікросхеми керування та цифрові датчики працюють із достатнім запасом за напругою, струмом і потужністю. Додаткове підвищення надійності забезпечується застосуванням вузлів захисту на TVS-елементах, фільтрувальних конденсаторів, імпульсних трансформаторів, а також обмеженням робочих режимів силової частини та дотриманням допустимих температурних умов експлуатації.

Внесок елементів у сумарну інтенсивність відмов зображено на рис. 1.9.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

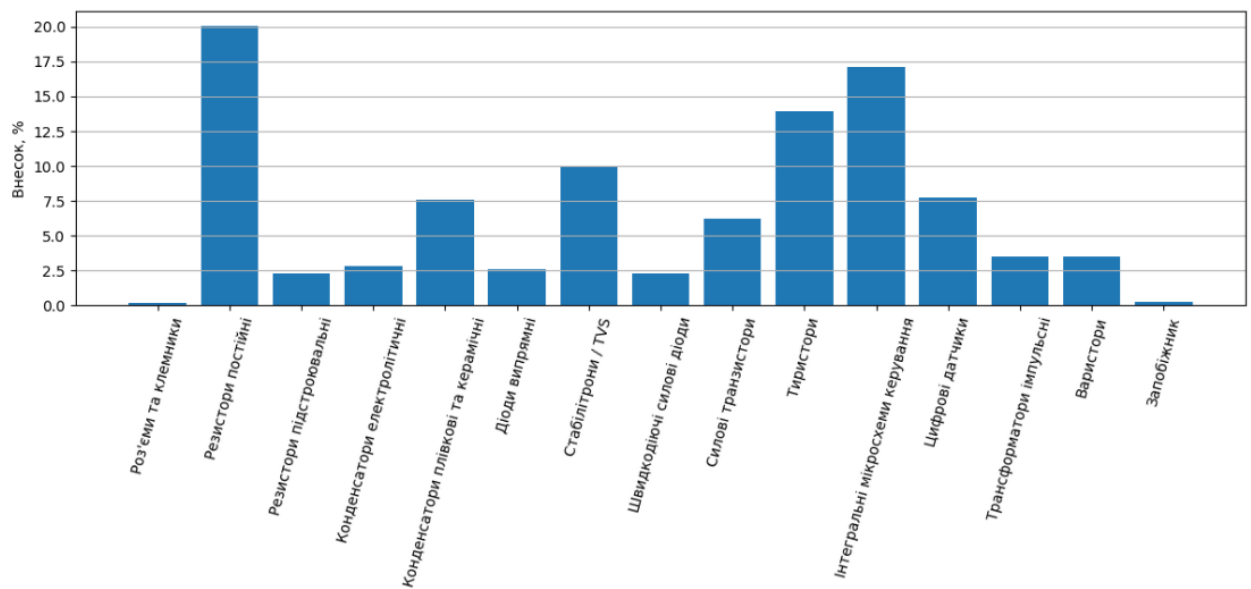


Рисунок 1.9 – Внесок елементів у сумарну інтенсивність відмов виробу

Ймовірність безвідмовної роботи зображено на рис. 1.10.

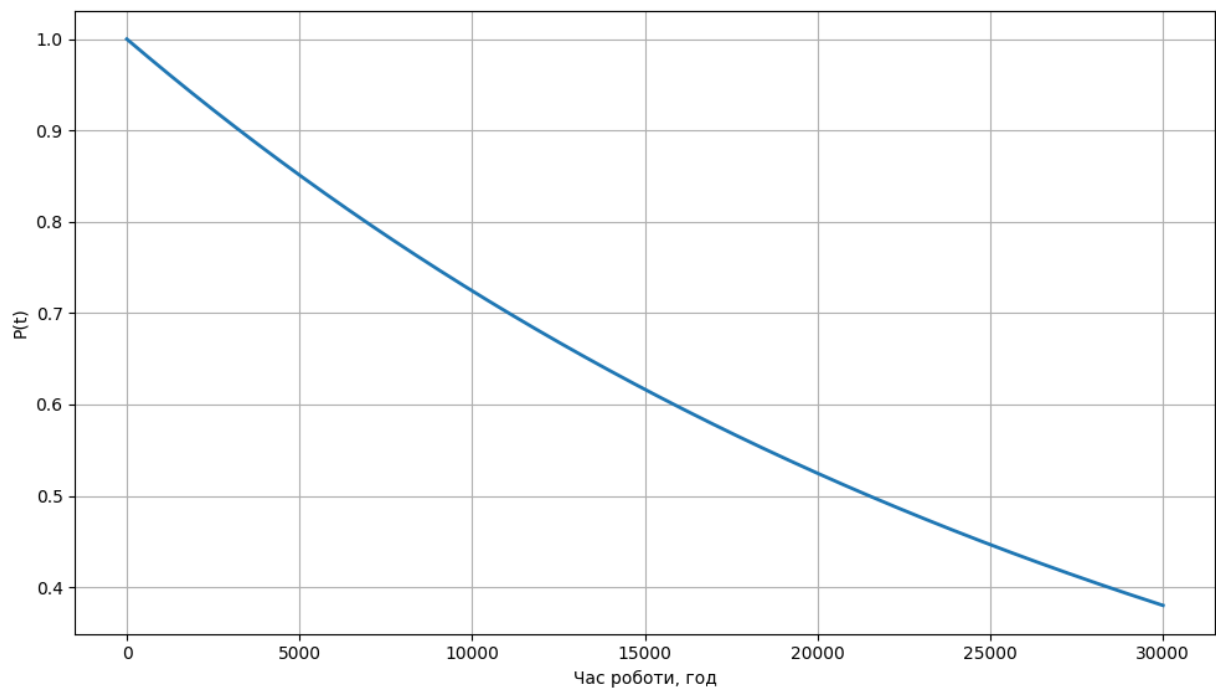


Рисунок 1.10 – Ймовірність безвідмовної роботи виробу

Структура сумарної інтенсивності відмов зображено на рис. 1.11.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



що дозволило сформувати основні функціональні, конструктивні та експлуатаційні вимоги до розроблюваного пристрою.

На основі проведеного аналізу розроблено структурну та схему електричну принципову лабораторного блока живлення. Виконано функціональний поділ пристрою на окремі вузли, до складу яких входять вузол формування тактової частоти ШІМ-контролера, вузол задання режиму роботи, вузол цифрового керування та USB інтерфейсу, вузол температурного моніторингу, драйвери силових ключів, імпульсний трансформатор керування, напівмостовий силовий інвертор, високочастотний силовий трансформатор та вихідний накопичувально-фільтрувальний каскад. Проведений аналіз підтвердив взаємну узгодженість усіх функціональних вузлів та їх відповідність поставленим технічним вимогам.

У процесі схемотехнічного проектування обґрунтовано вибір елементної бази з урахуванням електричних, частотних, теплових та конструктивних характеристик компонентів. Виконано розрахунки основних параметрів генератора ШІМ-сигналів, драйверів затворів, імпульсного трансформатора керування, силового інвертора, високочастотного трансформатора та вихідного фільтра. Досліджено особливості реалізації цифрового керування на базі мікроконтролера STM32F103C8T6 та організації обміну даними з персональним комп'ютером через інтерфейс USB CDC.

У конструкторській частині обґрунтовано вибір друкованої плати, способу монтажу елементів та технології виготовлення друкованого вузла відповідно до вимог чинних нормативних документів. Розглянуто питання теплового режиму силових компонентів, температурного контролю, електромагнітної сумісності, технологічності виготовлення та ремонтпридатності конструкції. Запропоновані технічні рішення забезпечують надійну роботу пристрою в широкому діапазоні навантажень та режимів експлуатації.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані результати підтвердили технічну можливість реалізації лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом, цифровим керуванням і функцією температурного моніторингу. Розроблена конструкція забезпечує стабільність вихідних параметрів, можливість дистанційного налаштування режимів роботи, підвищену інформативність процесу експлуатації та відповідає вимогам, сформульованим у технічному завданні.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 2.1. Ризик як кількісна оцінка небезпек

Під час проектування, виготовлення та експлуатації лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом особливого значення набуває оцінювання потенційних небезпек і визначення рівня ризику, пов'язаного з впливом шкідливих та небезпечних виробничих чинників. Сучасна концепція безпеки життєдіяльності ґрунтується на ризик орієнтованому підході, відповідно до якого абсолютна безпека технічних систем є практично недосяжною, тому основним завданням стає зниження ризику до прийняттого рівня. Такий підхід закріплено у положеннях Закону України “Про охорону праці” [25], Кодексу цивільного захисту України та міжнародних стандартів управління ризиками.

Згідно з положеннями стандарту ДСТУ ISO 31000:2018 ризик розглядається як вплив невизначеності на досягнення поставлених цілей [20]. У сфері технічної безпеки ризик характеризує ймовірність виникнення небезпечної події та тяжкість можливих наслідків для людини, обладнання або навколишнього середовища. Кількісно ризик визначається добутком імовірності виникнення небезпечної події на величину можливих втрат  $R = P \cdot C$ , де  $R$  є величиною ризику,  $P$  є імовірністю реалізації небезпечної події,  $C$  характеризує тяжкість її наслідків.

Застосування кількісної оцінки ризику дозволяє обґрунтовано порівнювати різні небезпеки між собою та визначати пріоритетність заходів захисту. Для електронних пристроїв силової електроніки, до яких належить розроблюваний лабораторний блок живлення, найбільш характерними є ризики ураження електричним струмом, термічні ризики, пожежна безпека, ризики пошкодження електронних компонентів та ризики, пов'язані з електромагнітними завадами.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Під час експлуатації лабораторного блока живлення основну небезпеку становлять ділянки схеми, у яких присутні підвищені значення напруги та струму. У силовій частині пристрою використовуються IGBT транзистори FGH60N60SMD, високочастотний трансформатор та накопичувальні конденсатори значної ємності. Навіть після відключення живлення на конденсаторах може зберігатися небезпечний електричний заряд, здатний спричинити ураження людини електричним струмом або пошкодження елементів схеми. Тому під час проектування враховано вимоги електробезпеки, визначені у Законі України “Про охорону праці”, Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів та стандарті ДСТУ EN 61010-1:2017 [21].

Для оцінювання ризику ураження електричним струмом враховується імовірність випадкового контакту користувача зі струмопровідними частинами та тяжкість можливих наслідків. Зменшення зазначеного ризику досягнуто шляхом застосування гальванічної розв’язки між цифровою та силовою частинами пристрою, використання ізольованих рознімних з’єднань, захисного корпусу та дотримання нормативних відстаней між провідниками друкованої плати відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 23751-86.

Окрему групу становлять теплові ризики. У процесі роботи силові транзистори та магнітопроводи трансформаторів розсіюють значну кількість теплової енергії. Перегрів елементів може призвести до деградації ізоляції, зміни параметрів електронних компонентів або виходу пристрою з ладу. Для контролю температурного режиму у схемі використано цифрові датчики DS18B20. Сенсор DD1 забезпечує моніторинг температури радіаторів силових транзисторів, а сенсор DD2 може використовуватися для контролю температури зовнішнього пристрою або навантаження. Отримані дані передаються до мікроконтролера STM32F103C8T6, що створює умови для реалізації програмних алгоритмів захисту від перегріву та своєчасного відключення силової частини.

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Пожежна небезпека електронного обладнання пов'язана з можливістю виникнення коротких замикань, перевантажень та локального перегріву елементів. Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні під час проєктування необхідно забезпечити використання матеріалів із достатньою теплостійкістю та електричною міцністю. Для виготовлення друкованої плати застосовано склотекстоліт, який характеризується високими ізоляційними властивостями та стійкістю до термічних навантажень. Додатковий рівень захисту забезпечується використанням супресорів R6KE18CA та 1.5KE440CA, призначених для обмеження комутаційних перенапруг.

Суттєвим чинником безпеки є також електромагнітна сумісність пристрою. Високочастотна комутація силових ключів супроводжується генерацією електромагнітних завад, які можуть негативно впливати на роботу мікроконтролера та периферійних пристроїв. Вимоги щодо забезпечення електромагнітної сумісності регламентуються положеннями ДСТУ EN 61000 [22]. Зниження ризику порушення функціонування досягнуто шляхом просторового розділення силових і сигнальних кіл, використання трансформаторної розв'язки та локальних фільтрувальних конденсаторів у колах живлення [4-6] для зниження рівня завад.

Для оцінювання рівня безпеки виробу доцільно використовувати матрицю ризику, яка враховує як імовірність виникнення небезпечної події, так і тяжкість її наслідків. У результаті проведеного аналізу встановлено, що найбільший потенційний ризик пов'язаний з електричною енергією силового інвертора та тепловими режимами роботи силових напівпровідникових елементів. Запровадження комплексу конструктивних, схемотехнічних та програмних заходів дозволяє суттєво знизити рівень цих ризиків до прийнятних значень.

Тому кількісна оцінка небезпек є важливим етапом забезпечення безпеки лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом. Виконаний аналіз

					<b>ПЮВ 2.899.001 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ризиків дозволив визначити найбільш критичні чинники небезпеки та обґрунтувати застосування технічних рішень, спрямованих на підвищення електробезпеки, пожежної безпеки, надійності та електромагнітної сумісності пристрою. Реалізація зазначених заходів забезпечує відповідність розробленого виробу чинним нормативним вимогам та створює умови для його безпечної експлуатації протягом усього терміну служби виробу.

## 2.2. Долікарська допомога при ураженні електричним струмом

Для розроблюваного лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом питання надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом має особливе значення, оскільки під час налагодження, випробування та експлуатації пристрою персонал контактує з електричними колами різного рівня напруги. Небезпека ураження електричним струмом визначається здатністю електричного струму викликати порушення функцій нервової системи, дихання та серцево судинної діяльності людини. Відповідно до Закону України "Про охорону праці", Кодексу цивільного захисту України та вимог НПАОП 40.1 1.21 98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів роботодавець зобов'язаний забезпечити навчання працівників правилам надання домедичної допомоги постраждалим від дії електричного струму [23].

Ураження електричним струмом може виникати внаслідок безпосереднього контакту людини зі струмопровідними частинами обладнання, пошкодження ізоляції провідників, пробою корпусів електронних пристроїв або порушення вимог електробезпеки під час виконання монтажних та ремонтних робіт. Ступінь небезпеки визначається величиною струму, тривалістю його проходження через організм, шляхом протікання струму та фізіологічним станом потерпілого. Особливо небезпечним вважається

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

проходження струму через ділянки серце рука або рука рука, оскільки в такому випадку значно зростає ймовірність виникнення фібриляції шлуночків серця.

Згідно з вимогами ДСТУ EN 61140 2015 та ДСТУ EN 50110 1 2023 електричний струм може викликати місцеві та загальні електротравми. До місцевих ушкоджень належать електричні опіки, металізація шкіри, електричні знаки та механічні травми. Загальні електротравми характеризуються порушенням діяльності життєво важливих органів і систем організму, втратою свідомості, судомами, зупинкою дихання або серцевої діяльності.

Першочерговою дією під час надання допомоги є негайне припинення впливу електричного струму на потерпілого. Відключення джерела живлення повинно здійснюватися за допомогою вимикача, рубильника або іншого комутаційного апарата. Якщо швидке відключення неможливе, допускається відокремлення потерпілого від струмопровідних частин із застосуванням сухих ізолювальних предметів, виготовлених із дерева, пластмаси або інших діелектричних матеріалів. При цьому особа, яка надає допомогу, повинна уникати прямого контакту з тілом потерпілого та струмопровідними елементами електроустановки.

Після звільнення від дії електричного струму необхідно оцінити стан потерпілого. Визначається наявність свідомості, самостійного дихання та кровообігу. У випадку збереження свідомості потерпілому забезпечується спокій, контроль загального стану та медичне спостереження до прибуття фахівців екстреної медичної допомоги. Навіть за відсутності видимих ушкоджень постраждалий підлягає обов'язковому медичному огляду, оскільки наслідки електротравми можуть проявитися через певний час після події.

Якщо потерпілий перебуває без свідомості, але має ознаки самостійного дихання та серцевої діяльності, його необхідно покласти у стабільне бокове положення, забезпечити прохідність дихальних шляхів та контролювати

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

життєві функції до прибуття медичних працівників. Одночасно викликається бригада екстреної медичної допомоги за номером 103.

У разі відсутності дихання або ознак кровообігу необхідно негайно розпочати серцево легеневу реанімацію відповідно до вимог наказу Міністерства охорони здоров'я України № 441 від 09.03.2022 щодо надання домедичної допомоги особам у невідкладних станах. Реанімаційні заходи включають виконання компресій грудної клітки із частотою від 100 до 120 натискань за хвилину та глибиною приблизно 5-6 сантиметрів для дорослої людини. Співвідношення компресій і штучних вдихів становить 30 до 2. Реанімацію продовжують до відновлення життєвих функцій або прибуття медичного персоналу.

Особливу увагу слід приділяти електричним опікам, які часто супроводжують ураження струмом. Уражені ділянки необхідно закрити стерильною сухою пов'язкою без застосування мазей або інших лікарських засобів. Забороняється видаляти частини одягу, що прилипли до місця опіку, або проколювати пухирі. Подальше лікування здійснюється виключно медичними працівниками.

Під час експлуатації лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом ризик електротравм зменшується завдяки використанню гальванічної розв'язки між вузлами керування та силовою частиною, застосуванню захисних елементів від перенапруг, ізоляції провідників та дотриманню вимог ДСТУ EN 62368 1 2022 щодо безпечності електронного обладнання. Незважаючи на це, виконання робіт із налагодження та випробування пристрою повинно здійснюватися лише за умови дотримання вимог електробезпеки, використання справних вимірювальних приладів та засобів індивідуального захисту.

Своєчасне та правильне надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом є одним із найважливіших чинників збереження життя та здоров'я потерпілих. Дотримання вимог Закону України "Про охорону

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

праці", НПАОП 40.1 1.21 98, ДСТУ EN 61140 2015, ДСТУ EN 50110 1 2023 та чинних нормативних документів Міністерства охорони здоров'я України забезпечує належний рівень готовності персоналу до дій в аварійних ситуаціях і сприяє зниженню тяжкості наслідків електротравматизму під час експлуатації електронної апаратури.

### 2.3. Висновок до розділу 2

У другому розділі розглянуто основні аспекти безпеки життєдіяльності та охорони праці, що є актуальними під час розроблення, налагодження та експлуатації лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом. Проведено аналіз ризику як кількісної оцінки небезпек та визначено основні фактори, що можуть впливати на безпеку персоналу під час роботи з електронною апаратурою.

Особливу увагу приділено питанням надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом. Розглянуто порядок звільнення потерпілого від дії струму, оцінювання його стану та виконання необхідних реанімаційних заходів відповідно до чинних нормативно правових актів і стандартів у сфері охорони праці та електробезпеки.

Виконаний аналіз підтвердив, що дотримання вимог безпеки, застосування технічних засобів захисту та належна підготовка персоналу забезпечують зниження ризику виникнення небезпечних ситуацій і створюють умови для безпечної експлуатації розробленого пристрою.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра виконано розроблення лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом, призначеного для формування та дослідження регульованих електричних сигналів із можливістю програмного керування параметрами роботи. Результати проектування підтвердили технічну можливість створення функціонального пристрою, який поєднує переваги цифрового керування та сучасних методів імпульсного перетворення електричної енергії.

Проведений аналіз існуючих лабораторних джерел живлення та програмно керованих перетворювачів підтвердив актуальність розроблення пристроїв, що забезпечують дистанційне налаштування режимів роботи, моніторинг параметрів та інтеграцію з персональним комп'ютером. Особливого значення такі рішення набувають під час проведення лабораторних досліджень, налагодження електронної апаратури та випробування силових електронних систем.

У процесі виконання роботи розроблено структурну та схему електричну принципову лабораторного блока живлення. В основу пристрою покладено ШІМ контролер TL494N, який забезпечує формування імпульсних сигналів керування, а також мікроконтролер STM32F103C8T6, що реалізує цифрове керування режимами роботи та обмін даними через USB інтерфейс. Передавання інформації між пристроєм і персональним комп'ютером реалізовано за протоколом USB CDC із формуванням віртуального COM порту, що забезпечує сумісність із сучасними операційними системами без застосування спеціалізованого обладнання.

Виконано обґрунтування вибору елементної бази та проведено аналіз функціонування окремих вузлів пристрою. Розглянуто роботу генератора тактової частоти, вузла формування режимів ШІМ модуляції, драйверів силових ключів, імпульсного трансформатора керування, напівмостового

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інвертора, високочастотного силового трансформатора та вихідного фільтрувального каскаду. Застосування драйверів UCC37322P, трансформаторної гальванічної розв'язки та силових IGBT транзисторів FGH60N60SMD забезпечило надійне керування силовою частиною та підвищення електробезпеки пристрою.

Особливістю розробленого блока живлення є можливість програмного формування різних режимів роботи та зміни параметрів вихідного сигналу за допомогою хост програми. Реалізовано підтримку синусоїдальної, прямокутної, пилкоподібної та трапецеїдальної форм сигналів, що значно розширює функціональні можливості пристрою порівняно з традиційними лабораторними джерелами живлення.

Для забезпечення контролю теплових режимів передбачено використання цифрових температурних сенсорів DS18B20. Один із датчиків призначено для моніторингу температури радіаторів силових транзисторів, тоді як другий може використовуватися для контролю температури зовнішнього об'єкта або досліджуваного пристрою. Такий підхід підвищує інформативність системи та дозволяє реалізувати додаткові функції захисту.

У конструкторській частині виконано розроблення друкованої плати та друкованого вузла з урахуванням вимог технологічності, електромагнітної сумісності, теплових режимів і ремонтпридатності. Обґрунтовано вибір матеріалів, технології виготовлення та способів монтажу елементної бази. Розроблене компонування забезпечує раціональне розміщення функціональних вузлів, зменшення паразитних зв'язків та підвищення надійності роботи пристрою.

У розділі безпеки життєдіяльності розглянуто питання оцінювання ризику небезпечних факторів та заходи щодо надання долікарської допомоги при ураженні електричним струмом. Проаналізовано вимоги чинних нормативних документів у галузі охорони праці та електробезпеки, що

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволило підтвердити безпечність експлуатації розробленого пристрою за умови дотримання встановлених правил роботи.

Отримані результати підтвердили працездатність запропонованих схемотехнічних і конструктивних рішень. Розроблений лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом являє собою завершений технічний виріб, придатний для використання у навчальних лабораторіях, науково дослідних роботах, ремонтних майстернях та під час налагодження сучасних електронних і силових пристроїв.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mruga, D.; Berketa, K.; Sverstiuk, A.; Martsenyuk, V.; Klos-Witkowska, A.; Palianytsia, Y.; Dzyadevych, S.; Soldatkin, O. Amperometric Biosensor Based on Glutamate Oxidase to Determine AST Activity. *Sensors* 2024, 24(24), 7891. <https://doi.org/10.3390/s24247891>
2. Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G., & Demirtas, K. (2016). Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 499–516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>
3. Khymych, H.; Dunets, V.; Duda, S.; Palaniza, Y.; Kornieiev, K. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. *Radioelectronics and Communications Systems* 2023, 66, 609–615. <https://doi.org/10.3103/S0735272722080039>
7. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *\*Fundamentals of Power Electronics\** (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>
8. Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
9. Palianytsia, Y.; Dunets, V.; Khvostivska, L. Modeling of Phased Array Antenna for Data Transmission in Urban Environment. In *Proc. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP-2023)*. CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3628, pp. 370–381.
10. Baliga, B. J. (2008). *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47314-7>
11. Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications* (4th ed.). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00001-7>
12. Palaniza, Y.; Martseniuk, A.; Yaskiv, V. Active Phased Array Antenna with Parallel Feeder Excitation at 3.7 GHz. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* 2024, 22(2), 127–133. <https://doi.org/10.15598/aeee.v22i2.5290>

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

13. Remote IoT Education Laboratory for Microcontrollers Based on the STM32 Chips (PMC). — Describes IoT technology in the teaching of microprocessor technology, combining reality and virtualization of the microcontroller technology laboratory, including GPIO, PWM generation, A/D converters, and USART/UART communication. Received 2021 Dec 29; Accepted 2022 Feb 11.

14. Digitally Controlled Power Supply Design with Continuously Adjustable Input Voltage Based on UCD3138. IEEE Conference Publication. IEEE Xplore. (Digital control power supplies dynamically adjust and change the running state of the system in real time through accurate algorithm calculation.) doi:10.1109/8816193

15. Sarnago, H., Lucia, O., Mediano, A., & Burdio, J. M. (2013). Efficient and cost-effective ZCS full-bridge inverter for induction heating. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(5), 2128–2141. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2191757>

16. Horowitz, P., & Hill, W. (2015). The Art of Electronics (3rd ed.). Cambridge University Press.

17. Embedded system of temperature testing based on DS18B20. IET Conference Publication, IEEE Xplore. — Introduces a temperature testing system using the 1-Wire digital thermometer DS18B20, describing its temperature testing principle and the optimized arithmetic of the Search ROM command. doi:10.1049/cp:20084752381

18. Khvostivska, L.; Khvostivskyi, M.; Dediv, I.; Yatskiv, V.; Palaniza, Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3468, pp. 173–180.

19. Kamli, M., Yamamoto, S., & Abe, M. (1996). A 50/150 kHz half-bridge inverter for induction heating applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43(1), 163–172. <https://doi.org/10.1109/41.481425>

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

20. ДСТУ ГОСТ 10316-2008 (ГОСТ 10316-78). Гетинакс і склотекстоліт фольгований. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2008.

21. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.

22. ДСТУ EN 61010-1:2017. Вимоги безпеки до електричного обладнання для вимірювання, управління та лабораторного використання. Частина 1. Загальні вимоги. (IEC 61010-1:2010 + AMD1:2016, IDT). Київ, 2017.

24. 30. Frenzel, L. E. (2016). Principles of Electronic Communication Systems (4th ed.). McGraw-Hill Education.

25. ДСТУ ГОСТ 23751:2009 (ГОСТ 23751-86). Плати друковані. Основні параметри конструкції. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.

26. ДСТУ EN 61000-6-4:2016 (EN 61000-6-4:2007+A1:2011). Електромагнітна сумісність. Частина 6-4. Норми емісії для промислових середовищ. Київ: Держспоживстандарт України, 2016.

27. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджені Держнаглядохоронпраці України, 1998.

28. ДСТУ 2.601:2006. Єдина система конструкторської документації. Правила виконання експлуатаційних документів. Київ: Держспоживстандарт України, 2006.

29. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (із змінами). Верховна Рада України, 1992.

					ПЮВ 2.899.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

# ДОДАТКИ

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

к.т.н., доц., зав. каф. РТ Дунець В.Л.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу бакалавра

на тему:

**«Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом»**

**УЗГОДЖЕНО:**

Керівник кваліфікаційної роботи

Паляниця Ю.Б. \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ВИКОНАВЕЦЬ:**

студент групи РАс-41

Пашковський Ю. В. \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Тернопіль, 2026

## **1 НАЗВА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ Й ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ**

1.1 Назва кваліфікаційної роботи: «Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом».

1.2 Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є завдання на кваліфікаційну роботу № 4/9-198 від «28» квітня 2026 р.

## **2 ВИКОНАВЕЦЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

2.1 Виконавець: студент групи РАс-41 Пашковський Юрій Володимирович, кафедра радіотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

## **3 МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Розробити програмно-керований лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом на базі мікроконтролера STM32F103C8T6, який забезпечує:

- дистанційне керування режимами роботи;
- формування сигналів різної форми;
- контроль температурних параметрів;
- високий рівень надійності та електробезпеки;
- можливість модернізації програмного забезпечення.

## **4 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

### **4.1 Основні параметри**

4.1.1 Пристрій повинен забезпечувати обмін даними з персональним комп'ютером через інтерфейс USB із реалізацією класу USB CDC (Virtual COM Port). Параметри віртуального COM-порту повинні становити: швидкість передачі даних 115200 біт/с, 8 біт даних, без контролю парності, 1 стоповий біт.

4.1.2 Лабораторний блок живлення повинен забезпечувати формування синусоїдального, прямокутного, трапецієподібного, пилкоподібного сигналів, а також сигналу довільної форми, що задається користувачем.

4.1.3 Пристрій повинен забезпечувати контроль температури силових транзисторів та зовнішнього об'єкта за допомогою двох цифрових сенсорів температури DS18B20.

### **4.2. Загальні технічні вимоги**

4.2.1 Лабораторний блок живлення повинен відповідати вимогам цього технічного завдання, чинним нормативним документам, а також конструкторській і технологічній документації на виріб конкретного типу.

4.2.2 Пристрій повинен забезпечувати стабільну роботу з моменту ввімкнення та виконувати дистанційне керування і моніторинг параметрів без порушення працездатності протягом тривалого часу експлуатації.

4.2.3 Усі електричні кола пристрою повинні бути захищені від коротких замикань, перевантажень та перегріву. Конструкція виробу повинна забезпечувати електробезпеку під час експлуатації, технічного обслуговування і ремонту.

4.2.4 Силова та керуюча частини пристрою повинні мати гальванічну розв'язку. Електрична міцність і опір ізоляції повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів для електронної апаратури.

4.2.5 За механічними та кліматичними умовами експлуатації виріб повинен відповідати вимогам ДСТУ 15150 для кліматичного виконання УХЛ 4.2 та забезпечувати працездатність при температурі навколишнього середовища від 10 °С до 35 °С і відносній вологості повітря до 80 %.

4.2.6 Час витримки виробу після транспортування або зберігання в умовах, відмінних від робочих, перед введенням в експлуатацію повинен становити не менше 24 годин.

4.2.7 До комплекту поставки повинні входити: лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом; USB-кабель; комплект запасних частин і допоміжних елементів (за наявності); експлуатаційна документація; паспорт виробу.

4.2.8 Напрацювання на відмову повинно становити не менше 10000 годин. Імовірність безвідмовної роботи повинна бути не менше 0,9. Середній термін служби виробу повинен становити не менше 8 років.

### **4.3. Правила приймання**

4.3.1 Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом має підлягати приймально-здавальним і періодичним випробуванням.

4.3.2 Під час приймально-здавальних випробувань виріб має проходити суцільний контроль на відповідність вимогам цього технічного завдання, конструкторської документації та програмного забезпечення. Перевірці підлягають працездатність усіх функціональних вузлів, правильність роботи USB-інтерфейсу, температурного моніторингу, системи керування та формування вихідних сигналів. У разі виявлення невідповідностей виріб повертається для усунення дефектів. Після усунення виявлених недоліків проводяться повторні випробування, результати яких вважаються остаточними.

4.3.3 Періодичним випробуванням підлягають не менше трьох зразків лабораторних блоків живлення кожного типу, які попередньо пройшли приймально-здавальні випробування. Періодичні випробування проводяться під час виготовлення установчих партій, а також не рідше одного разу на два роки.

4.3.4 У разі отримання незадовільних результатів визначаються причини невідповідності, виконуються коригувальні заходи та проводяться повторні періодичні випробування на подвоєній кількості зразків. Якщо під час повторних випробувань хоча б один виріб не відповідає встановленим

вимогам, приймання та відвантаження продукції припиняються до ухвалення рішення замовником і підприємством-виробником.

4.3.5 Випробування на надійність мають проводитися не рідше одного разу на три роки. Для проведення таких випробувань приймаються такі вихідні параметри:

- приймальний рівень імовірності безвідмовної роботи:  $P\alpha = 0,95$ ;
- бракувальний рівень:  $P\mu = 0,9$ ;
- ризик виробника:  $\alpha = 0,1$ ;
- ризик споживача:  $\beta = 0,2$ .

## 5 ВИМОГИ ДО ДОКУМЕНТАЦІЇ

5.1 Конструкторська документація на виріб має відповідати вимогам ЄСКД, ДСТУ та іншим чинним нормативним документам, що регламентують оформлення технічної документації.

5.2 Комплект конструкторської документації має містити:

- пояснювальну записку;
- структурну схему пристрою;
- електричну принципову схему;
- креслення друкованої плати;
- складальне креслення друкованого вузла.

## 6 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Таблиця 6.1 – Стадії та етапи виконання кваліфікаційної роботи

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1.	Розробка та затвердження технічного завдання	28.04.2026 – 29.04.2026
2.	Аналіз технічного завдання, підбір бібліографічних матеріалів, необхідних для виконання роботи	30.04.2026 – 03.05.2026
3.	Аналіз сучасних систем лабораторних блоків живлення та методів їх цифрового керування	04.05.2026 – 06.05.2026
4.	Розробка структурної схеми лабораторного блока живлення з USB інтерфейсом	07.05.2026 – 10.05.2026
5.	Розробка схеми електричної принципової	11.05.2026 – 14.05.2026
6.	Розробка імпульсного блока живлення та вузла стабілізації напруги	15.05.2026 – 17.05.2026
7.	Опис роботи керуючого модуля (STM32F103C8T6), інтерфейсу USB CDC та ШІМ-контролера TL494N	18.05.2026 – 21.05.2026
8.	Розрахунок основних електричних параметрів пристрою	22.05.2026 – 24.05.2026
9.	Вибір компонентної бази для розроблюваних схем	25.05.2026 – 27.05.2026
10.	Компонування та трасування друкованого вузла лабораторного блока живлення	28.05.2026 – 30.05.2026
11.	Розрахунок надійності проєктованого виробу та параметрів друкованого монтажу	31.05.2026 – 01.06.2026
12.	Розробка конструкторської документації на лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом	02.06.2026 – 04.06.2026
13.	Розділ безпеки життєдіяльності, основи охорони праці	05.06.2026
14.	Нормоконтроль	09.06.2026
15.	Перевірка кваліфікаційної роботи на плагіат	10.06.2026
16.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	10.06.2026
17.	Захист кваліфікаційної роботи	24.06.2026

Терміни виконання кваліфікаційної роботи встановлюються відповідно до графіка навчального процесу та узгоджуються з керівником кваліфікаційної роботи.

## **7 ДОДАТКОВІ УМОВИ ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

7.1 У процесі виконання кваліфікаційної роботи до технічного завдання можуть вноситися уточнення, зміни та доповнення. Зміни допускаються за умови їх погодження з керівником кваліфікаційної роботи та відповідності загальній меті роботи.

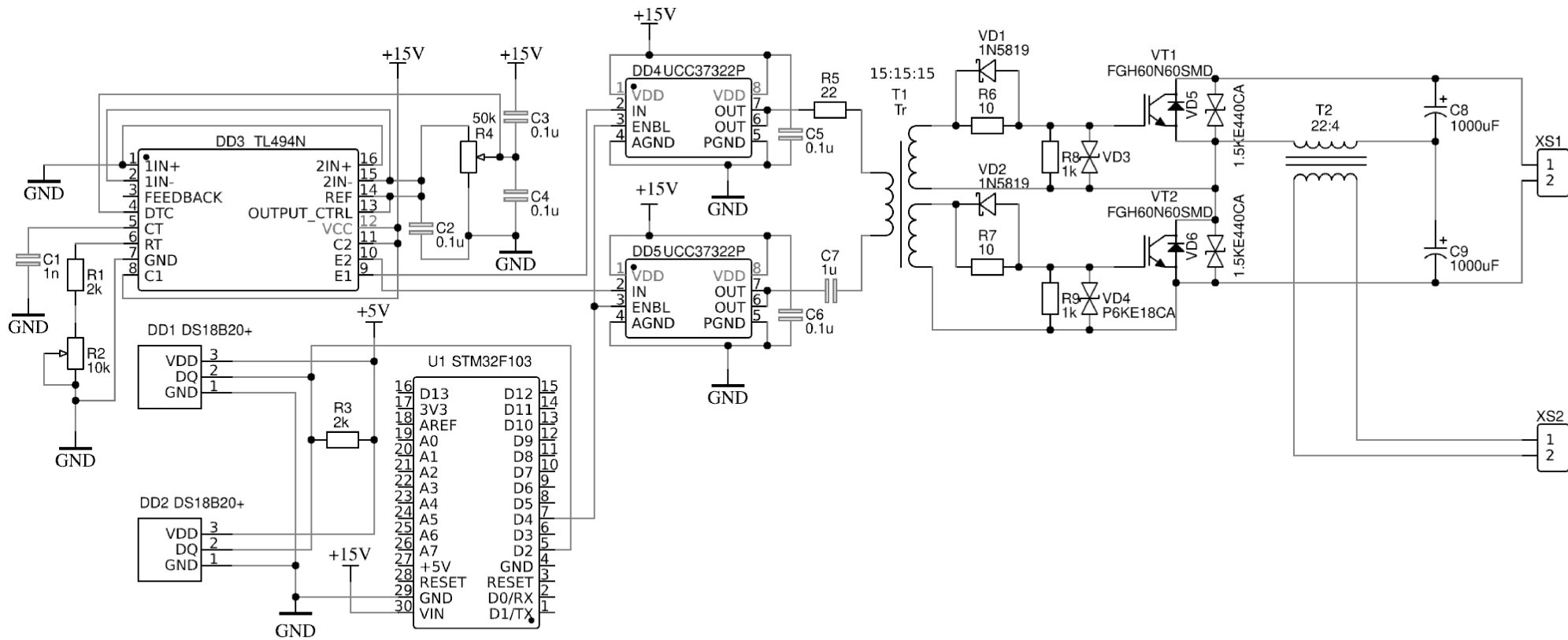
7.2 Додаткові коригування мають бути спрямовані на підвищення технічної обґрунтованості проєктних рішень, уточнення характеристик пристрою, покращення конструктивного виконання та забезпечення відповідності виробу вимогам чинних нормативних документів.

7.3 Під час оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи необхідно дотримуватися вимог академічної доброчесності, чинних стандартів оформлення технічної документації та методичних рекомендацій кафедри.

Виконавець: \_\_\_\_\_ Пашковський Ю.В.

Керівник кваліфікаційної роботи: \_\_\_\_\_ Паляниця Ю.Б.





Перший записаний №

Підп. і дата

Інв. № дроб.

Зарх. інв. №

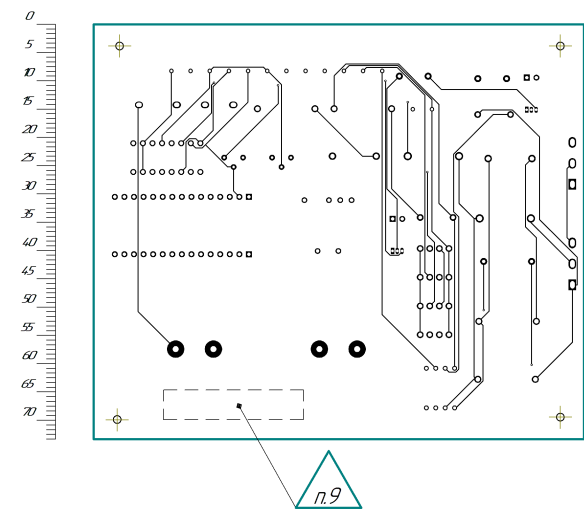
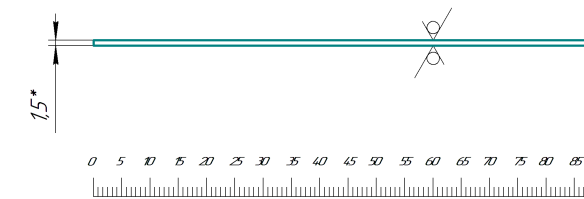
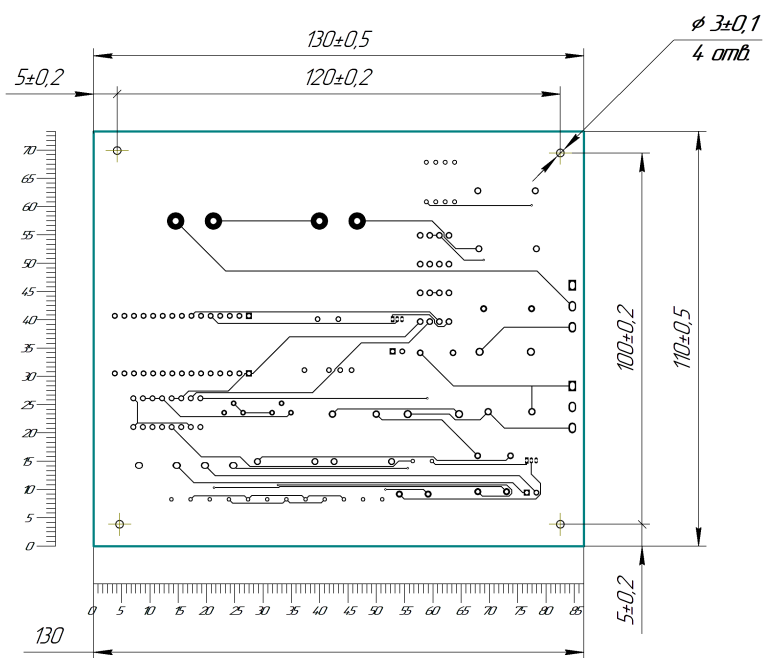
Підп. і дата

Інв. № др.

				<b>ЛЮВ 2.899.001 ЕЗ</b>		
Зміст	№ докум.	Підпис	Дата	Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом		
Розроб.	Пашицький Ю.В.					
Перевір.	Паляниця Ю.Б.			Лист	Вага	Масштаб
Реценз.				Арх.	Архивів	1
Н.контр.	Хвистівська Л.В.			ТНТУ, гр. РАС-41		
Затверд.	Дунець В.Л.			м. Тернопіль		
				Копія		
				Формат А2		







Таблиця отворів

Умовне позначення	Діаметр отворів	Розмір контактної площадки	Наявність металізації	Кількість отворів
	0,8	$\phi 1,65$	є	37
	1	$\square 2,1$	є	26

Таблиця розмірів провідного малюнку

Умовне позначення												
Розмір контактної площадки, мм.	1.05*0.63	1.5*1.3	1.6*1.4	1.7*1.5	1.8*0.5	3*2.6	3.2*1.5	3.4*1.9	4*1.2	4.1*2.35	4.15*1.9	5.5*2
Кількість, шт.	3	20	48	4	44	12	2	2	21	2	10	21

- 1\*. Розміри для довідок
2. Плата повинна відповідати ДСТУ 23751, клас точності 4
3. Група жорсткості 2 за ДСТУ 23752
4. Крок координатної сітки 0,625 мм
5. Плату виготовляти комбінованим позитивним способом.
6. Розміри отворів дивитись в таблиці.
7. Мінімальна відстань між елементами провідного рисунку 0,3 мм.
8. Покриття контактних площадок Гар. ПОС-40 ДСТУ 21930-76
9. Децимальний номер клеїмити друкованими провідниками, шрифт 2,54 ДСТУ 26020-80
10. Інші вимоги по ОСТ4.ГО.005.051

					<b>ЛЮВ 2.899.001</b>					
Зм.	Арж.	№ докум.	Підп.	Дата.	Лабораторний блок живлення з USB інтерфейсом			Лист	Маса	Наставів
Розроб.	Перев.	Т.контр.						Лист	Листів	1
					Плата друкована					
					СФ15-35Г-15			ТНТУ, гр. РАС-41		
					ГОСТ 103016-78			м.Тернопіль		
					Хмельницька ЛВ.			Формат А2		
					Дінець ВЛ.			Копія/авт		

Перше застос.  
Лабілака №  
Ліст. і дата  
№, № докл.  
Зам. №, №  
Ліст. і дата  
№, № ориєнт.



Формат.	Зона.	Поз.	Найменування	Найменування	Кіл.	Примітка
				<b><u>Документація</u></b>		
A2			ПЮВ 2.899.001 ЕЗ	Схема електрична принципова		
A1			ПЮВ 2.899.001 ЕЗ	Складальне креслення		
				<b><u>Деталі</u></b>		
A2		1	ПЮВ 2.899.001 ЕЗ	Плата друкована	1	
				<b><u>Інші вироби</u></b>		
				Конденсатори		
		2		1 нФ ±10% 50В, RAD-0.2, Yageo	1	C1
		3		0.1 мкФ ±10% 50В, RAD-0.2, Yageo	5	C2-C5
		4		1 мкФ ±10% 50В, RAD-0.2, Nichicon	1	C7
		5		1000 мкФ ±20% 50В, CAP_1000UF_35X60, Nichicon	2	C8, C9
				Резистори		
		6		2 кОм ±1% 0.25Вт, Yageo	2	R1, R2
		7		10 кОм ±10%, Bourns 3386P	1	R3
		8		50 кОм ±10%, Bourns 3386P	1	R4
		9		22 Ом ±1% 0.5Вт, Yageo	1	R5
		10		10 Ом ±5% 0.5Вт, Yageo	2	R6, R7
		11		1 кОм ±1% 0.5Вт, Yageo	2	R8, R9

<b>ПЮВ 2.899.001</b>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Пашковський Ю.В.		
Перевір.		Паляниця Ю.Б.		
Реценз.		Дозорська О.Ф.		
Н. Контр.		Хвостівська Л.В.		
Затверд.		Дунець В.Л.		
<b>Вузол друкований</b>			Літ.	Арк.
				1
			Літ.	Арк.
				2
ТНТУ, ФПТ каф. РТ, гр. РАС-41				



