

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

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

на тему: «Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн»

Виконав:

студент IV курсу, групи РЕ-22

Кулик Даниїл Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові

Керівник:

Доц. к.т.н. Перегудов Сергій Миколайович

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент:

Асис. каф. РТС Маленчик Тарас Володимирович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що в цьому дипломному
проєкті немає запозичень із праць
інших авторів без відповідних поси-
лань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PE22.565111.001.ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PE22.565111.001 ПЗ	Пояснювальна записка	59	
3	A4	PE22.565111.001	Специфікація на пристрій	1	
4	A3	PE22.565111.001 Е1	Схема структурна	1	
5	A3	PE22.565111.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
6	A4	PE22.565111.001ПЕ	Перелік елементів	2	
7	A3	PE22.565111.001 СК	Складальний кресленик пристрою	1	
8	A3	PE22.565111.001 СК	Складальний кресленик друкованої плати	1	
9	A4	PE22.565111.002	Специфікація на друкований вузол	2	

				PE22.565111.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн	Лист	Листів
Розробн.	Кулик Д.С.				1	1
Керівн.	Перегудов С.М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ, Гр. РЕ-22	
Н/контр.						
Зав.каф.	Мовчанюк А.В.					

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Кулику Даниїлу Сергійовичу

1. Тема проєкту «Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн»

2. Керівник проєкту Перегудов Сергій Миколайович, доцент, к.т.н.,
затверджені наказом по університету від « 29 » травня 2026 р. №1989-с

Строк подання студентом проєкту 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: напруга живлення — $+12\text{ В} \pm 1\text{ В}$, середній струм не більше 1 А.

4. Зміст пояснювальної записки: 1) Огляд існуючих рішень; 2) Розробка схеми електричної принципової; 3) Проектування друкованого вузла 4) Конструювання корпусу та пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Складальний кресленик плати, складальний кресленик пристрою, презентація 10 сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

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

Студент

Даниїл КУЛИК

Керівник

Сергій ПЕРЕГУДОВ

АНОТАЦІЯ

В дипломному проекті розглянуто спеціалізований пристрій – розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн. Основне призначення пристрою – автоматизований розподіл, прецизійне ШІМ-регулювання та контроль електричного струму одночасно для двох незалежних гальванічних ліній.

У рамках проекту було проведено аналіз техніко-економічних характеристик відомих промислових аналогів на ринку, результати якого представлені у вигляді порівняльної таблиці, визначені їхні основні переваги та недоліки. На основі проведеного аналізу обрано структурну схему та елементну базу, розроблено схему електричну принципову, двосторонню друковану плату та конструкцію корпусу для одного з модулів пристрою.

Результатом виконаної роботи є комплект конструкторської документації, необхідний для виготовлення пристрою автоматизованого керування струмом на гальванічних дільницях.

Дипломний проект складається з пояснювальної записки обсягом 59 сторінок, включає 29 рисунків, 4 таблиць, 4 креслення, 24 посилань, 4 додатки.

Ключові слова: гальванічна ванна, розподільник струму, мікроконтролер, ШІМ-керування, гальванічна ізоляція, друкована плата, автоматизація електролізу.

ANNOTATION

The diploma project presents the design of a specialized current distributor-regulator for galvanic baths. The main purpose of the device is the automated distribution, precision PWM regulation, and monitoring of electrical current for two independent galvanic lines simultaneously.

A market analysis of existing industrial analogues was conducted, and a comparative table was created outlining their technical and economic characteristics, advantages, and disadvantages. Based on the determined key parameters, the structural scheme and hardware base were chosen, and the electrical schematic, two-layer printed circuit board, and housing construction for one of the devices modules were developed.

The outcome of this work is the engineering documentation required for the manufacturing of the developed device for automated current control in galvanic lines.

The diploma project consists of a 59-page explanatory report, including 29 figures, 4 tables, 4 drawings, 24 references, and 4 appendices.

Keywords: galvanic bath, current distributor, microcontroller, PWM control, galvanic isolation, printed circuit board, electrolysis automation.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Розподільник-регулятор струму для
гальванічних ванн»**

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	10
Вступ.....	11
1 Аналіз технічного завдання.....	12
2 Огляд існуючих рішень.....	13
2.1 Розвиток та види регульованих джерел для гальваніки.....	13
2.2 Аналіз ринку стабілізаторів струму.....	15
2.2.1 Стабілізатор Flexkraft від компанії KraftPowercon.....	15
2.2.2 Блоки живлення BVR TBR від BVR Electronics.....	16
2.2.3 Випрямляч SanRex серії DCAUTO HK-G від SanRex Corporation.....	17
2.2.4 Джерело живлення Munk PSP від Munk GmbH.....	18
2.3 Порівняння аналогів між собою.....	20
3 Обґрунтування схемотехнічного рішення.....	22
3.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою.....	22
3.2 Типові схеми DC-DC перетворювачів.....	25
3.3 Обґрунтування схеми електричної принципової.....	37
4 Вибір елементної бази.....	39

					РЕ22.565111.001 ПЗ			
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн	Літ.	Лист	Листів
Розробив		Кулик Д.С.					1	
Перевірів		Перегудов С.М.						
Н. Контр.								
Затверди		Перегудов С.М.				РЕ22, РТФ		

5	Проектування друкованої плати.....	47
5.1	Розрахунок друкованих провідників.....	47
5.1.1	Розрахунок ширини друкованих провідників.....	47
5.1.2	Розрахунок зазорів між елементами.....	49
5.1.3	Розрахунок відстані у вузькому місці для прокладання провідника між двома контактними майданчиками.....	49
5.2	Вибір конструкційних матеріалів та технологія виготовлення.....	50
6	Конструкція приладу та аналіз його працездатності.....	54
6.1	Опис конструкції.....	54
6.2	Розрахунок часу безвідмовної роботи.....	56
6.3	Розрахунок собівартості.....	58
	Висновки.....	61
	Перелік джерел посилання.....	62
	Додатки.....	65

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДП — Друкована плата

ТЗ — Технічне завдання

ШІМ — Широтно-імпульсна модуляція

МК — Мікроконтролер

SPI — Serial Peripheral Device

I2C — Inter-Integrated Circuit

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						10
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Існує велика кількість різних джерел живлення з різними можливостями і призначеннями. І часто буває що оновлене обладнання потребує рівноцінного оновлення джерела, яке відповідатиме новим запитам.

Саме в такій ситуації опинилося виробництво в якому я проходив практику. В цьому виробництві була одна гальванічна ванна, яка використовувалась для покриття всіх деталей. Пізніше було вирішено що дві менші ванни будуть більш вигідні ніж одна велика. Але така зміна потребувала більш сучасного технологічного рішення: джерело мало керувати двома ваннами водночас, і робити це якісно і ефективно.

З таких міркувань і був створений розподільник-регулятор струму про який ітиме мова далі. Ідея доволі проста: пристрій регулює струм за допомогою зворотнього зв'язку таким чином, щоб він підлаштовувався під значення задане користувачем. При цьому задати струм можна для двох ванн окремо.

Метою дипломного проекту є вдосконалення існуючого розподільника-регулятора струму для гальванічних ванн, яке полягає в заміні елементної бази на більш сучасну і розробці на її основі конструкції пристрою, зокрема плати керування. Це дозволить використовувати даний пристрій для забезпечення роботи гальванічних ванн з врахуванням сучасних вимог до них.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						11
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Метою дипломного проекту є модернізація елементної бази та дизайн друкованої плати однієї з головних частин пристрою. Він призначений для розподілу струму на два виходи з одного джерела та автоматичне регулювання ним для утримування його на постійному рівні. Це вторинне джерело струму яке використовується для живлення двох гальванічних ванн.

Пристрій живитиметься від випрямляча з напругою на виході 12 В. Пристрій повинен відповідати вимогам ТЗ, у корпусі мають бути передбачені отвори для конекторів та світлодіодів. Для виготовлення корпусу бажано використовувати технологію тривимірного друку з АБС пластику. Відповідно до ГОСТ 30773-2001 [1], процес утилізації пристрою має бути здійснено виробником. При утилізації всі компоненти пристрою повинні бути розділені на ті, які можуть бути перероблені далі, і на ті, які повністю знищуються.

Оскільки розроблюваний пристрій призначений для використання безпосередньо в умовах гальванічного виробництва, його експлуатація відбуватиметься в промисловому приміщенні з підвищеною вологістю та постійною наявністю хімічно агресивних випарів (кислот та лугів).

Для забезпечення надійної роботи в таких умовах, пристрій повинен відповідати кліматичному виконанню УХЛ 4 за ГОСТ 15150-69 [2] з обов'язковим урахуванням типу атмосфери IV (промислова хімічно активна), або УХЛ 5 (у разі монтажу в зонах ймовірної конденсації вологи). Робоча температура експлуатації перебуватиме в межах від +10 до +40 °С, а гранична — від +1 до +45 °С. Робоче значення відносної вологості повітря може постійно сягати 80–90% (при температурі +25 °С). Робоче значення атмосферного тиску становитиме від 84 до 106,7 кПа. З огляду на це, корпус пристрою повинен бути герметичним і забезпечувати ступінь захисту оболонки не нижче IP65 згідно з ДСТУ EN 60529:2018 [3].

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

2.1 Розвиток та види регульованих джерел для гальваніки

Процес гальванізації потребує постійного струму. Саме при протіканні постійного струму через розчин електроліту відбувається процес осадження покриття на певну поверхню. Найпростіше цього процесу можна було досягти з використанням випрямленого пульсуючого струму. Так склалось що раніше отримати такий вид струму було досить просто.

По принципу роботи це були звичайні випрямлячі, як правило на базі тиристорів, оскільки діоди потребували при великих струмах встановлення значно більших радіаторів для відводу черезмірної кількості тепла, яку ті створювали у порівнянні. Також в залежності від живлення випрямлячі могли бути однофазними або трьохфазними.

Хоча для тиристорних схем потрібні менші радіатори, їхній мінус в тому що вони потребують спеціальну схему керування, що робить цей спосіб більш складнішим у реалізації. В кінці кінців на виході обох видів таких схем виходить пульсуюча напруга, що хоч і не ідеально але достатньо.

Інший спосіб регуляції струму може бути виконаний з включенням у коло резистора із змінним опором після випрямляча. Відповідно до налаштованого раніше опору, на виході буде різний струм, який можна регулювати поки не буде досягнуто того значення яке потрібно. Враховуючи що раніше робити схеми керування тиристорами було досить важко, цей спосіб був доволі актуальний, а в деяких підприємствах він використовується і по цей час.

Проте за цю простоту є своя ціна: резистор буде виділяти велику кількість тепла, більша частина енергії не буде використана на корисну роботу. Також такий резистор має бути достатньо потужним і розрахованим на певний струм, при цьому його властивості мають зберігатися навіть при агресивних умовах середовища під час хімічних процесів гальванізації.

Також замість того щоб використовувати один потужний змінний резистор, в деяких пристроях були використані реле, яке підключає випрямляч до одного з багатьох резисторів, в залежності від того який струм потрібний.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						13
Зм.	Лис	№ доквм.	Підпис	Дата		

Тобто є кілька резисторів з різними номіналами, і оператор переключається між ними. В залежності від того наскільки дороге використане реле, такі пристрої були більш надійніші ніж ті що використовували один резистор, але і у таких схем були свої проблеми. Рано чи пізно контакти реле деградували і втрачали можливість замикатись, потребуючи заміни.

Але найбільша проблема всіх вищеназваних рішень впливає з того, що ці джерела не можуть автоматично стабілізувати струм. При процесі гальванізації розчин електроліту буде випаровуватись з часом, що призводить до змін в опорі, а отже і в струмі. Через це оператор має слідкувати за цими змінами та постійно регулювати необхідні елементи, щоб процес продовжувався як потрібно.

На сьогоднішній день з розвитком перетворювальної техніки джерел живлення можна використати вже готові стаціонарні джерела живлення в залежності від потреб виробництва. Можливість придбання вже готового рішення може бути більш привабливим рішенням аніж розробка нового пристрою. В залежності від обраного продукту можливо навіть знайти пристрої з вбудованим автоматичним регулюванням струму. Також в деяких пристроях є додаткові функції у вигляді керування з комп'ютера, лічильника ампер-годин, захист від агресивного середовища та короткого замикання і так далі.

Отже плюси це їх простота у використанні та експлуатації, широкий вибір на ринку, а також те що для їх роботи потрібна лише одна фаза. Через це на таких пристроях зупиняється вибір багатьох підприємств. Проте в такого рішення є і свої мінуси. Один з найважливіших — це ціна. Самі дешеві варіанти такого джерела з Китаю продаються за приблизно 8000-16000 грн, враховуючи те що мова іде про пристрої, які не розраховані на гальваніку і не мають відповідного захисту який гарантує довговічність. Європейські та вітчизняні аналоги, які мають відповідний захист, а також ті корисні функції про які було згадано раніше, будуть коштувати 24000-40000 грн. В залежності від того наскільки велика ванна і її потужність ця ціна може бути в кілька разів більше.

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						14
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Також проблема таких джерел в тому, що частіше за все вони можуть забезпечити живлення лише однієї ванни. Саме тому і виникла потреба в розробці розподільника-стабілізатора струму, про який далі ітиме мова. Його функція полягає в автоматичній стабілізації струму для двох ванн водночас, при цьому сам стабілізатор буде живитися від лише одного джерела, а вихід струму буде налаштовуватись для кожної ванни окремо. І що саме головне, цей пристрій не потребуватиме постійного нагляду від оператора, достатньо лише виставити потрібний струм і підтримувати потрібну кількість електроліту у ванні. А струм буде підтримуватись постійним навіть при зміні рівня рідини за допомогою зворотного зв'язку.

2.2 Аналіз ринку стабілізаторів струму

Спочатку потрібно переконатись чи не має аналогів які уже виконали потрібну задачу, ну і також це потрібно для того щоб мати розуміння про те які можливі характеристики та потреби ми можемо мати як потенційний користувач.

В лиці аналогів до пристрою дипломного проекту було підібрано кілька продуктів з ціллю аналізу ринку.

2.2.1 Стабілізатор Flexkraft від компанії KraftPowercon

Являє собою передовий модульний пристрій для стабілізації як струму, так і напруги. Це спеціалізоване обладнання, потужність, кількість каналів та габарити якого залежать від конфігурації та кількості використаних модулів. Тобто пристрій може збиратися згідно потреб виробництва, і при поломці одного з модулів він може бути швидко замінений, не простоюючи при цьому виробництво. Також є включена опція Dual режим, що дозволяє керувати незалежно двома виходами в одному корпусі. Пристрій можна встановлювати безпосередньо біля ванни, так як конструкція вентиляції не дає агресивним парам потрапити до відділу з компонентами. Зовнішній вигляд пристрою показаний на рисунку 1.

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						15
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Технічні характеристики пристрою [4]:

- напруга живлення 380-480 В, трьохфазна, 50/60 Гц;
- коефіцієнт потужності $\geq 0,93$ при номінальному навантаженні;
- ККД 90%;
- максимальна температура без зниження характеристик 40°C;
- максимальна температура із зниженням характеристик 50°C;
- точність керування струмом та напругою $\pm 1\%$;
- пульсація постійного струму $\approx 1\%$;
- присутній захист від надмірного струму, підвищеної напруги, перегріву, короткого замикання, обриву ланцюга та несправностей модуля;
- ціновий діапазон в залежності від потрібної потужності та кількості модулів приблизно 110000 — 145000 грн.



Рисунок 1 — Модульний випрямляч Flexkraft

2.2.2 Блоки живлення BVR TBR від BVR Electronics

Цією компанією виготовляються блоки живлення як для лабораторних, так і виробничих умов. Є широкий вибір потрібного діапазону вихідного струму. Доволі високий ККД, не вищий ніж у Flexkraft, проте це пояснюється меншою ціною та габаритами. Нажаль немає функції розділених незалежних керованих виходів в одному корпусі, тому для двох ванн потрібно купляти два пристрої окремо. Є можливість збільшувати деякі вихідні характеристики

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						16
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

на 33%. Зовнішній вигляд пристрою показаний на рисунку 2. Технічні характеристики для моделі BVR TBR 30V 30A [5]:

- напруга живлення 200-260 В, 50 Гц;
- максимальна споживана потужність при напрузі 230 В — 1150 Вт;
- ККД не менше 85%;
- вихідна регульована напруга від 0.5 до 30 В;
- вихідний регульований струм від 0.3 до 30 А;
- дискретність установки та відображення напруги 0.05 В;
- дискретність установки та відображення струму 0.05 А;
- діапазон робочих температур від +5°C до +40°C;
- автоматичний захист від стрибків вхідної напруги, перевантажень, перегріву, коротких замикань;
- габаритні розміри 225x115x235 мм;
- маса 2.7 кг;
- діапазон ціни 24288-39600 грн.



Рисунок 2 — Джерело живлення BVR TBR 30V 30A

2.2.3 Випрямляч SanRex серії DCAUTO НК-G від SanRex Corporation

Цією компанією виготовляються високотехнологічні джерела живлення інверторного типу, призначені переважно для жорстких умов експлуатації на автоматизованих гальванічних лініях. Прилади вирізняються високою якістю збірки та енергоефективністю, хоча ККД дещо поступається європейським аналогам преміум-класу, що компенсується меншою початковою ціною за

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		17

один силовий блок. Базова модель не має функції розділених незалежних керованих виходів в одному корпусі, для багатоканального регулювання на дві ванни доведеться купляти окремі блоки або доукомплектовувати систему дорогою зовнішньою панеллю керування. Є можливість паралельного об'єднання модулів для збільшення вихідного струму на потрібну величину (до 20-30% запасу потужності стійки). Зовнішній вигляд пристрою показаний на рисунку 3. Технічні характеристики [6]:

- напруга живлення: 200–240 В або 380-480 В, 50/60 Гц ;
- точність керованого струму або напруги: $\pm 1\%$;
- діапазон робочих температур: від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$;
- автоматичний захист від короткого замикання, перенапруги, перегріву та обриву фази;
- габаритні розміри: 250x140x260 мм;
- маса: 3.1 кг;
- діапазон ціни: 46000–58000 грн (залежно від обраного інтерфейсу зв'язку).



Рисунок 3 — DCAUTO HK-G від SanRex Corporation

2.2.4 Джерело живлення Munk PSP від Munk GmbH

Цією компанією виготовляються безкомпромісні промислові випрямлячі для прецизійного нанесення гальванічних покриттів. Вони мають надзвичайно низький коефіцієнт пульсацій вихідного струму (менше 1%), що

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		18

забезпечує ідеальну якість електролізу. ККД цього пристрою є одним із найвищих у класі і практично рівний показникам FlexKraft. Проте високі характеристики зумовлюють значну ціну та великі габарити виробу. У пристрої відсутня вбудована функція розділених незалежних керованих виходів в базовому виконанні, через що для незалежної роботи з двома гальванічними ваннами потрібно розгортати окремі силові блоки під кожну лінію. Є можливість короткочасного форсування вихідного струму на 25% за рахунок ефективної системи охолодження. Зовнішній вигляд пристрою показаний на рисунку 4. Технічні характеристики Munk PSP [7]:

- напруга живлення: 3 x 380 В-480 В, 50-60 Гц;
- вихідна потужність на один модуль: 36 кВт;
- вихідний струм на один модуль: 2000 А;
- ККД : $\leq 94\%$;
- пульсація постійного струму: $< 3\%$;
- робоча температура: 40°C ;
- автоматичний захист від короткого замикання, інтелектуальний тепловий захист, захист від тривалого перевантаження;
- габаритні розміри модуля керування: 505x620x155 мм;
- габаритні розміри силового модуля: 505x620x310 мм;
- маса модуля керування: 15 кг;
- маса силового модуля: 60 кг;
- діапазон ціни: 78000–95000 грн.

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						19
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 4 — Munk PSP від Munk GmbH

2.3 Порівняння аналогів між собою

Тепер у нас є достатньо прикладів сучасного обладнання для живлення гальванічних ванн щоб зробити оцінку потреб до характеристик та вирішити яку проблему чи функцію буде задовільняти наш прилад у порівнянні. Головні особливості кожного згаданого продукту порівняні між собою в таб. 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння між джерелами стабілізованого струму

Параметр порівняння	BVR TBR 30V 30A	SanRex DCAUTO HK-G	Munk PSP	FlexKraft
Кількість виходів	1	1	1	2
Напруга живлення, В	200-240, 380-480	200-240, 380-480	3 x 380-480	380-480
ККД, %	≥85	90	≤94	90
Середній термін експлуатації, років	10	10	15	15
Діапазон ціни, грн	24288-39600	46000-58000	78000-95000	110000-145000

З огляду на це порівняння між високоякісними продуктами на ринку джерел живлення для гальваніки були зроблені певні висновки. А саме: в багатьох випадках щоб керувати струмом двох або більше ванн потрібно придбати кілька модулів. Термін експлуатації у таких пристроїв загалом складає 10-15 років. Вони повинні мати високий ККД, від 85 до 95 відсотків. А ще через високу якість компонентів та виготовлення ці пристрої мають велику ціну. Таким чином у нас є приклад проблем які ми маємо вирішити та мінімальні характеристики яких ми маємо притримуватися. Якщо точніше, то мета цього дипломного проекту зробити частину пристрою, собівартість якого буде меншою ніж у аналогів, і при цьому він зможе керувати двома виходами незалежно та матиме ККД як мінімум 80%.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						21
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМОТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ

3.1 Обґрунтування структурної схеми пристрою

Є багато різноманітних схем вторинного джерела живлення, що відрізняються один від одного своєю складністю, потужністю на яку розраховані, коефіцієнтом корисної дії, ціною розробки, ну і також елементною базою. Це означає, що ми маємо досить широкий вибір серед можливих схем стабілізаторів. Тож давайте поглянемо яке рішення підходить для наших цілей.

Для початку треба зазначити які необхідні характеристики впливають на вибір схеми. По перше, це параметри навантаження, тобто параметри гальванічного процесу. В нашому випадку стабілізатор буде використаний для живлення 2 гальванічних ванн. Кожна з цих ванн використовує постійний струм що встановлюється користувачем до 30 А включно, при напрузі що коливається в межах приблизно від 1 до 12 В. Це 360 Вт потужності на одну ванну, що в сумі дає значення 720 Вт при максимальних налаштуваннях струму на обох ваннах, якщо не більше.

Друга вимога до схеми це вимога до стабілізації. В процесі гальванізації рівень коливань струму має велике значення. Нижче наведена формула, яка впливає з першого закону Фарадея [8]:

$$m = k \cdot q = k \cdot I \cdot t, \quad (3.1)$$

де m — маса осадженого металу;

k — електрохімічний еквівалент речовини;

q — електричний заряд, що пройшов крізь електроліт;

I — сила струму;

t — час проведення процесу.

Згідно цієї формули, маса покриття є прямопропорційною струму. Це означає, що при збільшенні або зменшенні струму через зміну в опорі навантаження, товщина покриття також збільшиться або зменшиться відповідно.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						22
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Оскільки під час роботи гальванічної ванни електролітична суміш всередині буде витрачатися, опір буде постійно змінюватись, напряду впливаючи на струм що проходить крізь неї. При нерівномірному струмі товщина покриття буде також нерівномірною, що негативно вплине на рівень його якості, а отже і рівень продукції загалом. Щоб такого не допустити, в системах що відповідають за гальванізацію повинен бути достатньо високий рівень стабілізації.

З тих самих міркувань схема має підтримувати зворотній зв'язок. Для того щоб система правильно налаштовувалась на заданий струм, їй треба знати який струм проходить крізь ванну в даний момент часу. Це дозволить системі бути більш ефективною, при цьому не потребуючи постійного нагляду від користувача. Для того щоб це було можливо схемі необхідно мати датчики струму та певний мікроконтролер або мікросхему яка буде керувати своїм виходом залежно від отриманих даних.

Як ми зазначили раніше до пристрою буде підключено дві гальванічні ванни. Струм на яких повинен регулюватись незалежно. Це підвищує складність схеми, проте також збільшує ККД, що, власне, і є головною причиною розробки цього пристрою. Тож схема повинна бути розрахована на те що у неї буде два незалежні виходи, які будуть однаково стабільні.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						23
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

З огляду на ці потреби була складена наступна структурна схема (рис.5):

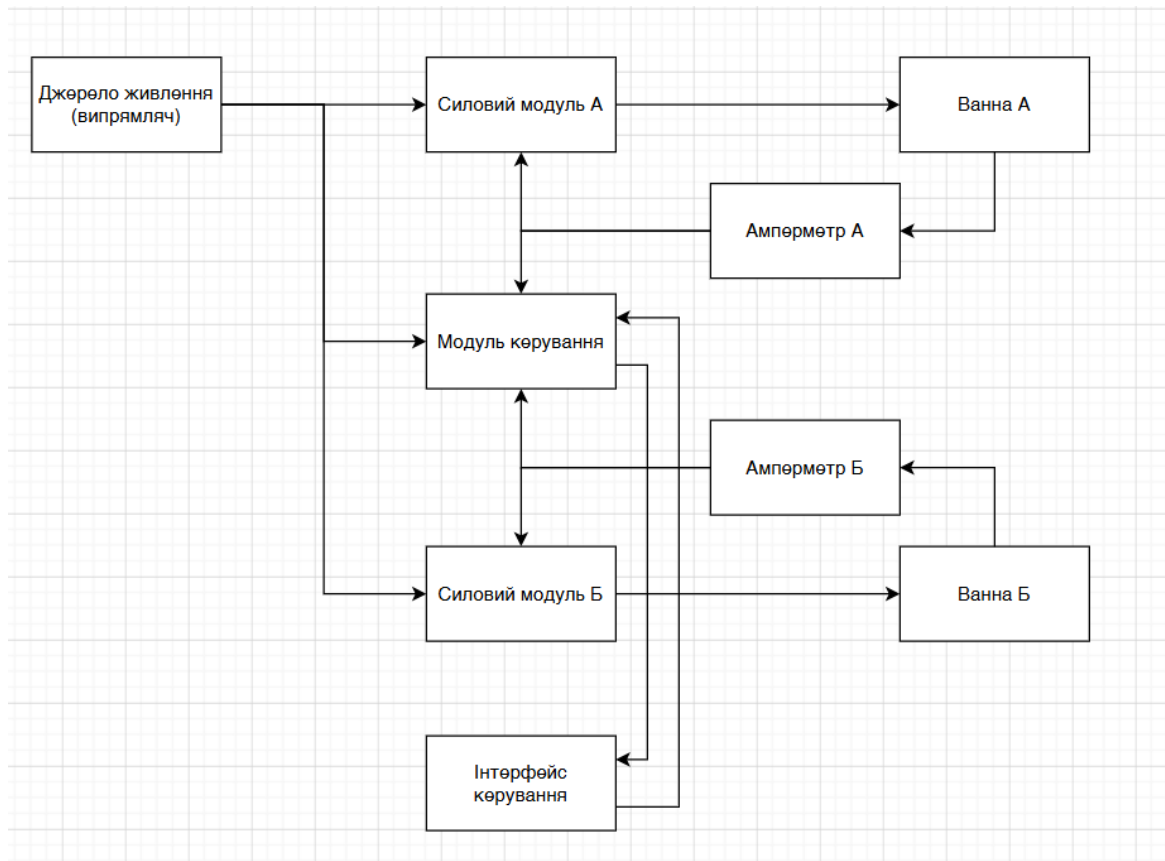


Рисунок 5 — Структурна схема регулятора струму

Якщо брати загалом, то принцип схеми є доволі простим в розумінні. Випрямляч слугує джерелом живлення, яке ми маємо конвертувати за допомогою DC-DC перетворювача. В цього перетворювача має бути два виходи для двох ванн. Ці канали, власне, і живлять гальванічні ванни, проте також між конвертором і ванною є датчик. Його робота полягає у наданні даних контроллеру, що формує зворотній зв'язок. Контроллер, з наперед заданими рівнями струму для ванн, які він отримав від користувача за допомогою панелі керування, буде використовувати ці дані щоб контролювати роботу перетворювача. Ця ж панель використовується для відображення певних даних отриманих від контроллера, наприклад для підсвічення світлодіода щоб показати що струм не в допуску.

Таким чином ми маємо загальний опис схеми яка необхідна для нашого завдання. Тепер коли ми знаємо які елементи присутні в нашій схемі, можна перейти до наступного кроку в її реалізації. А саме, час вирішити яку схему обрати для перетворювача, враховуючи все вищесказане.

3.2 Типові схеми DC-DC перетворювачів

Для того щоб зробити це рішення розглянемо які вони бувають і в чому їхня особливість [9]. Перша категорія за якою можна розділити DC-DC перетворювачі це лінійні або імпульсні. Будемо йти по порядку і почнемо з обговорення лінійних перетворювачів.

Лінійний перетворювач — це пристрій, призначення якого зменшувати напругу з входу до необхідного, стабільного рівня на виході. Для того щоб досягти цього ефекту використовується доволі простий принцип.

Спочатку, змінний струм має бути перетворений за допомогою трансформатора. Якщо на вході маємо постійний струм, потрібно перетворити його на змінний або імпульсний. Це дозволить трансформатору отримати струм на виході з іншою напругою, в залежності від кількості витків на обох котушках.

Далі цей змінний струм потрібно зробити постійним. Це робиться за допомогою діодного моста. Це схема з діодів яка дозволяє протікати струму лише в одному напрямку, таким чином перетворюючи змінний струм в пульсуючий струм, в якого всі амплітуди позитивні.

Наступним у схемі стоїть фільтр у вигляді одного або кількох конденсаторів, який заряджається поки напруга іде вгору, і навпаки, розряджається коли іде вниз. Це призводить до того, що напруга на графіку схожа на більш пряму лінію, з майже постійною напругою, але при цьому має невеликі нерівності, в більшості випадків незначні. В деяких схемах також використовують індуктор після конденсатора, для додаткової стабілізації.

Також в лінійних джерелах живлення часто використовується певний регулятор, який дає ще більше контролю над вихідним струмом. Це потрібно при умові що вхідна напруга або опір навантаження змінюються з часом. Зазвичай цей регулятор реалізований як коло зворотного зв'язку (feedback loop) з транзистором і операційним підсилювачем. Опір транзистора змінюється в залежності від вихідної напруги: якщо вихідна напруга падає, опір транзистора теж падає, і навпаки. А коло зворотного зв'язку власне і

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						25
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

контролює цей процес. Типова схема лінійного перетворювача показана на рисунку 6.

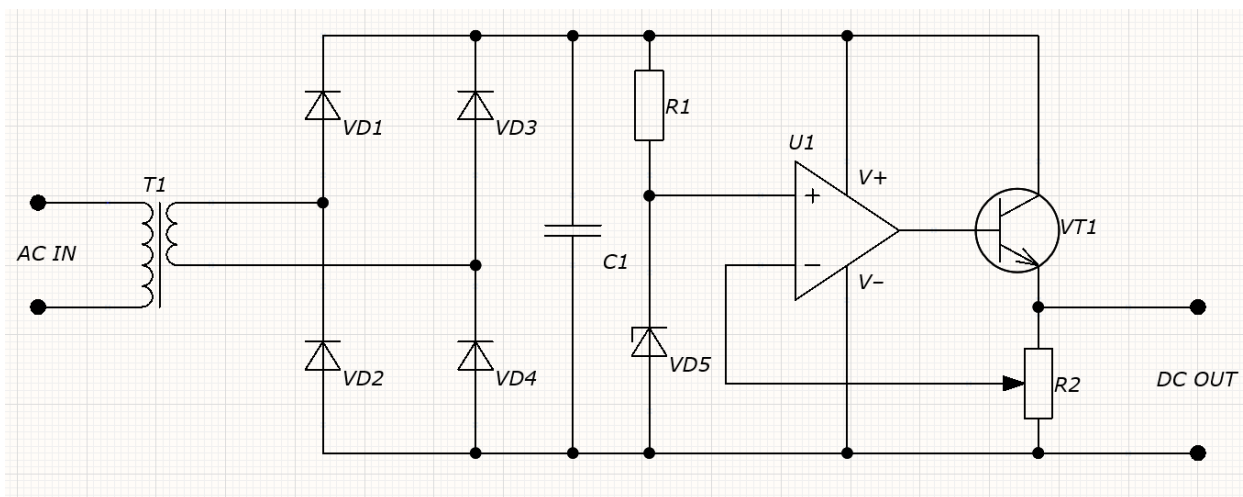


Рисунок 6 — Приклад принципової схеми лінійного AC-DC перетворювача

Тепер коли ми маємо уявлення про те як працює лінійний перетворювач, розберемо які його сильні та слабкі сторони.

До переваг схеми входять наступні особливості. По перше — простота і дешевизна схеми у порівнянні з імпульсним перетворювачем. Вона доволі примітивна і не потребує великої кількості елементів для реалізації.

По друге — висока швидкість перехідних процесів. Через специфіку своєї роботи лінійний перетворювач миттєво реагує на зміну опору навантаження. Це підвищує надійність та довговічність пристроїв з чутливими компонентами.

І наостанок — такі перетворювачі мають мінімальний рівень шумів та пульсацій, на відмінну від їх імпульсних аналогів, і також вони не створюють електромагнітних завад. Це також додає до їхньої простоти для імплементації, оскільки це забирає одну з потенційних проблем.

Але також цей пристрій має один критичний недолік, а саме — його малий ККД. В залежності від того наскільки велика різниця між вхідною і вихідною напругою, ефективність використання енергії буде все меншою і меншою.

Формула для розрахунку ККД виглядає наступним чином:

$$\eta = \frac{U_{out}}{U_{in}}, \quad (3.1)$$

де η — ККД;

U_{out} – вихідна напруга;

U_{in} – вхідна напруга.

Враховуючи що вхідна напруга може досягати 240 В, а вихідна від 1 до 12 В, тоді в кращому випадку лише 5 відсотків всієї енергії піде на виконання корисної роботи. Інші 95 підуть в тепло, що створює додаткову проблему у вигляді необхідності масивних радіаторів для його відводу, що робить прилад ще більш габаритним, особливо з його доволі великим трансформатором, розмір якого має бути більше при роботі на низьких частотах.

Лінійний перетворювач має свої використання. При малих напругах ці проблеми не такі вже і значущі, а враховуючи його порівняну дешевизну і простоту він може навіть переважати імпульсний. Але хочеться зазначити, що для гальванічного виробництва він точно не підходить. Хоча він може бути використаний як допоміжний елемент, а саме — для стабілізації живлення мікроконтролера, у вигляді інтегрованої мікросхеми. Таке рішення дозволяє значно спростити розробку плати.

Далі поговоримо про імпульсні перетворювачі. Їх принцип роботи складніший у порівнянні з лінійними, але також більш ефективний. Вони працюють з допомогою широтно імпульсної модуляції.

Один з основних недоліків лінійного перетворювача в тому, що при великих напругах потрібні більші трансформатори. Це пов'язано з тим що вони мають працювати на доволі низьких частотах. Але якби частота була більшою, то трансформатор можна було б зробити меншим.

Для цього ми беремо постійний струм на виході діодного моста і фільтра, і перетворюємо його на височастотний імпульсний струм силовим ключем, який вже потім проходить через трансформатор щоб зменшити його напругу. І цей сигнал далі стає потрібним нам низьковольтним постійним

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						27
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

струмом за допомогою ще одного випрямляча і фільтра. За допомогою зворотнього зв'язку контроллер може змінювати налаштування ключа, щоб отримати необхідний струм.

А саме, регуляція відбувається завдяки ШІМ (широтно-імпульсна модуляція). Головний принцип в тому, що такий сигнал представляє собою послідовність прямокутних імпульсів. Сигнал в певний момент часу може бути або на високому рівні, або на низькому. Тобто максимум потужності або її відсутність відповідно. Ці стани швидко перемикаються під контролем мікросхеми, і в залежності від відношення часу коли сигнал високий, середня напруга буде відповідати певному значенню.

Ключові параметри, які керують ШІМ — це частота та коефіцієнт заповнення. Частота показує кількість повних циклів зміни стану за одну секунду. Коефіцієнт заповнення — це відношення між часом коли сигнал ввімкнений та довжиною періоду, цей параметр вимірюється у відсотках.

Отже, за допомогою зворотнього зв'язку, у мікроконтролер приходить інформація про потрібний коефіцієнт заповнення, і таким чином величина напруги моментально оновлюється до потрібної величини.

Така система має ряд переваг над лінійним перетворювачем:

- набагато вищий ККД;
- значно менші габарити трансформатора;
- висока потужність;
- ефективне охолодження через низькі втрати;
- широкий діапазон вхідних напруг;
- може знижувати, підвищувати, та інвертувати напругу.

Недоліки імпульсних перетворювачів:

- створює високочастотні шуми та перешкоди;
- складніша конструкція;
- обмежена швидкість реакції;

З огляду на потреби пристрою, для його реалізації було вирішено обрати імпульсний перетворювач.

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Далі йде вибір певної схеми, адже є декілька різних їх типів, і вони відрізняються своїми властивостями та складністю в реалізації.

Спочатку їх всіх можна поділити на з або без гальванічної розв'язки.

Імпульсні перетворювачі постійного струму без гальванічної розв'язки:

- знижувальні (buck);
- підвищувальні (boost);
- знижувально-підвищувальні (buck-boost);
- інвертуючі;

Імпульсні перетворювачі постійного струму з гальванічною розв'язкою:

- зворотньоходовий (flyback);
- прямоходовий (forward);
- двотактний (push-pull);
- напівмостовий (half-bridge);
- мостовий (full-bridge).

Замість того щоб обирати між всіма можливими варіантами, було б доречно визначити який саме тип перетворювача нам потрібен. Тому зараз ми поговоримо про те що таке гальванічна розв'язка та які її переваги [10].

По суті це принцип розділення електричного кола на окремі ізольовані зони без прямого електричного зв'язку, де енергія передається за допомогою змінних полів, в нашому випадку магнітного. Гальванічна розв'язка є дуже корисною, і в деяких випадках необхідною, через ряд її функцій.

По перше — захист життя людини та безпека праці. Це є дуже важливим фактором на виробництві, особливо в гальванічному цеху, який є зоною підвищеної небезпеки. Підвищена вологість, випари електролітів, відкриті гальванічні ванни що пропускають через себе високий струм. Все це створює певні ризики, в тому числі можливі пробої окремих елементів. В техніці без розв'язки це може призвести до удару струмом оператора при спробі торкнутися до панелі керування. При напрузі живлення 220 В або 380 В це може привести до смерті. В той час як з гальванічною розв'язкою навіть при внутрішній поломці ізоляція не дасть струму зробити шкоду здоров'ю користувача пристрою.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						29
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Також додаткова ізоляція захищає елементи, які є занадто чутливими до високої напруги. Наприклад, головний мікроконтролер, який живиться від 5 В, а керуючі струми складають всього лиш кілька міліампер. Якщо підключити контроллер напряму до силової частини, він буде повністю відкритий до впливів зворотних струмів та сплесків напруги, спричинені регулюванням струму. Це приведе до того, що важливий елемент у схемі пристрою буде знищений. Гальванічна розв'язка унеможлиблює цей сценарій, захищаючи як користувача, так і довговічність елементів, а отже і самого пристрою в цілому.

І наостанок, гальванічна розв'язка грає важливу роль у боротьбі із завадами. В промисловій електроніці існує проблема паразитних контурів заземлення. Коли кілька пристроїв підключені до однієї шини заземлення, це спричинює виникнення зрівнювальних струмів. Їх потік створює колосальні високочастотні завади, які безпосередньо впливають на метрологічні покази пристрою, що є частиною такої схеми. В нашому випадку дуже важливо щоб дані які ми отримуємо з датчика струму були точні, оскільки від цього залежить коректна робота пристрою і гальванічних ванн. На щастя, гальванічна розв'язка дозволяє позбавитися від цієї проблеми, оскільки силова та цифрова земля контролера фізично розділені і шуми не можуть вплинути на його роботу.

З огляду на ці критичні переваги буде логічно вибрати схему перетворювача що має гальванічну розв'язку. Тепер поглянемо ще раз які варіанти у нас залишилися.

Тепер поговоримо про відмінності між схемами з гальванічною розв'язкою, починаючи з обговорення зворотньоходового перетворювача.

Зворотньоходовий, також відомий як flyback, є одним з найпопулярніших серед імпульсних перетворювачів через свою порівняну простоту. Працює за допомогою трансформатора, у якого обмотки підключені зустрічно, а в магнітопроводі є повітряний зазор, що змушує його функціонувати як накопичувальний дросель.

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						30
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Цикл роботи ЗП складається з двох етапів (рис.7).

1. Прямий хід (ключ замкнений)

Силовий транзистор VT1 відкритий, струм починає текти через первинну обмотку трансформатора T1. Осердя трансформатора при цьому починає накопичувати магнітну енергію. Через специфічну обмотку, напруга, яка виникає на вторинній обмотці, закриває вихідний діод VD1. При цьому енергія не передається у вихідне коло, а навантаження отримує власне живлення виключно через вихідний конденсатор C2.

2. Зворотний хід (ключ розімкнений)

Коли транзистор закривається, струм у первинній обмотці миттєво зупиняється. Це призводить до згортання магнітного поля в осерді, і наступної зміни полярності напруг на обох обмотках. Напруга на вторинній обмотці відкриває вихідний діод, що дозволяє випустити всю енергію, яку накопив магнітопровід під час першого етапу, при цьому живлячи навантаження та заряджаючи конденсатор C1 для наступного циклу.

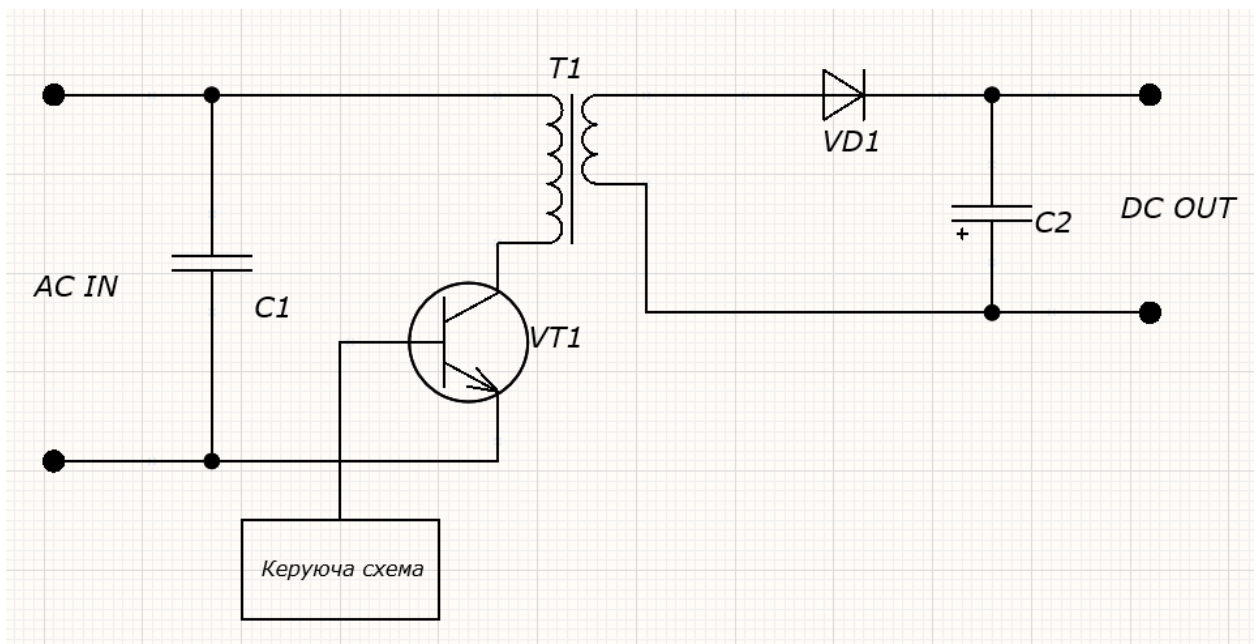


Рисунок 7 — Спрощена схема flyback DC-DC перетворювача

Перевага flyback перетворювача в його простоті та дешевизні. Це робить його популярним вибором для зарядних пристроїв для телефонів, планшетів та ноутбуків. Проте головний його недолік це його високий рівень пульсацій

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		31

та порівняно низька максимальна потужність, оскільки вона напряму залежить від трансформатора.

Наступний по списку, прямоходовий (forward) перетворювач. На відміну від flyback, його трансформаторні обмотки узгоджені. Також енергія не накоплюється, а передається далі вже на першому етапі, звідки і різниця в роботі та назві. Як і раніше, цикл розділений на два етапи (рис. 8).

1. Прямий хід (ключ замкнений)

Транзистор VT1 відкривається і струм починає текти через первинну обмотку. Через те що обмотка узгоджена, на вторинній обмотці відразу з'являється напруга, яка відкриває прямохідний діод VD1. Енергія передається безпосередньо у вихідне коло, при цьому струм також намагнічує вихідний дросель L1.

2. Зворотний хід (ключ розімкнений)

Транзистор закривається, разом з ним і перший діод. При цьому вихідний дросель продовжує рух струму, шляхом ЕРС самоіндукції, до навантаження через другий, зворотний діод VD2. При цьому через додаткову обмотку трансформатор скидує зайве намагнічення, яке він отримав під час першого етапу, щоб не увійти в перенасичення.

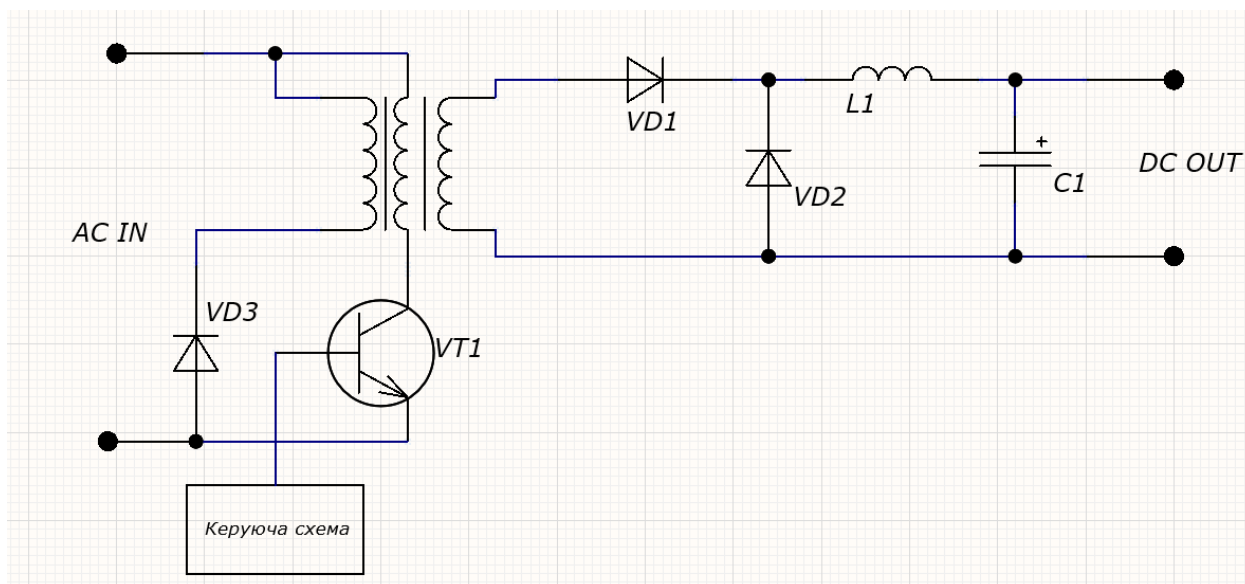


Рисунок 8 — Спрощена схема forward DC-DC перетворювача

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PE22.565111.001 ПЗ

Лис

32

Цей тип перетворювача буде значно потужнішим ніж flyback. Також на виході менше пульсацій і він має більший ККД. Мінус такого рішення в тому що для нього потрібен трансформатор з трьома виходами, який є складнішим у реалізації, а також для нього потрібен достатньо потужний дросель.

Наступна потенційна схема — двотактний перетворювач із нульовим виходом трансформатора, або ж «push-pull». Схема використовується для середніх та високих потужностей, наприклад в автомобільних інверторах, блоках живлення, та промислових регуляторах.

Особливість push-pull перетворювачів у тому як формується їх первинна обмотка трансформатора. По середині знаходиться вивід (який називають «нульвою точкою»), який підключається до плюса вхідного джерела живлення. В схему входять трансформатор з розділеною первинною обмоткою, а також двоє силових ключів, зазвичай у вигляді MOSFET або IGBT транзисторів, і вихідний випрямляч: діодний міст, повний або ні, і зладжувальний LC-фільтр після.

Принцип роботи в тому, що один з транзисторів почергово відкривається. Цей процес контролює двофазний ШІМ-контролер. Звідси перетворювач і отримав свою назву, оскільки ключі ніби рухають магнітний потік туди-сюди всередині осердя трансформатора. Один цикл розділений на три етапи (рис.9).

1. Верхнє плече (перший транзистор відкритий, другий — закритий)

Струм тече від плюса живлення в центр первинної обмотки, проходить через верхню її частину, і зупиняється на землі, через відкритий ключ VT1. Струм що пройшов створює магнітний потік в осерді трансформатора T1 в певному напрямку. На вторинній обмотці з'являється імпульс напруги, який живить навантаження після того як пройде через випрямляч та фільтр.

2. Пауза (dead time)

Обидва транзистори закриті. Струм не тече на жодній стороні первинної обмотки. Цей етап існує для того щоб ключі випадково не відкрилися

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						33
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

водночас, інакше це призведе до короткого замикання. В цей час струм на виході підтримується завдяки конденсатору C1 та дроселю L1.

3. Нижнє плече (перший транзистор закритий, другий — відкритий)

Цього разу відкритий інший ключ VT2. Це приводить до симетричного процесу, вже в іншу сторону. При цьому осердя перемагнічується, і магнітний потік має протилежний напрямок. Так само створюється імпульс напруги на вторинній обмотці і струм вирівнюється.

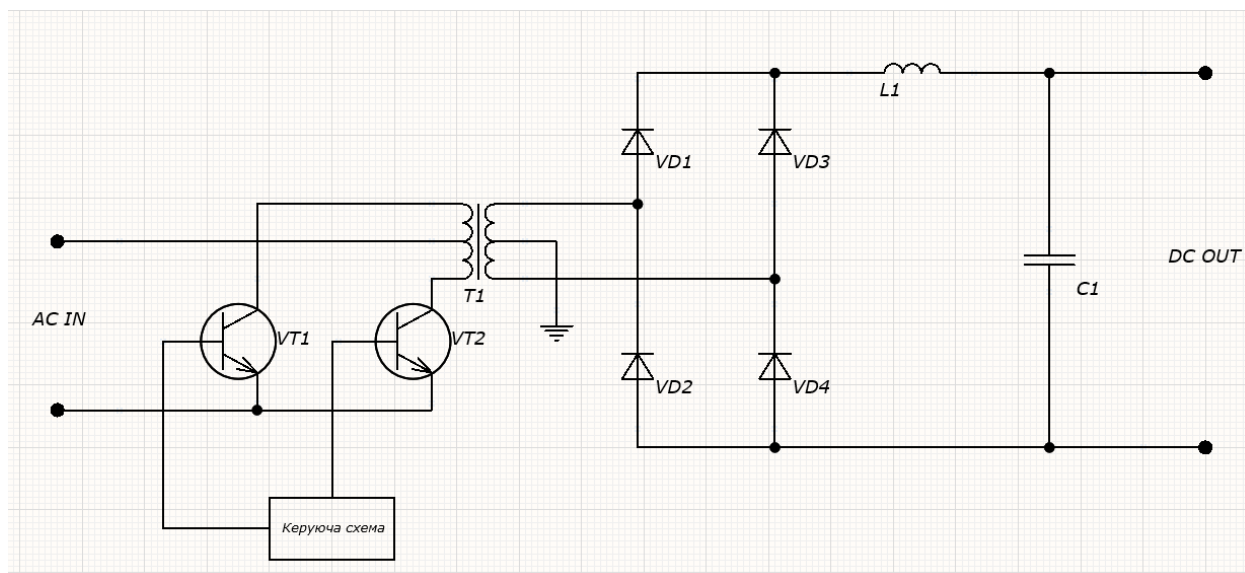


Рисунок 9 — Схематичне зображення роботи push-pull DC-DC перетворювача

Варто зазначити, що три етапи в одному циклі, включно з паузою, він розділяє з напівмостовим та мостовим перетворювачем, що робить їх перетворювачами двотактної групи.

Переваги такого рішення в простоті керування транзисторами, ефективності використання осердя, а також малому рівні пульсацій на виході. Недоліки в тому що трансформатор складно виготовити, оскільки дві половини первинної обмотки мають бути однаковими. Також коли другий транзистор відкритий, верхня частина обмотки подвоює напругу. Тому транзистори мають витримувати напругу вдвічі більшу за вхідну, що додає проблем для реалізації пристрою який живиться від 220 або 380 В. Через це такі

перетворювачі часто використовуються з низькою напругою живлення. Але в нашому випадку використання такого рішення не є доцільним.

Напівмостова схема (half-bridge) нагадує собою мостову, проте як зрозуміло з назви, має простішу структуру, створюючи компроміс між складністю і ціною та потужністю схеми. Замість чотирьох транзисторів вона має лише два, а відсутні замінені на конденсаторний дільник напруги.

Напівмостовий перетворювач, як було згадано раніше, працює в три етапи (рис. 10).

1. Перший ключ відкритий, другий — закритий. Струм тече від плюса живлення до першого транзистора, потім проходить через первинну обмотку, і потрапляє в точку між двома конденсаторами. Оскільки два однакових конденсатори працюють як дільник, напруга на виході трансформатора складає лише половину вхідної.

2. Обидва ключі перекриті, струм зупинений.

3. Другий ключ відкритий, перший закритий. Струм йде у зворотному напрямку з дільника через обмотку до землі, що підключена до відкритого другого ключа. Як і раніше, напруга на виході дорівнює половині вхідної, але цього разу з протилежним знаком.

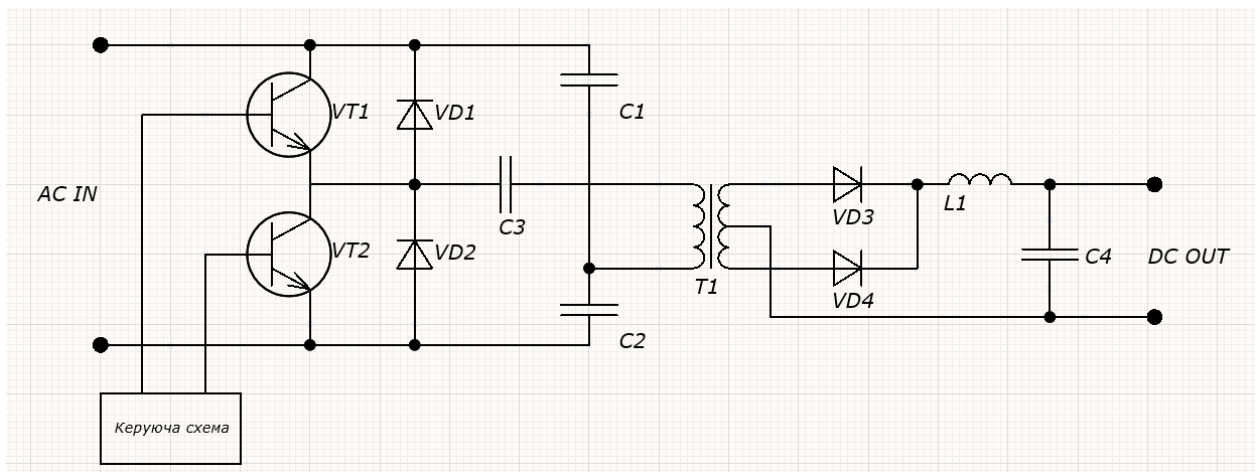


Рисунок 10 — Спрощена схема half-bridge DC-DC перетворювача

Цього разу схема достатньо потужна щоб забезпечити наші потреби до потужності. Також схема більш проста та дешева у порівнянні з мостовою. Але важливо зазначити, що так як вихідна напруга вдвічі менша, щоб

отримати таку саму потужність як і в мостового перетворювача, на вході має бути вдвічі більший струм.

І наостанок, мостовий (full-bridge) перетворювач — найпотужніше, але також найскладніше та найдорожче рішення з перелічених вище. В його складі знаходиться чотири транзистори, на відмінну від попередніх схем, що робить проектування більш клопітким і підвищує загальну ціну елементів.

Цикли роботи мостового перетворювача наступні (рис. 11).

1. Перша діагональ, VT1 і VT4 транзистори відкриті

Струм від джерела живлення тече через первинну обмотку T1 в певному напрямку. Осердя трансформатора намагнічується відповідно. На вторинній обмотці виникає напруга, яка проходить через діоди VD5–VD6 та LC фільтр, і живить навантаження.

2. Захисна пауза. Усі чотири транзистори закриті в цей проміжок часу.

3. Друга діагональ, VT2 і VT3 транзистори відкриті

Цього разу струм іде в протилежному напрямку, перемагнічуючи осердя. Так само, на вторинній обмотці виникає напруга, і струм випрямляється та згладжується.

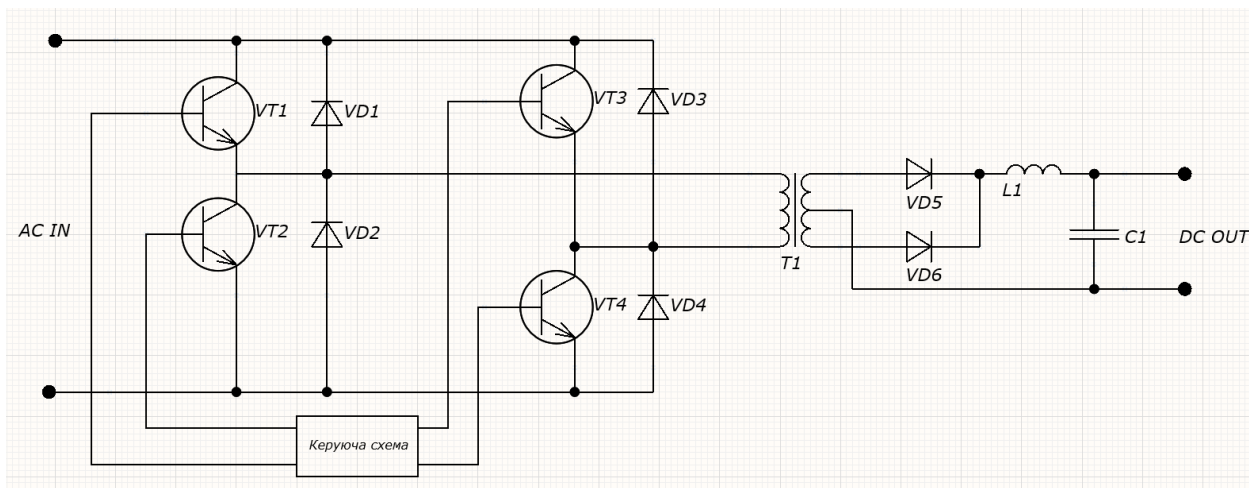


Рисунок 11 — Спрощена схема full-bridge DC-DC перетворювача

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PE22.565111.001 ПЗ

Лис

36

Згідно всього вищесказаного для пристрою була обрана схема напівмостового (half-bridge) перетворювача. Таке рішення обумовлене тим, що це найкраще рішення окрім мостової схеми, і при цьому він не потребує такої ж кількості знань та ресурсів. При цьому він повністю задовольняє потреби до потужності, кількості шумів, ККД і габаритності.

3.3 Обґрунтування схеми електричної принципової

Пристрій розділений на три основні плати, дві з яких це симетричні силові. Інша плата відповідає за керування самим пристроєм. В цьому дипломному проекті я працював саме над платою керування.

Головний елемент плати — це його головний мікроконтролер DD1. Він виконує основну роботу в регулюванні напруги за допомогою ШІМ. Струм регулюється в залежності від встановлених регуляторів на панелі керування, а також від прийнятих сигналів по каналах АЦП, які передають інформацію для мікроконтролера про справжній струм у гальванічних ваннах.

Між потенціометром для регуляції струму та мікроконтролером знаходиться RC фільтр для захисту останнього від шумів та статичної електрики.

Два світлодіоди H1 та H2 виконують функцію попередження оператора, коли струм знаходиться не в допуску. Це може свідчити про нестачу електrolіту, коротке замикання або якусь іншу поломку чи проблему.

Мікроконтролер отримує живлення з DA1, який перетворює 12 В на 5 В.

Для живлення операційних підсилювачів в силовій платі потрібна стабільна напруга живлення 12 В з потрібною полярністю. Цим займається стабілізатор DA2, який перетворює 12 В з входу в 12 Вак.

Щоб забезпечити стабільну тактову частоту для DD1 на портах XTAL1, XTAL2 встановлений контур у складі кварцового резонатора BQ1 та конденсаторів C3 і C4.

Живлення аналогової частини АЦП (вивід AVCC) відокремлене від цифрової шини за допомогою фільтруючого ланцюга у складі резистора R9 та блокувальних конденсаторів C7, C9, що дозволяє знизити вплив високочастотних комутаційних завад ядра на результат оцифрування.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						37
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Перемичка позначена як E1 відповідає за можливість з'єднання аналогової та цифрової землі. Вони ізольовані один від одного окрім цієї точки, для того щоб можна було проводити налаштування і тестувати вплив шумів.

Мікроконтролер підключається до панелі керування через роз'єм XS1 та до силових плат через XS2 та XS3. На вході реалізований додатковий захист у вигляді ємнісного фільтра.

Для ввімкнення та блокування каналів передбачені виходи ПУСК1 та ПУСК2. Працює в тандемі з Контр. Жив. 12В, який вимикає силові ключі в разі того що рівень напруги живлення аварійно низький. Лінія підключена через дільник напруги зроблений з резистора R15, R18 та стабілітрона VD3, VD4.

Згідно цих міркувань була зроблена схема електрична принципова, зображена на рисунку 12.

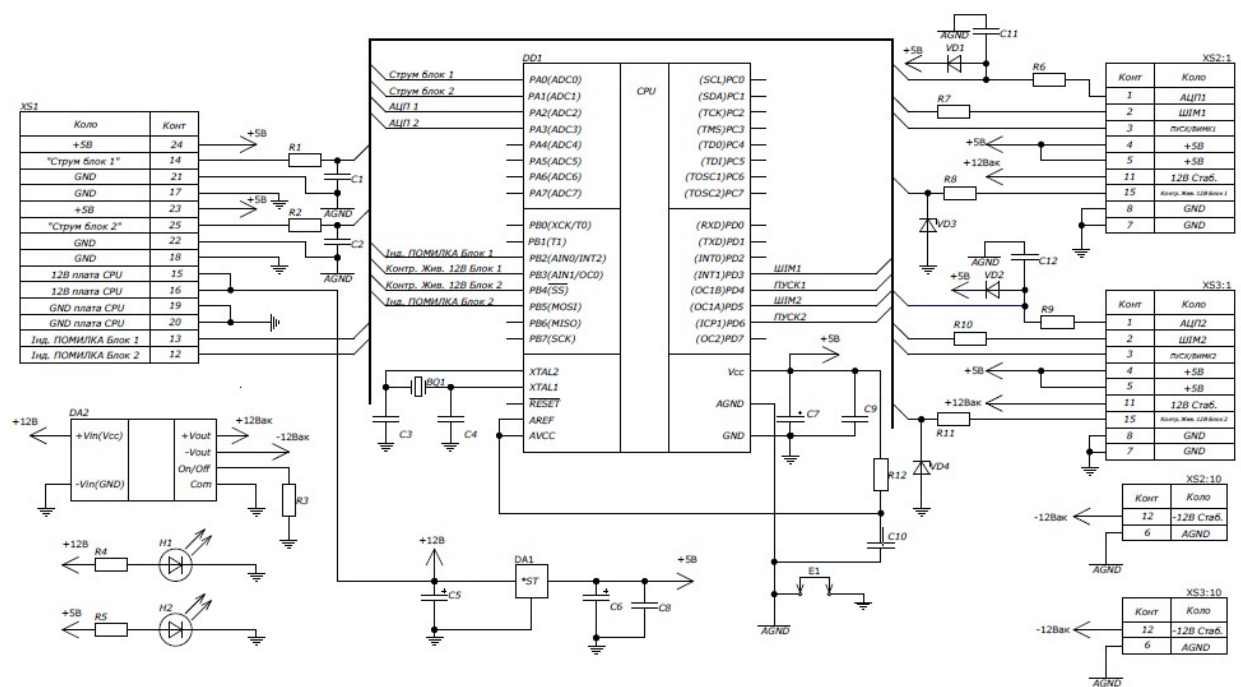


Рисунок 12 — Схема електрична принципова для плати керування

4 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

Під час роботи над цим проектом особливу увагу було приділено саме оновленню компонентної бази. Основними критеріями при виборі елементів були:

- Характеристики які позитивно впливають на роботу пристрою.
- Доступність компонентів на ринку.
- Висока надійність та довговічність навіть в умовах агресивного середовища.
- Адекватне відношення собівартості та якості у роботі самого елемента та простоті в його впровадженні.

З цією метою були впровадженні зміни в склад застарілих радянських компонентів на користь імпортованих та більш сучасних аналогів, які забезпечують новий рівень гарантії якості.

Серед елементів які були замінені є як активні, так і пасивні елементи. До активних входять мікросхеми та діоди, а до пасивних резистори та конденсатори. Активні елементи грають важливу роль в керуванні сигналами та їх інтерпретацією, і проведенні живлення та його підтримку на стабільному рівні. В свою чергу пасивні елементи відіграють допоміжну роль у вигляді фільтрації шумів та захисті від імпульсів високої напруги які можуть зашкодити чутливим елементам. Елементи які не були замінені — роз'єми XS1-XS4, з огляду на те що вони і так достатньо виконують свою функцію. Також була залишена перемичка E1, реалізована у вигляді невеличкого шматка провалки. Цей елемент є допоміжним і його можна прибрати після того як схема була перевірена на правильність роботи.

Для головного обчислювального мікроконтролера схеми був обраний Atmega16A-PU фірми Microchip (рис. 13). Даний вибір пояснюється наявністю вбудованого 10-розрядного АЦП для зняття телеметрії, апаратного ШІМ, а також достатньо хорошим об'ємом швидкої пам'яті для використання — 16 КБ.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						39
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Вибраний корпус PDIP-40 дозволяє досить зручно встановлювати мікросхему всередину плати, що також робить його більш ремонтоспроможним та готовим до програмування. Це все при досить широкому діапазоні напруги живлення від 2.7 до 5.5 В.

Характеристики Atmega16A-PU [11]:

- корпус PDIP-40
- 8-біт RISC
- 16 КБ Flash пам'яті
- 512 Б EEPROM
- 1 КБ SRAM
- максимальна частота 16 МГц
- напруга живлення 2.7–5.5 В
- 10-бітний АЦП
- Робоча температура –40..+85 градусів
- 8 каналів
- 32 виводів (I/O)
- Має інтерфейси UART, SPI, та I2C



Рисунок 13 — мікроконтролер Atmega16A-PU

Для збільшення точності часових інтервалів для мікроконтролера також потрібен зовнішній резонатор. Для цієї ролі був використаний кварцевий генератор з корпусом HC49/U на 16 МГц від компанії IQD FREQUENCY PRODUCTS (рис. 14). Він забезпечує максимально доступну частоту при невеликій ціні.

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						40
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

Характеристики кварцевого резонатора [12]:

- корпус HC49/U
- частота 16 МГц
- навантажувальна ємність 30 нФ
- стабільність при 25 градусах $\pm 20 \text{ppm}$
- монтаж ТНТ



Рисунок 14 — кварцовий резонатор HC49/U 16 МГц, IQD FREQUENCY PRODUCTS

Для живлення мікроконтролера та іншої цифрової периферії потрібне джерело постійної напруги в 5 В. Так як окрім 5 В потрібна ще розділена 12 В, було вирішено що буде ефективніше перевести живлення з 12 В в 5 В за допомогою інтегрованої схеми. Для цього був використаний лінійний перетворювач MC7805BTG від компанії ON Semiconductor (рис. 15). Використання такої мікросхеми забезпечує більшу простоту та економію місця, оскільки один цей елемент буде меншим ніж кілька елементів разом. Хоча для нього і потрібні додаткові конденсатори для кращої якості струму.

Характеристики MC7805BTG [13]:

- вхідна напруга 8–20 В
- вихідна напруга +5 В
- максимальний струм до 1.5 А
- корпус TO-220
- робоча температура $-40..+125$ градусів
- монтаж ТНТ

					<i>РЕ22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						41
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 15 — лінійний перетворювач MC7805BTG TO-220

Для роботи диференціального підсилювача потрібна особлива двополярна напруга. Для її отримання використовується вже інший стабілізатор, але цього разу не лінійний, а імпульсний та з гальванічною розв'язкою. Він перетворює 12 В на ± 12 В. Для цієї функції був обраний стабілізатор TMR1222 від компанії Traco Power (рис. 16).

Характеристики TMR1222 [14]:

- присутня гальванічна розв'язка
- потужність 2 Вт
- вхідна напруга 9–18 В
- вихідна напруга ± 12 В (двополярна, ізольована)
- вихідний струм 83 мА
- ККД 83%
- корпус SIP-8
- робоча температура $-40..+85$ градусів



Рисунок 16 — стабілізатор TMR1222, Traco Power

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		42

У схемі також використовуються діоди 1N4148 від Vishay (рис. 17). Вони відіграють роль захисних обмежувачів, які не дають амплітуді сигналу перевищувати напругу в 5 В. Якщо напруга збільшиться до 5.7 В або більше — діод відкриється та скине надлишок.

Характеристики діодів [15]:

- імпульсний режим роботи
- монтаж ТНТ
- корпус DO35
- максимальна напруга коли вимкнений 100 В
- струм навантаження 0.15 А



Рисунок 17 — діод 1N4148, Vishay

У колах апаратного моніторингу силової напруги блоків (Контр. Жив. 12В Блок 1, 2) використано стабілітрони BZX55C4V7 від Vishay (рис. 18). Вони відіграють роль параметричних порогових датчиків (компараторів). Стабілітрон обмежує та фіксує напругу на рівні не вище 4.7 В, що забезпечує чітке формування логічного нуля при аварійному просіданні живлення силових плат і надійно захищає цифрові входи порту РВ від пробоя.

Характеристики стабілітронів [16]:

- номінальна напруга стабілізації 4.7 В
- максимальна потужність розсіювання 0.5 Вт
- допуск напруги стабілізації $\pm 5\%$
- тип корпусу — DO-35 (скляний)

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		43



Рисунок 18 — стабілітрон BZX55C4V7, Vishay

Для конденсаторів були підібрані екземпляри від компанії Kemet та BC Component [17–19]. А саме керамічні (рис. 19) та електролітичні алюмінієві (рис. 20) відповідно. Керамічні конденсатори грають роль блокувальників. Вони мають малу ємність, але і малу індукцію та опір тяж, що дозволяє їм швидко віддавати енергію, яку вони отримують. Тому вони використовуються для блокування високочастотних завад.

Варто зауважити що для C3 і C4 були використані керамічні конденсатори ємністю 47 пФ та діелектриком C0G. А саме вони знаходяться в складі обв'язки кварцевого резонатора. Як і інші керамічні конденсатори, їх роль не давати шумам вплинути на корисний сигнал. Проте у цих конденсаторів більш критична роль, від їх стійкості залежить робота мікроконтролера напряму, оскільки йому потрібні точні періоди. Тому саме ці два конденсатори були обрані з більш стійким типом діелектрика, який практично не змінює свої властивості від перепадів температури. Номінал був обраний згідно паспортної ємності навантаження резонатора.

І наостанок були також використані електролітичні конденсатори C5..C7, у яких C5 і C6 мають ємність 1000 мкФ, а C7 — 47 мкФ. Вони порівняно повільні на високих частотах, але зате мають досить велику ємність у порівнянні та працюють як резервуари енергії при просадках потужності, а також фільтрують низькочастотні шуми.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		44



Рисунок 19 — керамічний конденсатор від Kemet



Рисунок 20 — алюмінієвий електролітичний конденсатор від BC Component

В якості резисторів були обрані металоплівкові 0.25 Вт від компанії Yageo [20] (рис. 21), номіналами 100 Ом, 1 кОм, 1.5 кОм, та 10 кОм. Вони обмежують струм щоб світлодіоди не згоріли, входять в склад фільтрів та підтяжок, дільників напруги та і впринципі захищають пристрій. Тому були використані саме ці резистори, оскільки їх технологія виготовлення робить їх досить витривалими при відхиленні опору у всього лиш $\pm 5\%$. Також вони забезпечують низький рівень власних шумів та високу точність номіналів навіть при коливаннях температури.



Рисунок 21 — металоплівковий резистор від Yageo

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		45

Для підключення плати до інших частин пристрою були використані роз'єми L77SDBH25S2RM8 та L77SDAH15S2RM8 [21] (рис. 22). Вони не були замінені, як я згадував раніше, оскільки вони є пасивними елементами, і просто не можуть застаріти за такий час. До них немає таких серйозних вимог як до активних елементів.



Рисунок 22 — роз'єм на 15 контактів

Таким чином були замінені необхідні елементи схеми. Нові елементи були обрані з ціллю покращення ефективності роботи пристрою, при цьому не перешкоджаючи його задуманим функціям та властивостям що були закладені раніше. Елементи були обрані переважно від імпортних довірених виробників щоб забезпечити якість компонентів.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						46
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

5 ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Цей розділ присвячений проектуванню друкованої плати. Сюди входять необхідні розрахунки параметрів провідників та визначення форми та розмірів майбутньої плати. Також було проведено вибір матеріалів плати та її трасування.

5.1 Розрахунок друкованих провідників

5.1.1 Розрахунок ширини друкованих провідників

Для того щоб розрахувати ширину друкованих провідників потрібно врахувати максимальний струм який буде по них протікати. В нашому випадку доріжки мають бути розраховані на струм до 1 А та 0.3 А для силових та сигнальних каналів відповідно.

Почнемо розрахунки з сигнальних ланцюгів.

Мінімальне значення ширини друкованого провідника у вузькому місці розраховується за формулою:

$$t1N_s = t_{min}D_s + |\Delta thos| = 0,3 \text{ мм}, \quad (5.1)$$

де $t_{min}D_s$ — мінімальна ширина за третім класом точності, $t_{min}D_s = 0,25$ мм; $|\Delta thos|$ — допуск на ширину провідника, $|\Delta thos| = -0,05$ мм.

Для розрахунку мінімального значення ширини друкованого провідника у широкому місці застосовується аналогічна попередньому розрахунку формула, але вибирається клас точності плати на один рівень нижче.

Таким чином клас точності $t_{min}D_s$ буде дорівнювати 0,45 мм, а допуск $|\Delta thos| = -0,1$.

$$t1W_s = t_{min}D_s + |\Delta thos| = 0,55 \text{ мм}, \quad (5.2)$$

Мінімальна допустима ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%) розраховується за формулою:

$$t_2S = \frac{I_S \cdot I_{\max s} \cdot \rho}{h_s \cdot U_{жувс} \cdot 0,03} = 0,051 \text{ мм}, \quad (5.3)$$

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

де ρ — питомий опір провідника, $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l_s — довжина провідника, $l_s = 0,100 \text{ м}$;

h_s — товщина фольги, $h_s = 35 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$;

$U_{живс}$ — прикладена напруга, $U_{живс} = 3,3 \text{ В}$;

I_{maxs} — максимальний струм, $I_{maxs} = 0,3 \text{ А}$.

Мінімально допустима ширина провідника з урахуванням допустимого рівня струму на ньому розраховується за формулою:

$$t_3 S = \frac{I_{\max s}}{h_s \cdot j_s} = 0,429 \text{ мм}, \quad (5.4)$$

де I_{maxs} — максимальний струм, $I_{maxs} = 0,3 \text{ А}$;

h_s — товщина фольги, $h_s = 35 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$;

j_s — допустима щільність струму в провіднику, $j_s = 20 \text{ Амм}^2$.

Розрахуємо ширину провідників для силових ланцюгів.

Мінімальне значення ширини друкованого провідника у вузькому місці розраховується за формулою:

$$t_1 N_p = t_{\min} D_p + |\Delta th_{op}| = 0,3 \text{ мм}, \quad (5.5)$$

де $t_{\min} D_p$ — мінімальна ширина за третім класом точності, $t_{\min} D_p = 0,25 \text{ мм}$;

$|\Delta th_{op}|$ — допуск на ширину провідника, $|\Delta th_{op}| = -0,05 \text{ мм}$.

Для розрахунку мінімального значення ширини друкованого провідника у широкому місці застосовується аналогічна попередньому розрахунку формула, але вибирається клас точності плати на один рівень нижче.. Таким чином клас точності $t_{\min} D_p$ буде дорівнювати $0,45 \text{ мм}$, а допуск $|\Delta th_{op}| = -0,1$.

$$t_1 W_s = t_{\min} D_p + |\Delta th_{op}| = 0,55 \text{ мм}, \quad (5.6)$$

Мінімальна допустима ширина провідника з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%) розраховується за формулою:

$$t_2 S = \frac{I_p \cdot I_{\max p} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{живр} \cdot 0,03} = 0,33 \text{ мм}, \quad (5.7)$$

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						48
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

де ρ — питомий опір провідника, $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l_p — довжина провідника, $l_p = 0,100$ м;

h_p — товщина фольги, $h_p = 35 \cdot 10^{-3}$ мм;

$U_{живр}$ — прикладена напруга, $U_{живр} = 5$ В;

I_{maxp} — максимальний струм, $I_{maxp} = 1$ А.

Мінімально допустима ширина провідника з урахуванням допустимого рівня струму на ньому розраховується за формулою:

$$t_3 S = \frac{I_{maxp}}{h_p \cdot j_p} = 1,429 \text{ мм}, \quad (5.8)$$

де I_{maxp} — максимальний струм, $I_{maxp} = 1$ А;

h_p — товщина фольги, $h_p = 35 \cdot 10^{-3}$ мм;

j_p — допустима щільність струму в провіднику, $j_p = 20 \text{ Амм}^2$.

Рекомендована ширина провідника для прокладання в сигнальних ланцюгах становить 0,55 мм, а для силових ланцюгів 1,429 мм.

5.1.2 Розрахунок зазорів між елементами

Розрахуємо найменшу номінальну відстань між двома провідниками по формулі:

$$S_{min} = S_m + \Delta t_{во} = 0,3 \text{ мм} \quad (5.9)$$

де S_m — номінальна допустима відстань між сусідніми друкованими об'єктами, $S_m = 0,25$ мм;

$\Delta t_{во}$ — допуск на ширину провідника, $\Delta t_{во} = 0,05$ мм.

5.1.3 Розрахунок відстані у вузькому місці для прокладання провідника між двома контактними майданчиками

Розрахуємо мінімальну відстань у вузькому місці для прокладання провідника між двома контактними майданчиками за формулою:

$$L = \frac{D_1 + D_2}{2} + N \cdot t_{min} + S_{min} \cdot (N + 1) + T = 3,45 \text{ мм}, \quad (5.10)$$

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						49
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

де D_1 — діаметр першого контактної майданчика, $D_1 = 1.4$ мм;
 D_2 — діаметр другого контактної майданчика, $D_2 = 1.4$ мм;
 S_{min} — відстань між елементами провідникового рисунку, $S_{min} = 0.3$ мм;
 N — кількість провідників, $N = 2$;
 T — розміщення центрів осей, $T = 0.05$ мм;
 t_{min} — ширина провідника, $t_{min} = 0.55$ мм.

Результати розрахунків занесені в таблицю 5.1

Таблиця 5.1 — Розрахована ширина провідників

Тип	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			широка	вузька	
Силовa	5	1	1,429	1,429	0,3
Сигнальна	3,7	0,3	0,55	0,3	0,3

Ширина провідника для силових ліній була заокруглена до 1,5 мм для зручності і забезпечення додаткового струму. Ця ширина була використана у всіх силових лініях оскільки на платі не виникло проблем через вузькі проходи.

Ширина сигнальних ліній була збільшена до 1,25 мм, оскільки площа плати цілком це дозволяє, і при цьому цілісність сигналу та властивості опору та тепловідводу провідника стають набагато кращі.

5.2 Вибір конструкційних матеріалів та технологія виготовлення

Для основи плати був використаний діелектрик FR4 з шаром металізації 35 мкм та товщиною 1.5 мм.

FR4 — це матеріал який є склотекстолітом, тобто складається зі скловолокна та епоксидної смоли. Він є типовим вибором багатьох радіотехніків при створенні друкованих плат через свою високу міцність та стійкість до

температури. А в поєднанні з шаром металізації 35 мкм такі плати мають відмінну електричну провідність та якість і надійність з'єднань.

Нижче наведені технічні характеристики FR4 [22]:

- міцність на згин перпендикулярно шарам за нормальних умов — 340 МПа;
- ударна міцність при згині паралельно шарам — 33 кДж/м²;
- електрична міцність перпендикулярна шарам — 14,2 МВ/м;
- щільність — 1,7-1,9 г/см³;
- діелектрична проникність — 5,5;
- тангенс кута втрат — 0,04.

З огляду на кількість та природу положення елементів та проведення доріжок було б доцільно виготовити плату за третім класом точності позитивним комбінованим методом.

Було вирішено обрати двосторонній тип плати з двома шарами металізації, оскільки провівши деякі ланцюги на іншій стороні, можна зекономити місце на платі та зменшити її площу і зробити з'єднання компонентів більш простим.

Всі компоненти знаходяться на верхній частині плати, та з'єднуються з платою і між собою шляхом монтажу через наскрізні отвори. Це дозволяє надійне кріплення до плати та якісний зв'язок з мінімальними перешкодами.

Плата являє собою прямокутник з розмірами 180 на 90 мм. Для надійного кріплення плати всередині корпусу в ній є 6 отворів діаметром 3,6 мм під шурупи. Також однією з особливостей плати є велика кількість перехідних отворів, які служать як тепловідводи та блокують зовнішні шуми, спричинені іншими модулями пристрою. Розміщення компонентів та трасування доріжок було зроблене в програмному середовищі Altium Designer. На рисунках 23 і 24 зображені топології верхнього та нижнього шару провідних рисунків плати відповідно.

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						51
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

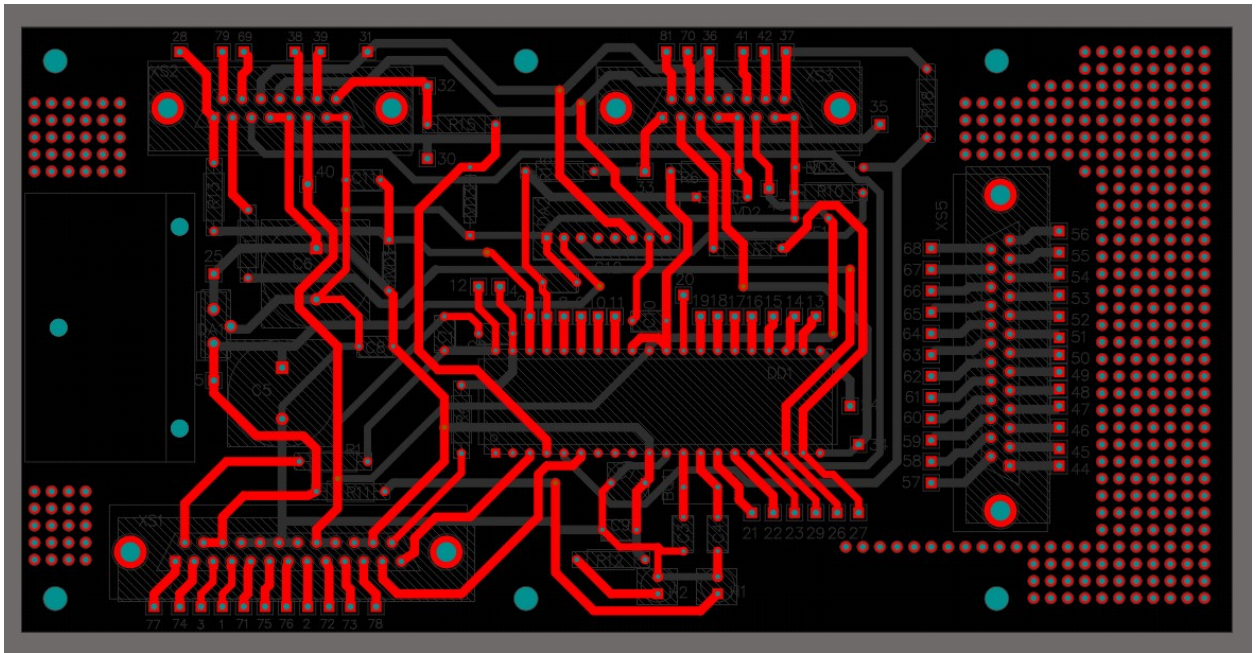


Рисунок 23 — Верхній топологічний шар друкованої плати

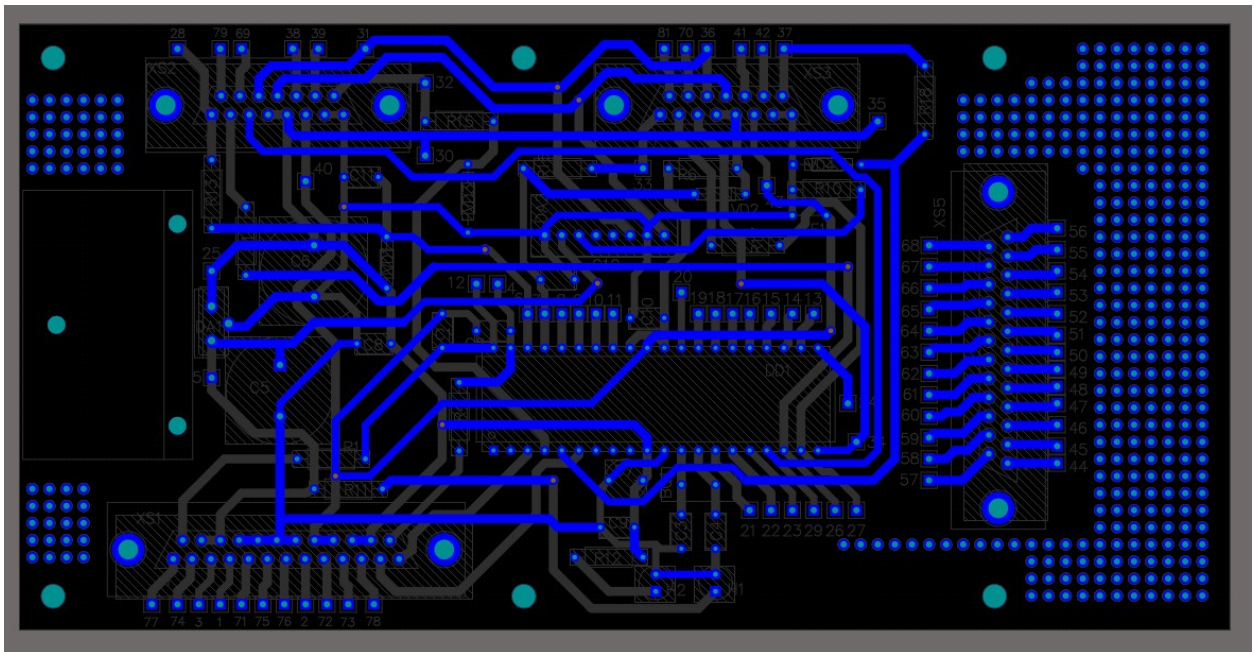


Рисунок 24 — Нижній топологічний шар друкованої плати

Отже, в цьому розділі було пораховано та обрано ширину провідників, проведено їх, та розміщено компоненти на платі.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						53
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

6 КОНСТРУКЦІЯ ПРИЛАДУ ТА АНАЛІЗ ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

6.1 Опис конструкції

Конструкцію модуля для розподільника-регулятора струму розроблено в програмному середовищі «SolidWorks».

Корпус пристрою складається з нижньої (рис. 27) та верхньої кришки (рис. 28), які виготовлені з АБС пластику за допомогою технології 3D друку. Друкована плата встановлюється на стійки в нижній частині кришки та закріплюється за допомогою шести шурупів діаметром 3,5. Зображення зібраного модуля показано на рисунку 29. У верхній частині кришки розташовані три отвори для конекторів до інших модулів пристрою та два отвори для світлодіодів.

Верхня кришка закріплюється до нижньої за допомогою чотирьох гвинтів по кутах М2х5.

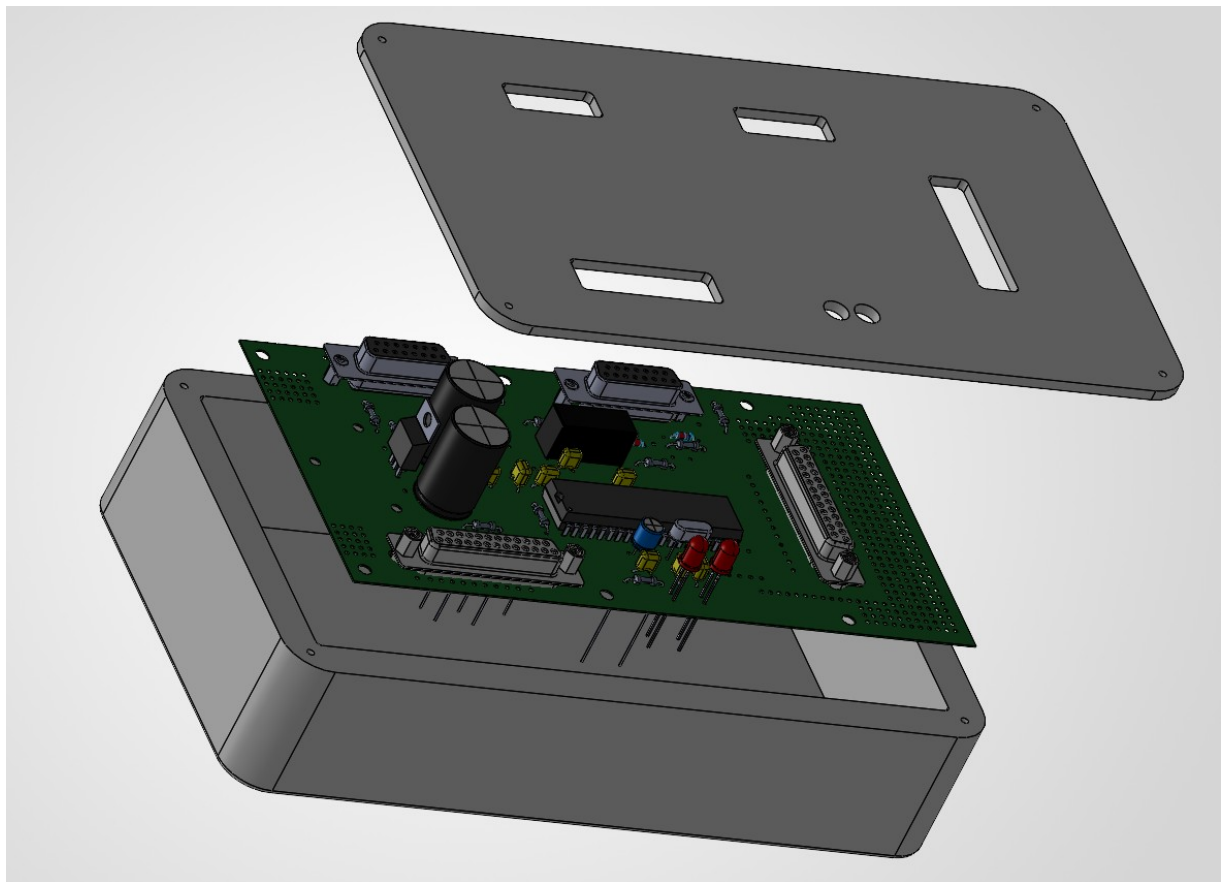


Рисунок 26 — Збірка керувального модуля

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PE22.565111.001 ПЗ

Лис
54

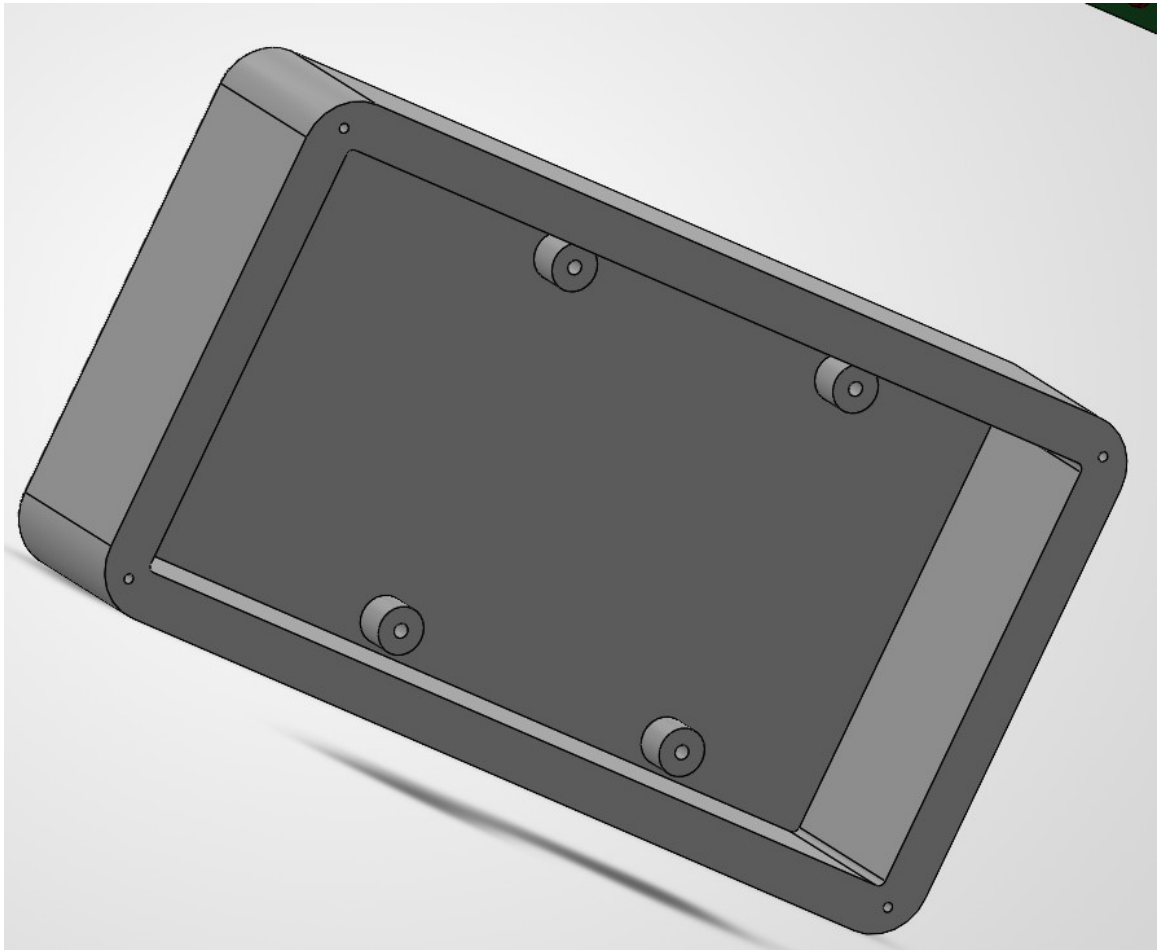


Рисунок 27 — Нижня кришка корпусу, ізометричний вигляд

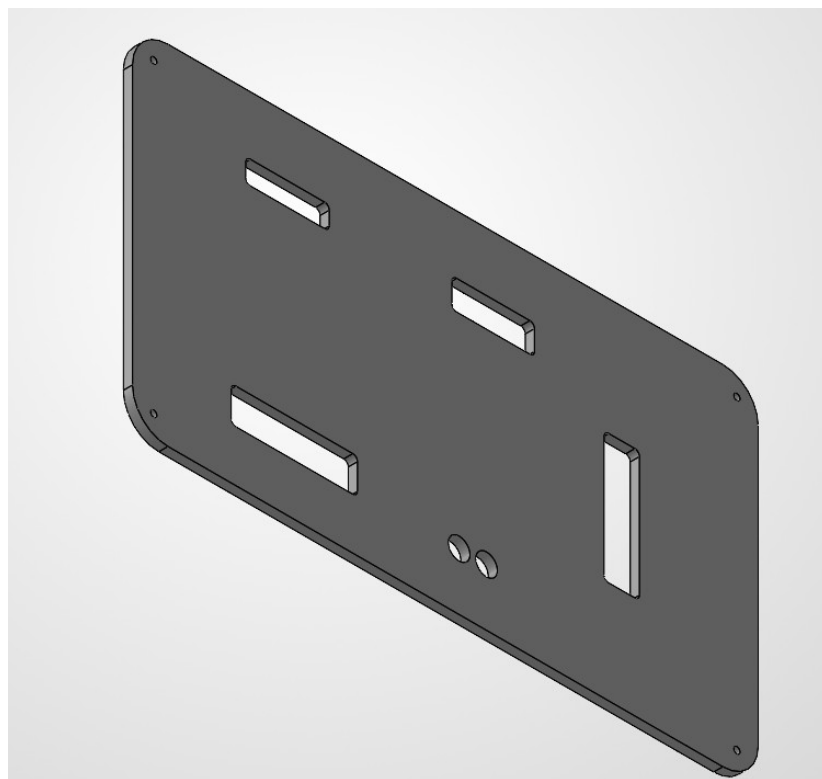


Рисунок 28 — Верхня кришка корпусу, ізометричний вигляд

Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата

PE22.565111.001 ПЗ

Лис
55

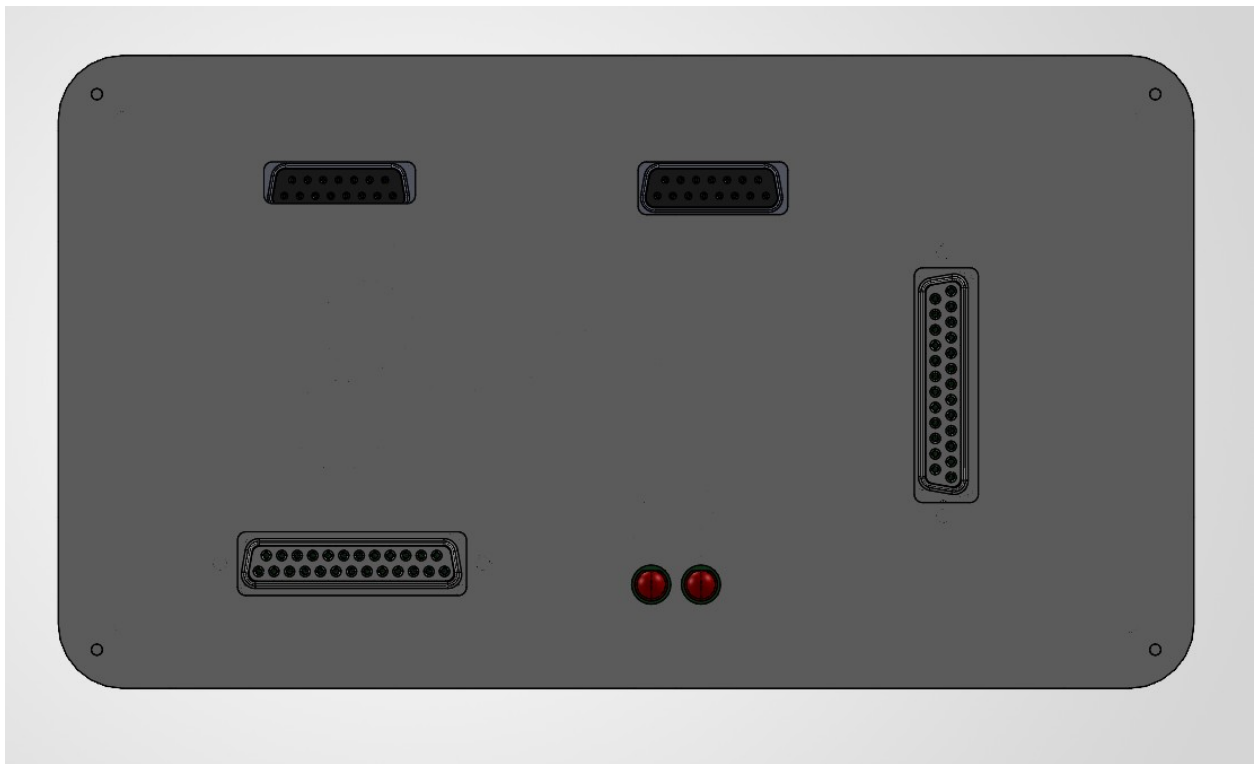


Рисунок 29 — Зібраний модуль, вигляд зверху

6.2 Розрахунок часу безвідмовної роботи

З метою оцінки експлуатаційних характеристик розробленого розподільника-регулятора струму необхідно провести розрахунок його надійності [23]. Оскільки пристрій належить до категорії відновлюваної промислової апаратури, будь-який радіоелектронний компонент у разі виходу з ладу може бути замінений.

Зважаючи на те, що експлуатація модуля відбуватиметься у жорстких умовах гальванічного цеху (наявність хімічних випарів та температурних коливань), для розрахунку обрано підвищений поправочний коефіцієнт експлуатації $K_e = 2,0$.

Інтенсивність відмов для кожного типу радіоелементів в робочому режимі розраховується за базовою формулою:

$$\lambda_{pi} = \lambda_{0i} \cdot K_e, \quad (6.1)$$

де λ_0 — довідкова інтенсивність відмов елемента;

K_e — поправочний коефіцієнт умов експлуатації.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		56

Використовуючи знайдені значення інтенсивності відмов елементів, були розраховані їх робочі значення. Результати цих розрахунків наведені в таблиці нижче.

Таблиця 6.1 — Результати розрахунків робочих значень інтенсивності відмов

Найменування елемента	N, шт	$\lambda_{0i} \cdot 10^6, \frac{1}{год}$	K _{ei}	$\lambda_p \cdot 10^6, \frac{1}{год}$
Резистори	12	0,5	2	1.0
Керамічні конденсатори	9	0,7	2	1.4
Електролітичні конденсатори	3	1,5	2	3.0
Мікроконтролер Atmega16A-PU	1	2.0	2	4.0
Лінійний стабілізатор	1	1.5	2	3.0
DC-DC перетворювач	1	2.0	2	4.0
Діоди та стабілітрони	4	1.0	2	2.0
Світлодіоди	2	1.5	2	3.0
Кварцовий резонатор	1	1.0	2	1.0
Комутаційні роз'єми	4	0.5	2	1.0
Друкована плата	1	1.0	2	2.0

Далі був визначений потік відмов за формулою:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \lambda_p \cdot N_i = 67 \cdot 10^{-6} \frac{1}{год}, \quad (6.2)$$

де λ_p — робоче значення інтенсивності відмов;

N_i — кількість елементів кожного типу;

n — кількість елементів.

Середній час напрацювання на відмову розраховано по формулі:

$$T_0 = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{67 \cdot 10^{-6}} \approx 14925 \text{ годин.} \quad (6.3)$$

де ω — потік відмов.

В результаті розрахунків було визначено, що середній час напрацювання на відмову складає приблизно 14925 годин, що еквівалентно понад 1.5 рокам безперервної роботи модуля.

6.3 Розрахунок собівартості

Наостанок було б доречно провести обрахунки вартості модуля для повноцінного порівняння з його аналогами [24]. Для цього була використана наступна формула:

$$C = V_m + V_z + V_{\text{ЄСВ}} + V_n, \quad (6.4)$$

де V_m — витрати на матеріали та компоненти;

V_z — витрати на заробітню плату робітників;

$V_{\text{ЄСВ}}$ — відрахування на соціальні заходи (ЄСВ);

V_n — накладні витрати.

Нижче наведений перелік компонентів та їх ціни (таблиця 6.2). Розрахунок вартості проводився на основі актуальних ринкових цін постачальників електронних компонентів в Україні (станом на поточний рік).

Таблиця 6.2 — Витрати на матеріали та комплектуючі

Найменування	N, шт	Ціна, грн	Загальна вартість, грн
Мікроконтролер Atmega16A-PU	1	420	420
DC-DC перетворювач TRM1222	1	256	256
Стабілізатор напруги MC7805	1	14	14
Кварцовий резонатор на 16МГц	1	8	8
Конектори на 25 пінів	2	174	348
Конектори на 15 пінів	2	87	174
Металоплівкові резистори	12	1	12
Електролітичні конденсатори	3	15	45
Керамічні конденсатори	9	9	81
Стабілітрони	2	3	6
Діоди	2	2	4
Світлодіоди	2	30	60
Друкована плата	1	450	450
Корпус з пластику ABS	1	380	380
Витратні матеріали (припій, маска, флюс)	1	80	80

Підсумувавши всі витрати на компоненти модуля, було отримано їх загальну вартість, яка складає приблизно 2340 грн.

Для виготовлення, пайки та базового тестування дослідного зразка потрібно орієнтовно 12 робочих годин. Було прийнято годинну тарифну ставку інженера-монтажника 120 грн/год.

Звідси:

$$V_{з.осн} = t \cdot C_{год} = 12 \cdot 120 = 1440 \text{ грн}, \quad (6.5)$$

де t — кількість оплачуваних годин;

$C_{год}$ — годинна ставка.

Також потрібно врахувати додаткову заробітну плату у вигляді відпускних та премій, які складають 10 відсотків від основної. Отже загалом витрати на заробітну плату складають 1584 грн.

Згідно з чинним законодавством України, єдиний соціальний внесок становить 22% від фонду оплати праці. Отже формула для розрахунку цих витрат буде така:

$$V_{есв} = V_{з.осн} \cdot 0,22 = 1584 \cdot 0,22 = 348,48 \approx 350 \text{ грн}. \quad (6.6)$$

І наостанок, розрахуємо накладні витрати. З огляду на те що виробництво відноситься до дослідного було прийнято рівень витрат в 50% від основної заробітної плати:

$$V_n = V_{з.осн} \cdot 0,50 = 1440 \cdot 0,5 = 720 \text{ грн}. \quad (6.7)$$

Тепер ми можемо порахувати повну собівартість модуля, яка складає:

$$C = 2340 + 1584 + 350 + 720 = 4994 \approx 5000 \text{ грн}. \quad (6.8)$$

Отже, була розрахована собівартість модуля керування, яка складає приблизно 5000 грн. При такій такій ціні загальна собівартість пристрою в цілому (якщо припустити що силові модулі коштують так само) буде 15000-20000 грн, що задовольняє його цілі на економічному фронті, оскільки у порівнянні такий пристрій є набагато дешевшим та вигіднішим через можливість відновлення.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						60
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті проведено аналіз існуючих промислових джерел живлення та пристроїв, призначених для розподілу та регулювання струму в гальванічних ваннах. На основі цього аналізу, відповідно до вимог технічного завдання, запропоновано конструкцію модуля керування. Пристрій в теорії дозволяє незалежно керувати двома каналами електролізу, забезпечує прецизійне ШІМ-регулювання вихідного струму в діапазоні від 1 до 29 А із точністю автоматичної стабілізації ± 2 А, а також містить інтегрований бар'єр гальванічної ізоляції для захисту низьковольтного цифрового ядра та гарантування безпеки оператора.

Розроблено структурну і електричну принципову схему на основі оновленої елементної бази та підготовлено необхідну конструкторську документацію для виготовлення модуля керування пристроєм.

Згідно зі схемою електричною принциповою проведено розрахунки геометричних параметрів друкованих провідників, необхідних для нормального функціонування пристрою. На основі отриманих результатів розроблено двосторонній друкований вузол пристрою на базі матеріалу FR-4.

Згідно з технічним завданням розроблено корпус пристрою, габаритні розміри якого складають 203x113x45 мм.

Проведено розрахунки надійності за середніми інтенсивностями відмов компонентів, які підтверджують, що спроектований модуль пристрою задовольняє вимогам стаціонарної промислової експлуатації за групою механічного виконання М1, його розрахунковий час напрацювання на відмову в близько 14925 годин та має розраховану собівартість близько 5000 грн.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						61
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Технічні умови на вироби ГОСТ 30773-2001 [Електронний документ]. URL: <http://vsegost.com/Catalog/67/6712.shtml> (дата звернення 16.06.26).
2. ГОСТ 15150-69. Виконання для різних кліматичних умов [Електронний документ]. URL: <https://www.manotom.com/help/gosts/gost3/> (дата звернення 16.06.26).
3. ДСТУ EN 60529:2018 [Електронний документ]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81152 (дата звернення: 16.06.2026).
4. Импульсный выпрямитель для гальваники | Сделано в ШВЕЦИИ. *KraftPowercon*. URL: <https://kraftpowercon.com/ru/product/vipriamiteli-dlya-galvaniki-flexkraft> (дата звернення: 16.06.2026).
5. BVP Electronics - Імпульсні стабілізовані джерела (блоки) живлення постійної напруги BVP Electronics. *BVP Electronics - Новини про останні розробки джерел живлення, випрямлячів і перетворювачів електроенергії BVP Electronics*. URL: <https://bvp.com.ua/ua/Production.php?Show=BVPTBR> (дата звернення: 16.06.2026).
6. DCAUTO HK-G | SANSHA ELECTRIC Manufacturing Co., LTD. *SANSHA ELECTRIC Manufacturing Co., LTD. Website*. URL: <https://www.sansha.co.jp/eng/products/surface/hkd-g.html> (date of access: 16.06.2026).
7. PSP Tower - MUNK. *MUNK*. URL: <https://munk.de/en/produkte/psp-tower/> (date of access: 16.06.2026).
8. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3 т. Т. 2 : Електрика і магнетизм : навч. посіб. 2-ге вид., випр. Київ : Техніка, 2006. 452 с.
9. Прянишников В. А. Электроника : полный курс лекций. 3-е изд. Санкт-Петербург : КОРОНА-принт, 2000. 416 с.
10. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. 416 с.

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						62
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

11. ATMEGA16-16PU. НОВИ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/atmega16-16pu_22561.html (date of access: 16.06.2026).

12. LFX TAL003240B datasheet by | SnapMagic Search. *SnapMagic Search | Free PCB Footprints and Schematic Symbols*. URL: <https://www.snapeda.com/parts/LFX TAL003240B/IQD%20Frequency%20Products/datasheet/> (date of access: 16.06.2026).

13. *Intelligent Power and Sensing Technologies | onsemi*. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/mc7800-d.pdf> (дата звернення: 16.06.2026).

14. *Traco Power | tracopower.com*. URL: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tmr2_datasheet.pdf (дата звернення: 16.06.2026).

15. *Micros - Hurtownia części elektronicznych*. URL: https://www.micros.com.pl/mediaserver/DI1N4148____VIS_0001.pdf (дата звернення: 16.06.2026).

16. BZX55C4V7-TAP. НОВИ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/bzx55c4v7-tap.html> (date of access: 16.06.2026).

17. C317C104M5R5TA. НОВИ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/c317c104m5r5ta.html> (date of access: 16.06.2026).

18. C315C470J5G5TA. НОВИ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/c315c470j5g5ta.html> (date of access: 16.06.2026).

19. MAL204831102E3. НОВИ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ. URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/mal204831102e3.html> (date of access: 16.06.2026).

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						63
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

20. *YAGEO Group – Built into Tomorrow.*

URL: https://yageogroup.com/content/datasheet/asset/file/YAGEO-MF0_DATASHEET (дата звернення: 16.06.2026).

21. L77SDBH25SOL2RM8. *НОВІ НАДХОДЖЕННЯ - РКС Компоненти - РАДІОМАГ.*

URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/l77sdbh25sol2rm8.html> (date of access: 16.06.2026).

22. FR4100X160 / 3535 (світлочутлива плата 100x160мм двостороння) [Електронний документ]. РКС компоненти: вебсайт. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/FR4_datasheet.pdf (дата звернення 25.05.23).

23. Фізико-теоретичні основи конструювання електронних апаратів [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до розрахункових та контрольних робіт для студентів напряму підготовки 06050902 «Радіоелектронні апарати» /Уклад.: С. М. Перегудов, М. В. Зінченко — К.: НТУУ «КПІ» 2012 — 56 с.

24. Економічне обґрунтування дипломних проєктів : метод. вказівки до виконання економічного розділу дипломних проєктів для студентів інженерних спеціальностей / уклад.: О. А. Шевчук, Н. В. Ковтун. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 48 с.

					<i>PE22.565111.001 ПЗ</i>	Лис
						64
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Додаток А — Технічне завдання

Додаток Б — Перелік елементів

Додаток В — Специфікація на друкований вузол

Додаток Г — Специфікація пристрою

					РЕ22.565111.001 ПЗ	Лис
						65
Зм.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата		

ПОГОДЖЕНО

ЗАТВЕРДЖЕНО

к.т.н., доц. Перегудов С.М.

к.т.н., доц. Мовчанюк А.В.

(керівник)

(Завідувач кафедри ПРЕ)

(підпис)

(підпис)

Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

РЕ22.674869.001 ТЗ

Кулик Д.С.

(виконавець)

(підпис)

Київ - 2026 року

					РЕ22.565111.001 ТЗ	Лис
						1
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Найменування та область застосування

Розподільник-регулятор струму для гальванічних ванн.

Застосування: автоматизоване джерело живлення для гальванічних ванн.

2. Підстава для розробки

Підставою до виконання є завдання, видане кафедрою прикладної радіоелектроніки.

3. Мета та призначення розробки

Розробка приладу для розподілу та регулювання струму з одного джерела для двох гальванічних ванн.

4. Вимоги до ДП

ДП має бути виконана відповідно до календарного плану.

Звіт (дипломний проект) має бути оформлений згідно з ДСТУ 3974-2000.

5. Технічні вимоги

Напруга живлення постійна, В.....12–17;

Струм споживання, А, не більше.....60;

Захист від перевищення струму на рівні, А.....32–39;

Діапазон вихідного струму, А.....1–29;

Точність автоматично утримуваного струму, А..... ± 2 ;

Кількість окремо контрольованих виходів, шт.....2.

5.2 Вимоги життєздатності та стійкості до зовнішніх впливів та чинників

Кліматичне виконання УХЛ 5 ГОСТ 15150-69, експлуатація

дозволяється при умові що пристрій знаходиться не поряд або над гальванічною ванною.

За стійкістю до механічних впливів обладнання повинно відповідати групі експлуатації М1 згідно з ГОСТ 17516.1-90.

5.3 Вимоги надійності

Час безвідмовної роботи, не менше, год.....12000;

або, років.....1.5.

					<i>РЕ22.565111.001 ТЗ</i>	Лис
						2
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

6 Вимоги до конструкції

Конструкція виробу повинна мати габаритні розміри:

довжина, мм, не більше.....400;
ширина, мм, не більше.....400;
висота, мм, не більше.....600.

Типи і технічні характеристики елементної бази, що використовується повинні задовольняти показники призначення та умов експлуатації розроблюваного пристрою.

7 Вимоги уніфікації та стандартизації

Використовувати уніфіковану та стандартизовану елементу базу та матеріали.

8 Вимоги до дизайну, ергономіки та технічної естетики

Вимоги до дизайну не висуваються.

9 Вимоги до експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту

Пристрій повинен бути розбірним для забезпечення легкого доступу при експлуатації та ремонті.

10 Вимоги до безпеки для життя, здоров'я і майна громадян та охорони довкілля

Розроблюваний пристрій має відповідати вимогам до безпеки для життя, здоров'я і майна громадян та охорони довкілля згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75, ГОСТ 12.1.019-79, ГОСТ 12.1.038-88.

Утилізація згідно вимог для промислових відходів за ГОСТ 30773-2001.

11 Вимоги до сировини, матеріалів і покупні комплектувальні вироби

В конструкції повинні бути використані деталі та матеріали, які серійно випускає промисловість та які дозволені до застосування в електронних засобах загального призначення.

					<i>PE22.565111.001 T3</i>	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

12 Вимоги до консервації, пакування і маркування

Маркування не регламентовано.

Пакування: пристрій необхідно загорнути в бульбашко-повітряну плівку, вставити в коробку з пінопласту та помістити в картонну коробку.

Консервація: не передбачено.

13 Вимоги до розроблюваної документації

Документація оформлюється згідно з ЄСКД.

Склад конструкторської документації:

1. Текстова документація (пояснювальна записка, перелік елементів, специфікація на пристрій).
2. Графічна документація загальним обсягом не менше 3 аркушів А3 (схема електрична принципова, складальний кресленик пристрою, складальний кресленик друкованого вузла)

					<i>PE22.565111.001 T3</i>	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК В

Форм.	Зона	Лист	Позначення	Назва	Кільк.	Прим.
A3			PE22.565111.001 СК	Складальний кресленик	1	
A3			PE22.565111.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
A4			PE22.565111.001 ПЕ	Перелік елементів	1	
				<u>Деталі</u>		
A3		1	PE22.758725.001	Друкована плата	1	
				<u>Інші вироби</u>		
		2		Кварцевий резонатор HC49/U 16 МГц, IQD FREQUENCY	1	BQ1
		3		Конденсатор C322C 104M5R5TA	2	C1,C2
		4		Конденсатор C322 C470J5G5TA	2	C3,C4
		5		Конденсатор 038RSU 1000мкФ	2	C5,C6
		6		Конденсатор 038RSU 47мкФ	1	C7
		7		Конденсатор C322C 104M5R5TA	3	C8-C10
		8		Конденсатор C322C 105M5R5TA	2	C11-C12
		9		Лінійний стабілізатор MC7805BTG, ONSemі	1	DA1
		10		DC-DC перетворювач TRM1222, TRACO POWER	1	DA2
Зм.	Арк.	№ докум.	пол.	Дат.	РЕ22.565111.001	
Розробив Перевір. Реценз. Н. Контр Затверд.					Друкований вузол	
					Літ.	Арк.
						1
					Аркушів	2
					КГП ім. Ігоря Сікорського, РТФ РЕ-22	

[illegible]

ДОДАТОК Г

[illegible]