

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

«17» _____ червня _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електронні прилади та пристрої»

спеціальності 171 «Електроніка»

на тему: «Драйвер виконавчого пристрою»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ДЕ-11

Розколупа Олеся Миколаївна _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н.

Тугай Сергій Борисович _____

Рецензент:

Декан ФЕЛ, д.т.н., професор

Найда Сергій Анатолійович _____

Консультант

з нормоконтролю

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент

Батрак Лариса Миколаївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2025 року

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 171 «Електроніка»

Освітньо-професійна програма «Електронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

« 21 » _____ травня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Розколупи Олесі Миколаївни

1. Тема проєкту «Драйвер виконавчого пристрою»

керівник проєкту Тугай Сергій Борисович

затверджені наказом по університету від «03» червня 2025 р. №1885-с

2. Термін подання студентом проєкту 10 червня 2025

3. Вихідні дані до проєкту: пристрій має приймати стандартний вхідний сигнал згідно протоколу HART та виконувати безперервне керування клапаном струмом до 1 А та напругою живлення не вище 10В.

4. Зміст пояснювальної записки: розробка структурної та принципової схеми драйвера виконавчого пристрою; вибір та обґрунтування використання елементної бази; проектування друкованої плати у середовищі KiCad; моделювання критичних режимів експлуатації перетворювача напруги у середовищі Proteus.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична структурна; схема електрична принципова; друкована плата.

6. Дата видачі завдання 21.05.2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Розробка технічного завдання	11.04.2025–20.04.2025	
2	Розробка структурної схеми	20.04.2025-21.04.2025	
3	Розробка принципової електричної схеми	21.04.2025-24.04.2025	
4	Вибір та обґрунтування використання елементної бази	24.04.2025-26.04.2025	
5	Проектування схеми у середовищі KiCad	26.04.2025-30.04.2025	
6	Виготовлення плати на ЧПУ станку	30.04.2025-01.05.2025	
7	Розміщення конструктивних елементів на платі	01.05.2025-02.05.2025	
8	Конструкторсько-технологічний розрахунок друкованої плати	02.05.2025-20.05.2025	
9	Проектування плати в KiCad	20.05.2025-24.05.2025	
10	Моделювання критичних умов роботи перетворювача напруги	24.05.2025-29.05.2025	
11	Виконання креслення ЕЗ	29.05.2025-01.06.2025	
12	Виконання креслення друкованої плати	01.06.2025-03.06.2025	
13	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2025-10.06.2025	

Студент

Олеся РОЗКОЛУПА

Керівник

Сергій ТУГАЙ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт спрямований на розробку драйвера виконавчого пристрою. Актуальність теми зумовлена підвищеними вимогами до стабільності регулювання робочого середовища у вакуумній камері у сучасних електронно-променевих установках, де точність підтримання середовища значно впливає на якість обробки матеріалів. Метою даного проєкту є створення електронного пристрою, який здатний забезпечити регулювання положенням золотника клапана за допомогою аналогового керування. Для її досягнення були поставлені такі завдання:

- технічний аналіз існуючих рішень та схем керування;
- вибір та обґрунтування елементної бази;
- розробка системи керування;
- розрахунок друкованої плати;
- моделювання роботи частини системи;
- створення корпусу пристрою.

У ході роботи проведено аналіз існуючих рішень у галузі електронно-променевих технологій, розроблено драйвер виконавчого пристрою із врахуванням особливостей пропорційного електромагнітного клапана. Основну увагу приділено побудові логічних каскадів та вибору елементної бази. У проєкті змодельовано роботу понижуючого перетворювача напруги при критичних умовах роботи з використанням програмного середовища Proteus. Результати проєкту можуть бути використані у системах технологічного керування для електронно-променевого обладнання, автоматизованих лабораторних комплексах, інженерних дослідженнях, які пов'язані з прецизійним регулюванням середовища у вакуумі.

Ключові слова: електроніка, драйвер, пропорційний клапан, електронно-променеві технології.

ABSTRACT

The diploma project is aimed at developing an actuator driver. The relevance of the topic is due to the increased requirements for the stability of the working environment in the vacuum chamber in modern electron beam installations, where the accuracy of maintaining the environment significantly affects the quality of material processing.

The goal of this project is to create an electronic device that can provide control of the valve spool position using analog control. To achieve this goal, the following tasks were set:

- technical analysis of existing solutions and control schemes;
- selection and justification of the element base;
- development of the control system;
- calculation of the printed circuit board;
- modeling the operation of a part of the system;
- creation of the device case.

In the course of the work, an analysis of existing solutions in the field of electron-beam technologies was carried out, and an actuator driver was developed taking into account the features of a proportional electromagnetic valve. The main attention is paid to the construction of logic cascades and the choice of the element base.

The project simulates the operation of a step-down voltage converter under critical operating conditions using the Proteus software environment.

The results of the project can be used in process control systems for electron beam equipment, automated laboratory complexes, and engineering research related to the precise control of the environment in a vacuum.

Keywords: electronics, driver, proportional valve, electron beam technology.

ЗМІСТ

1	АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ	12
1.1	Типи газорозрядних гармат	12
1.2	Конструкція електронно-променевих гармат ВТР.....	14
1.3	Принцип роботи газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР ..	16
1.4	Типи пропорційних клапанів та їх характеристика	18
1.5	Вимоги до системи керування пропорційним клапаном.....	23
	Висновок до розділу.....	25
2	ОГЛЯД СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ ПРОПОРЦІЙНИМИ КЛАПАНАМИ.....	26
2.1	Загальні принципи керування пропорційними електромеханічними пристроями.....	26
2.2	Методи реалізації аналогового керування клапанами.....	27
2.3	Методи реалізації цифрового керування клапанами	30
2.4	Порівняння аналогового та цифрового методу регулювання	32
2.5	Методи та приклади використання операційних підсилювачів у керуванні клапанами	35
	Висновки до розділу	37
3	СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ	39
3.1	Розробка структурної схеми.....	39
3.2	Розробка принципової електричної схеми та вибір компонентної бази. 44	
3.2.1	Обґрунтування вибору перетворювача напруги.....	48
3.2.2	Обґрунтування вибору операційних підсилювачів	48
3.2.3	Вибір транзисторів	49

					<i>ДП. ДЕ11.18.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Розколуца О.М.			<i>Драйвер виконавчого пристрою.</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Тугай С.Б.					3	92
<i>Н. Контр.</i>		Батрак Л.М.			<i>«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-11</i>			
<i>Затверд.</i>		Тугай С.Б.						
					<i>Пояснювальна записка</i>			

3.2.4	Вибір діодів.....	50
3.2.5	Вибір резисторів.....	50
3.2.6	Вибір конденсаторів	51
3.2.7	Вибір котушок індуктивності	51
3.2.8	Вибір потенціометрів.....	51
3.3	Розрахунок схеми	52
3.3.1	Розрахунок споживання елементів схеми та драйвера виконавчого пристрою	52
3.3.2	Розрахунок теплового навантаження на транзисторі.....	55
	Висновок до розділу.....	57
4.	ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА	58
4.1	Обрання виду та матеріалів для виготовлення друкованої плати.....	58
4.2	Обрання класу точності	62
4.3	Вибір методу виготовлення друкованої плати	64
4.4	Виготовлення друкованої плати на ЧПУ станку.....	66
4.5	Монтаж компонентів на друковану плату	68
4.7	Конструкторсько-технологічні розрахунки.....	70
4.7.1	Розрахунок компонентів друкованої плати.....	70
4.7.2	Установлення мінімальної ширини провідникової доріжки при заданому падінні напруги на ньому	71
4.7.3	Обрахунок діаметра отвору для монтажу компонентів	72
4.7.4	Розрахунок параметрів контактної майданчика.....	72
4.7.5	Визначення мінімально допустимої ширини провідника.....	74
4.7.6	Обчислення мінімальної відстані, яка може бути між контактною площадкою і провідником.....	74
4.7.7	Визначення мінімально допустимої відстані між сусідніми краями провідників.....	75

					<i>ДП. ДЕ11.18.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Розколупа О.М.			<i>Драйвер виконавчого пристрою.</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Тугай С.Б.					3	92
<i>Н. Контр.</i>		Батрак Л.М.			<i>Пояснювальна записка</i>	<i>«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-11</i>		
<i>Затверд.</i>		Тугай С.Б.						

4.7.8 Розрахунок мінімальної відстані між двома контактними площадками	76
4.8 Проектування друкованої плати у програмному середовищі KiCad	77
4.9 Електричний розрахунок друкованої плати	80
4.9.1 Обчислення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику	81
4.9.2 Розрахунок потужності втрат односторонньої друкованої плати	81
4.9.3 Визначення значення ємності між двома провідниками, що знаходяться по сусідству і мають однакову ширину.....	82
4.9.4 Розрахунок величини взаємної індуктивності двох паралельних провідників, котрі мають однакову довжину	83
4.10 Розробка корпусу для пристрою	83
Висновок до розділу.....	85
5. МОДЕЛЮВАННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЧАСТИНИ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ, А САМЕ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ	86
5.1 Робота понижуючого перетворювача при стандартних умовах роботи ...	86
5.2 Робота перетворювача напруги при вилученні резисторів	87
5.3 Робота перетворювача при обриві діода Шотткі	89
Висновок до розділу.....	90
ВИСНОВКИ.....	91
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	92
Додаток А. Схема електрична структурна	
Додаток Б. Схема електрична принципова	
Додаток В. Друкована плата	
Додаток Г. Перелік елементів	
Додаток Д. Реферат	

					<i>ДП. ДЕ11.18.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.А</i>	<i>№ докум.№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		Розколупа О.М.			<i>Драйвер виконавчого пристрою.</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		Тугай С.Б.					3	92
<i>Н. Контр.</i>		Батрак Л.М.			<i>Пояснювальна записка</i>	<i>«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПП, гр. ДЕ-11</i>		
<i>Затверд.</i>		Тугай С.Б.						

ВСТУП

Сучасний етап розвитку науки і техніки супроводжується активним впровадженням новітніх електронних пристроїв та систем, які широко використовуються у промисловості, побуті, медицині, обороні та інших сферах. Електронно-променевої технології – це одна з найпопулярніших технологій у різних галузях виробництва. Завдяки цій технології забезпечується високоточна обробка матеріалів у вакуумному середовищі і це вимагає надзвичайно точного керування параметрами робочого середовища. У цьому контексті драйвери виконуючих пристроїв відіграють головну роль у забезпеченні стабільної роботи, відповідної реакції на керуючий сигнал.

Актуальність теми дипломного проекту зумовлена потребою у вдосконаленні драйвера виконавчого пристрою, який забезпечує плавне керування золотником електромагнітного клапана. З урахуванням вимог сучасних електронних систем, необхідно створювати надійні, енергоефективні та функціональні рішення.

Метою дипломного проекту є розробка драйвера виконавчого пристрою для керування пропорційним клапаном, який входить до складу системи керування параметрами робочого середовища до вакуумної камери, з урахуванням вимог до точності, плавності керування та стабільності роботи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз аналогічних технічних рішень;
- обґрунтувати вибір елементної бази та структури системи;
- розробити принципову та функціональну схему;
- змодельовати роботу частини системи;
- провести аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є система керування виконавчим механізмом у складі газорозрядної електронно-променевої гармати.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Предметом дослідження є схема драйвера керування пропорційним електромагнітним клапаном та алгоритм його функціонування у режимах плавного регулювання.

Практична значущість проекту полягає у можливості застосування розробленого рішення в автоматизованих вакуумних технологічних комплексах, зокрема в електронно-променевому обладнанні для металургії, 3D – друку, машинобудуванні, виробництві спеціальних матеріалів.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		11

1. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ

Газорозрядна електронно-променева гармата здобула широке застосування у безлічі технологічних галузей. Завдяки ній стали можливі такі технологічні процеси як плавлення матеріалів, електро-вакуумне зварювання товстостінних конструкцій, 3D – друк з металевого порошку, шляхом нанесення декількох шарів матеріалу. Актуальною проблемою лишається керування пропорційним клапаном гармати, адже присутні такі чинники впливу як залипання, електромагнітний гістерезис, тертя і вони значно впливають на швидкість та плавність керування клапаном. Характеристика має мати порівняно маленький гістерезис і при однакових сигналах струму поводити себе у тій, чи іншій мірі ідентично для полегшення керування всією системою загалом.

1.1 Типи газорозрядних гармат

Газорозрядна електронно-променева гармата є одним із ключових елементів вакуумно-плазмових технологічних пристроїв, що забезпечує генерацію та спрямування потоку електронів високої енергії для здійснення прецизійних обробок матеріалів. Основою її роботи є створення стабільного електронного пучка, який залежно від принципу формування класифікується на два основні типи: гармати з термоелектронною емісією, так звані термокатодні та гармати з електронною емісією, зумовленою газовим розрядом, по іншому – гармати з холодним катодом.

У термокатодних електронних гарматах електронний пучок формується за рахунок термоелектронної емісії — явища, що виникає при нагріванні катода до високих температур, унаслідок чого відбувається вивільнення електронів з металеві поверхні [1]. Катоди прямого і непрямого нагріву широко використовуються у таких пристроях, оскільки дозволяють отримати керований потік електронів із високою густиною. Водночас, значним недоліком

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

термокатодів є потреба в стабільному тепловому режимі, що створює вимоги до складності конструкції, систем охолодження та джерел живлення [1].

На відміну від термокатодів, гармати з холодним катодом формують електронний потік за допомогою тліючого розряду у газовому середовищі. Під впливом високої напруги утворюється плазма, в якій позитивні іони бомбардують поверхню катода, викликаючи вторинну електронно-іонну емісію [2]. Цей метод не вимагає підігріву катода, що істотно підвищує термічну стабільність гармати і знижує енергоспоживання, що є значною перевагою в умовах сучасних високотехнологічних виробництв [2].

Завдяки дослідженням оптимальних режимів роботи електронно-променевих гармат стала можливою реалізація широкого спектра електронно-променевих технологій у промисловості. Ефективне функціонування таких гармат вимагає виконання низки технічних умов. Зокрема, матеріали і конструктивні елементи повинні демонструвати високу стійкість до впливу вакууму, високих температур, іонного бомбардування та ерозійних процесів [3]. Електронно-оптична система гармати має забезпечувати чітке фокусування та стабільність параметрів пучка, при цьому запобігаючи деградації емісійної поверхні катода. Важливим також є конструктивне розділення зон формування та використання пучка з метою забезпечення вакуумної ізоляції та електричної стабільності [3].

У плазмових гармат з холодними катодами, електронний пучок формується без підігріву, що значно спрощує конструкцію та підвищує експлуатаційні характеристики пристрою в цілому [2]. У таких гарматах інтенсивність електронного потоку регулюється плазмовими параметрами, що дозволяє гнучко адаптувати їх до специфіки оброблюваних матеріалів.

На рис.1.1 зображено газорозрядні електронно-променеві гармати високовольтного тліючого розряду, розроблені ПРАТ «НВО» Червона Хвиля ».

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



Рис.1.1 Газорозрядні електронно-променеві гармати ВТР-100 (100 кВт), ВТР-300 (300 кВт) і ВТР-450 (450 кВт) відповідно

1.2 Конструкція електронно-променевих гармат ВТР

Конструкція газорозрядної електронно-променевої гармати традиційно включає декілька основних функціональних вузлів. До першочергових елементів відноситься катодний вузол, який виконує роль джерела електронів. У системах високовольтного тліючого розряду катод зазвичай є холодним, виготовленим із матеріалів з високою стійкістю до іонного бомбардування. Застосування холодного катода дозволяє уникнути проблем, пов'язаних із перегрівом конструкції, та покращити стабільність енергетичних характеристик пучка електронів.

Другим ключовим елементом є анодний вузол, який конструктивно анод може бути виконаний у вигляді сітки або твердого металевого електрода, через який електрони спрямовуються далі в електронно-оптичну систему. Напряга між анодом і катодом створює електричне поле, необхідне для підтримання тліючого розряду та формування пучка.

Для забезпечення електричної ізоляції між високовольтними компонентами використовується ізолятор, виготовлений із діелектричних матеріалів з високою пробивною міцністю. Розміщення ізолятора має бути

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

оптимальним, щоб мінімізувати ймовірність виникнення паразитних розрядів або пробоїв при тривалому функціонуванні в умовах вакууму.

Особливу роль відіграє променепровід, який відповідає за формування та корекцію траєкторії руху електронного пучка. Його конструкція зазвичай включає дві фокусувальні котушки, розміщені послідовно вздовж осі гармати, а також одну котушку відхилення, яка дозволяє змінювати напрям пучка. Завдяки цьому можна точно керувати положенням і формою пучка в зоні обробки. Магнітні поля, створювані котушками, дозволяють сконцентрувати електрони в щільний пучок та частково компенсувати розбіжність, спричинену кулонівським відштовхуванням заряджених частинок.

У конструкції гармат тліючого розряду важливо враховувати ряд технічних вимог, пов'язаних із тепловою стійкістю матеріалів, електричною надійністю ізоляції та ефективністю відкачування робочого простору. Зокрема, область формування електронного пучка повинна бути відділена від області його використання по тиску газу, що дозволяє зменшити вплив газів, що виділяються в результаті технологічних процесів. Також важливим є застосування стабілізаторів струму та напруги, які забезпечують стійку роботу гармати протягом тривалого часу.

Сучасні розробки в галузі електронних гармат орієнтовані на підвищення точності керування параметрами пучка, зменшення розмірів приладів та підвищення їх надійності. У зв'язку з цим активно досліджуються нові матеріали для катодів і ізоляторів, а також впроваджуються цифрові системи керування, що дозволяють в режимі реального часу змінювати параметри роботи електронної гармати в залежності від умов технологічного процесу [4].

На рис.1.2 зображено конструктивна схеми газорозрядної електронно-променевої гармати серії ВТР.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

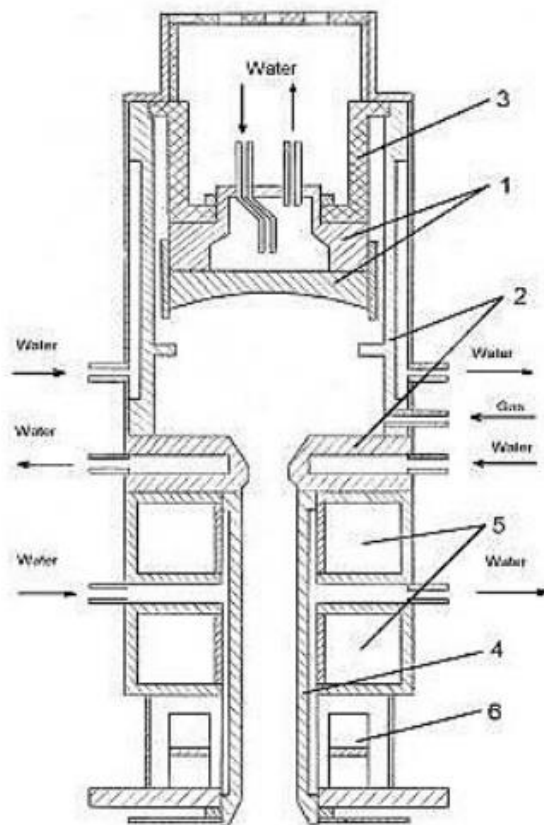


Рис.1.2 Конструктивна схеми газорозрядної електронно-променевої гармати серії ВТР

- 1 – катодний вузол;
- 2– анодний вузол;
- 3 – ізолятор;
- 4 – променепровід;
- 5 – фокусуючі котушки;
- 6 – котушка відхилення.

1.3 Принцип роботи газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР

Газорозрядні електронно-променеві гармати, що працюють на принципі високовольтного тліючого розряду, є важливим елементом сучасних електронно-променевих технологій. Основою їх роботи є самостійний електричний розряд у газовому середовищі, який виникає за наявності напруги між катодом та анодом і низького тиску в робочій камері. За таких умов електрони, що прискорюються полем, зіштовхуються з атомами газу,

									Арк.
									16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

викликаючи іонізацію і підтримуючи тим самим розряд [5].

На відміну від дугового розряду, тліючий режим характеризується нижчим струмом та вищим потенціалом між електродами, а також стабільнішою і контрольованішою поведінкою. Розрядна зона у тліючому режимі структурована на кілька областей з різною яскравістю, що свідчить про неоднорідність розподілу електричного поля. Найбільше падіння напруги спостерігається поблизу катода, де формується зона так званого катодного падіння потенціалу — саме тут прискорюються позитивні іони, які в подальшому відіграють ключову роль у генерації вторинних електронів [5].

Під час запуску гармати в її розрядну камеру подається робоча газова суміш, зазвичай на основі водню з домішками кисню або інертних газів, у строго контрольованій пропорції. За наявності високовольтного поля відбувається утворення плазми, що локалізується у просторі між катодом і анодом. Позитивні іони з плазми бомбардують поверхню холодного катода, вивільняючи електрони за механізмом вторинної електронної емісії [6].

Сформовані електрони прискорюються тим самим електричним полем і направляються через анодний отвір, утворюючи щільний електронний пучок. Його просторові характеристики регулюються за допомогою магнітної фокусувальної системи. Перша фокусувальна котушка формує електронний промінь циліндричної форми, завдяки чому він з мінімальними втратами проходить через вакуумний канал — променепровід — у технологічну камеру [5].

У подальшому за допомогою другої фокусувальної котушки промінь концентрується на необхідній ділянці поверхні матеріалу, який обробляється. Програмована система відхилення електронного променя забезпечує його точне переміщення у площині обробки, що дозволяє реалізовувати складні технологічні схеми плавлення або нагрівання матеріалу [7].

Стабільність роботи гармати залежить від точного регулювання струму електронного пучка. Цей параметр пов'язаний із густиною плазми, що формується в розрядній камері, а отже — із тиском робочого газу. Для цього в

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

конструкції гармати передбачено маломоментну систему напуску газу, в якій використовується електромагнітний регулятор витрати. Завдяки швидкому реагуванню та високій точності такого регулятора забезпечується стабілізація електронного струму й контроль основних режимів роботи гармати [6].

Отже, принцип дії газорозрядної електронно-променевої гармати базується на складних фізичних процесах: іонізації газу, вторинній емісії, прискоренні електронів та магнітному фокусуванні пучка. Ефективна реалізація цього принципу забезпечується точним конструктивним виконанням усіх вузлів гармати, а також узгодженою роботою електронної системи керування. Завдяки цьому такі гармати знаходять широке застосування в електронно-променевому плавленні, зварюванні та термічній обробці матеріалів [8].

1.4 Типи пропорційних клапанів та їх характеристика

Пропорційні клапани є основою систем автоматизації регулювання потоків газів та рідин. Вони дозволяють плавно та поступово регулювати надходження потоків рідин чи газів до робочого середовища, тобто вакуумної камери, у залежності від вхідного електричного сигналу. У залежності від наявного у пропорційного клапана типу приводу, способу керування, сфери використання є декілька типів пропорційних клапанів, які використовуються у промисловості, вони мають між собою як конструктивну різницю. Так і різницю у характеристиках роботи.

Найпоширенішим типом пропорційних клапанів є електромагнітний пропорційний клапан. Принцип його роботи полягає в наступному, всередині клапана є золотник, або ж голка, яка переміщується за допомогою електромагнітного соленоїда, пропорційно зміщуючи прохідний перетин.

Привілеєм цих типів клапанів є простота управління, висока швидкодія (100 Гц), гарні динамічні характеристики та компактні розміри клапана. Такі клапани особливо ефективні у вакуумних системах, де потрібна точна подача

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

газу чи підтримання тиску [9]. На рис.1.3 зображено конструкцію електромагнітного клапана.

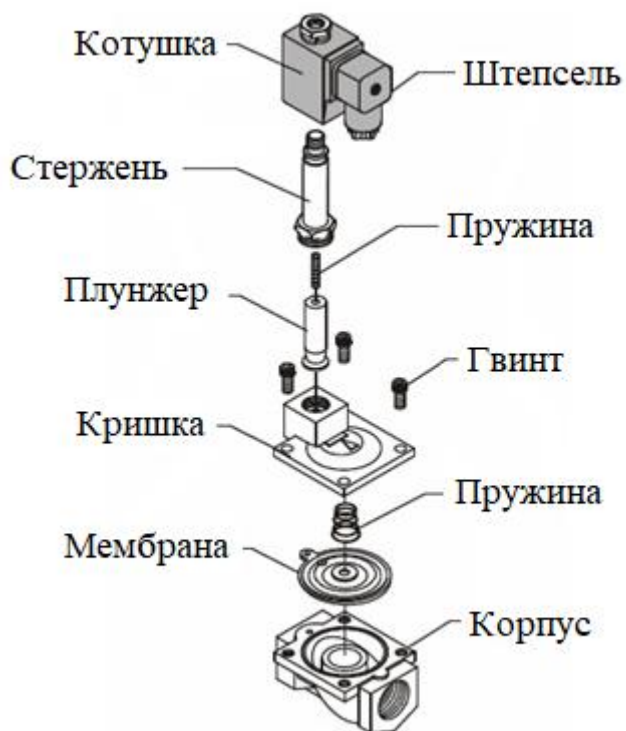


Рис.1.3 Конструкція електромагнітного пропорційного клапана

Наступним по поширеності типом є п'єзоелектричний пропорційний клапан. Такі клапани використовують зміну положення п'єзоелементів, тобто деформацію цих елементів, для зміни положення клапанного органу. П'єзоелектричні клапани вирізняються своєю малою інерційністю та високою точністю керування, це робить можливим їх використання у системах для яких важливим є мікродозування газів, до прикладу у приладобудуванні та макроелектроніці. Основними перевагами таких клапанів є довговічність, адже у них відсутній механічний знос, низьке енергоспоживання та тривалий термін використання готового клапана. Проте ці клапани зазвичай дорожчі у виробництві та менш потужні за електромагнітні [10]. На рис.1.4 зображено зовнішній вигляд п'єзоелектричного пропорційного клапана.

						ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата			19



Рис.1.4 П'єзоелектричний пропорційний клапан

Окрему увагу варто звернути на гідравлічні та пневматичні пропорційні клапани. У цих клапанах керуючий сигнал подається на допоміжний виконавчий механізм. Гідравлічна та пневматичні пропорційні клапани використовуються з перевагою у громіздких потужних установках на промислових підприємствах, де потрібне регулювання великих втрат для робочого середовища. Стабільна робота у важких умовах зробила ці клапани незамінними для подачі охолодження, або ж інертного газу у електронно-променевої камери. За даними навчального посібника «Пневмогідропривід і автоматизація» [11], ці клапани забезпечують точність регулювання в межах 2–3 %, але мають нижчу швидкодію. На рис.1.5 зображено пневмопривідний пропорційний клапан.



Рис.1.5 Пневмопривідний пропорційний клапан

									Арк.
									20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Порівняльна характеристика пропорційних клапанів також може включати такі параметри. Як час реакції, максимальна витрата, чутливість, лінійність регулювання та енергоспоживання.

У табл. 1.1 наведені порівняльні характеристики основних типів клапанів.

Таблиця 1.1

Порівняльні характеристики основних видів клапанів

Тип клапан	Час реакції	Чутливість	Споживання	Вартість	Точність
Електромагнітний	~5-20с	Середня	Середнє	Низька	Висока
П'єзоелектричний	<1с	Висока	Дуже низьке	Висока	Дуже висока
Пневмогідравлічний	~50мс	Низька	Високе	Середня	Середня

Стосовно швидкодії, то електромагнітний пропорційний клапан має час реакції близько 5-20с. Це дозволяє вчасно реагувати на зміну вхідного сигнал і це достатньо для більшості технологічних процесів, регулювання тиску у вакуумній камері підпадає під такий процес. П'єзоклапани мають найменший час реакції, близько 1с. Така характеристика важлива при регулюванні потоком газу, або ж при імпульсному дозуванні газів. Значно нижчу швидкодію мають пневмогідравлічні клапани, близько 50мс, це обмежує їх застосування у системах, де потрібна швидка реакція на зміну тиску, або втрати.

Точність регулювання також різняться у кожного клапана по своєму. П'єзоелектричні клапани забезпечують найвищу точність, бо мають безтертевий принцип дії на надзвичайно високих чутливостях. Вони здатні регулювати потік з точністю до мікролітрів на хвилину. Електромагнітні клапани теж хваляться високою точністю керування, але мають гістерезис, який через механічні зазори та інерційність золотникового механізму роблять його трохи повільнішим за п'єзоелектричні клапани. Що стосується пневмогідравлічних клапанів, вони мають середню точність керування і чутливість до зміни навколишнього

						ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
							21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

середовища, чутливі до таких параметрів, як температура, коливання тиску у магістралі та інші, а це у свою чергу потребує прецизійного налаштування ПІД-регулятора.

Лінійність електромагнітного клапана можна охарактеризувати, як гарну лінійність, адже особливо при використанні вбудованих датчиків положення, лінійність стає ще краща. П'єзоелектричні клапани забезпечують майже ідеальну лінійність у робочому діапазоні, проте для таких клапанів необхідне точно електричне керування, бо хід роботи у них короткий. При крайніх положеннях ходу, пневмогідравлічні клапани мають чітку нелінійність і це робить процес реалізації точної моделі керування без зворотного зв'язку, складною.

Споживання різних типів клапанів теж характеризується по різному. П'єзоелектричні клапани мають практично нульове споживання у статичному стані та не потребують постійного струму. Електромагнітні клапани, при тривалому утриманні у відкритому стані споживають велику кількість енергії, але у закритому стані споживають менше енергії. Пневмогідравлічні клапани потребують постійного живлення керуючих соленоїдів, що приводить до найбільшого енергоспоживання серед розглянутих типів клапанів.

Щодо надійності кожного з типів, то електромагнітний клапан має рухоми елементи, пружини, які з часом використання втрачають еластичність, але взагалі ресурс системи лишається високим, адже такий вид клапанів може працювати сотні тисяч циклів. П'єзоелектричні клапани не мають механічних частин, які рухаються, тому вони мають змогу працювати дуже багато циклів підряд. Пневмогідравлічні клапани найбільш надійні та витривалі, але потребують постійного обслуговування, якщо знаходяться не в чистих середовищах.

Детально розглянувши всі типи клапанів, для даної роботи буде обрано клапан електромагнітного типу, адже він надійний, витривалий та забезпечить стабільне плавне керування робочим середовищем у вакуумній камері.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.5 Вимоги до системи керування пропорційним клапаном

До систем керування пропорційним клапаном газорозрядної електронно-променевої гармати ставляться певні вимоги, яким вона має задовільняти, адже ці системи розраховані на роботу на серйозних конструкторських підприємствах, де важлива точність та стабільність роботи систем керування.

Однією з основних вимог до драйвера виконавчого пристрою є забезпечення лінійності перехідної характеристики. Лінійність є необхідною умовою для побудови систем точного керування, оскільки вона дозволяє передбачувано реагувати на зміни сигналу, зменшуючи похибки та забезпечуючи стабільність режимів роботи [12]. Ця властивість допомагає системі працювати стабільно, особливо при значних навантаженнях системи. Лінійність у системі досягається за рахунок завдяки застосуванню клапанів з певною конструкцією та відповідним електронним устаткуванням для керування, зокрема можна застосувати ШІМ-модуляцію, і це дозволить точно контролювати положення клапана, забезпечуючи лінійну відповідь системи. Наприклад, при використанні ШІМ-сигналу можливо змінювати середнє значення напруги або струму на котушці електромагніта без суттєвого зростання втрат потужності, що забезпечує точне позиціонування золотника клапана [13].

Наступним завданням пропорційного клапана у системі керування ГЕПГ є забезпечення відкриття клапана з мінімально можливим значенням сигналу керування. Ця вимога дозволяє системі мати певну чутливість до змін вхідного сигналу, що є дуже значимим для систем з високими вимогами до точності регулювання. На більшості промислових підприємств треба, щоб клапан реагував на малі зміни сигналу у межах 4 - 6% від максимального значення, це дозволяє збільшити точність та чутливість системи, особливо у випадках, коли вона працює при малих потоках газу. Така чутливість досягається шляхом вибору конструкцій з низьким механічним опором руху, застосуванням прецизійних напрямних і зменшенням маси рухомих частин [12], [14].

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Обмеження максимального струму натікача – це наступна вимога до пропорційного клапана. Вона важлива, адже саме завдяки ній, система вберігається від перегріву та забезпечує надійну роботу системи. Ця функція може бути реалізована за допомогою електронних обмежувачів струму, або ж програмного забезпечення, яке проконтролює рівень сигналу струму, який подається на електромагніт і вкаже сигналу наступні дії. Для запобігання цьому використовуються обмежувачі струму або електронні контролери, які реалізують плавний розгін та підтримку струму у встановлених межах [15].

Надійне запирання клапана потрібне для втримання витікання та забезпечення безпечної роботи системи. Цього можна досягти використанням пружинного механізму, який автоматично закриває клапан, якщо сигнал, який керує цим всім процесом – відсутній. Також є можливість забезпечити гарне запирання клапана використанням ущільнювальних елементів високої якості. Ці високоякісні ущільнювальні матеріали, що забезпечують герметичність протягом тривалого терміну експлуатації навіть при значних температурних коливаннях [13], [16].

Зниження ефекту залипання, це наступна вимога, яка має важливий вплив на роботу всієї системи. Ефект залипання, або як його по іншому називають стікш, може спровокувати неточності при керуванні системою та зниження ефективності роботи всієї установки. Для мінімізації цього ефекту треба гарно змастити всі рухомі частини клапана, використовувати матеріали, що мають низький коефіцієнт тертя та запобігати потраплянню сторонніх часточок у систему. Також важливо проводити регулярне технічне обслуговування та очищення клапана для запобігання накопиченню забруднень. Крім того, зниження залипання досягається шляхом попереднього переміщення золотника на малу амплітуду, яке іноді реалізується на рівні ПЗ керуючого контролера [12], [16].

Підсумовуючи, можна сказати, що вимоги до таких систем дуже високі та потребують точного виконання, адже вони безпосередньо впливають на

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

результат роботи всієї системи. Лінійність перехідної характеристики у даному проєкті буде забезпечена при допомозі електронного керування. Відпертя клапана з мінімального значення сигналу допоможе системі швидко реагувати на зміни вхідного сигналу струму і точно керувати потоком, який потрапляє у робоче середовище. Зниження ефекту залипання у даній розробці буде виконано за допомогою підмішування сигналу зі змінною частотою до основного постійного сигналу, аби золотник клапана не залипав і стабільно реагував на вказівки.

Висновок до розділу

У першому розділі проведено аналіз конструкції, класифікації, принципу дії та основних характеристик електронно-променевих гармат з газорозрядним збудженням. Розглянуто конструктивні елементи гармати, фізичні принципи формування електронного пучка, а також вимоги до стабільності його параметрів. Розглянуто гармати із холодним катодом, які працюють за рахунок тліючого розряду, що дозволяє зменшити нагрів і підвищити надійність системи.

Також було проаналізовано типи пропорційних клапанів, які використовуються для керування подачею газу. Найбільш доцільним для даної системи визнано електромагнітний клапан завдяки його швидкодії та керованості. Сформульовано вимоги до системи керування: лінійність відгуку, запирання при мінімальному сигналі, захист від перенавантаження та зниження ефекту залипання. Ці положення стали основою для подальшого технічного проектування пристрою.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2. ОГЛЯД СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ ПРОПОРЦІЙНИМИ КЛАПАНАМИ

2.1 Загальні принципи керування пропорційними електромеханічними пристроями

Пропорційні електромеханічні клапани займають ключові позиції у сучасних системах автоматизації, де потрібне точне та безперервне регулювання таких величин як тиску, положення, або сили. Вони здатні забезпечувати плавне регулювання вихідного параметра у відповідності до керуючого сигналу, це їх основна відмінність від релейних, або ж дискретних виконавчих механізмів. Керуючий сигнал у таких систем – це аналоговий електричний сигнал з напругою від 0 до 10В, або струмом від 4 до 20 мА. Керування такими пристроями бере за основу безперервне перетворення електричного сигналу на механічний рух, у такому керування головну роль відіграють електромагніти, двигуни постійного струму та сервоприводи, також можуть бути й інші актуатори [17].

Найголовнішим компонентом більшості пропорційних електромеханічних систем є електропривід, який виконує функцію привода виконавчого органа. Те, що електропривід пропорційний, означає, що зміна вхідного електричного сигналу тягне за собою зміну фізичного виходу пристрою, як приклад, відкриття клапана на певний відсоток. Такий підхід потребує високої лінійності системи та стабільності характеристик приводу, якщо змінюється навантаження та температура. Тому сучасні системи керування зазвичай використовують замкнені контури зворотного зв'язку, які дозволяють забезпечити точність і швидкодію, а також компенсувати нелінійності або збурення в системі [18].

Вагому роль у побудові систем керування пропорційним клапаном відіграють цифрові контролери, так як мікропроцесори, програмовані логічні мікроконтролери, або сигнальні процесори. Останні реалізуються алгоритмами

					ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

ПД-регулювання. Адаптація до зміни робочого середовища, корекція помилки між заданим значенням і фактичним забезпечується саме ПД-регулюванням. У високоточних галузях, у деяких окремих випадках, таких як електронно-променева обробка, або мікромеханіка, використовуються моделі керування з передбаченням, де враховується динаміка системи та її передісторія. Це дозволяє досягати більшої точності та зменшувати інерційні ефекти [19].

Якщо розглядати контекст енергетичної ефективності та зниження тепловиділення, то найвагомішою є оптимізація режимів роботи електроприводів. Це може бути зроблено з використанням ШІМ-модуляції сигналів живлення і це дозволяє змінювати середню потужність при збереженні стабільного керуючого ефекту. Для забезпечення розширення функціональності системи та підвищення надійності роботи всієї системи, додаються сенсорні технології, датчики положення, тиску, або сили. Дані з датчиків дозволяють реалізовувати не лише пряме керування, але й діагностику стану пристрою в режимі реального часу, що є важливим елементом концепції промислового Інтернету речей (IIoT) [20].

Як висновок, можна зрозуміти, що керування пропорційними електромеханічними пристроями базується на тісній інтеграції модулів механіки, електроніки та програмного забезпечення. Основні критерії, які висуваються до таких систем це стабільність роботи, адаптивність та швидка реакція на керуючий сигнал.

2.2 Методи реалізації аналогового керування клапанами

Аналогові схеми керування пропорційними клапанами є одними з найзатребуваніших у галузі автоматизації, де потрібна безперервна зміна положення виконавчих механізмів залежно від керуючого сигналу. Принцип дії аналогового керування полягає в тому, що формується керуючий сигнал на основі аналогового сигналу, переважно від 4 до 20 мА, або сигналу напруги від

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

0 до 10 В, що передається від контролера, або від іншого джерела керуючого сигналу. Така методика забезпечує плавне та пропорційне регулювання положення клапана, а це критично важливо для підтримання точних технологічних параметрів у складних динамічних системах. Основою аналогового керування є перетворення механічного руху електромагнітного, або електромеханічного актуатора, який фізично міняє положення золотника, або голки у клапані.

Класичній схемі реалізації аналогового керування зазвичай притаманне застосування підсилювального каскаду, який забезпечує необхідний рівень потужності для керування виконавчим об'єктом. Зазвичай застосовується ШІМ-модуляція для стабілізації живлення актуатора, при зміні сигналу керування. Цифрові контролери все частіше використовуються, як джерела аналогового сигналу, незважаючи на аналогову природу керування, оскільки більшість сучасних мікроконтролерів мають вбудовані цифро-аналогові перетворювачі. Таке об'єднання у результаті дає високу точність регулювання навіть у тих системах, де не застосовується повноцінний цифровий зворотній зв'язок. Крім того, аналогове керування має перевагу у простоті реалізації, низькій інерційності та високій швидкодії, що робить його придатним для систем, де потрібне миттєве реагування на зміну керуючого сигналу [21]. На рис.2.1 зображено зовнішній вигляд блоку керування пропорційним клапаном гідравлічної системи [55].

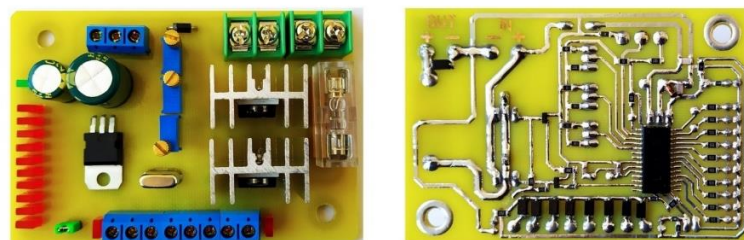


Рис.2.1 Блок керування пропорційним клапаном гідравлічної системи

									Арк.
									28
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Одним з нагальних питань аналогового керування є потреба у калібруванні систем, яка врахує нелінійність актуатора, наявний гістерезис при початку роботи та зміни температури навколишнього середовища і напруги живлення. Для зменшення цих впливів, використовуються додаткові компенсаційні схеми, або системи стабілізації струму, які дозволяють зменшити вплив зовнішніх чинників на точність керування у деяких випадках використовується метод формування нового керуючого сигналу. Який наближений до заданого значення. Хоча така реалізація є проміжною між аналоговою і цифровою схемами, вона зберігає простоту аналогового підходу при підвищенні точності та надійності системи загалом [22].

Якщо поглянути з практичної сторони, то методи аналогового керування можуть бути реалізовані з використанням готових промислових модулів, так і на основі спроектованих електронних схем. Перевагами готових модулів можна назвати гарантована сумісність із виконавчим механізмом, стабільна робота в умовах промислових перешкод та влаштовані функції захисту від перенапруги, або короткого замикання. У той самий час, розробка власної системи на базі операційних підсилювачів, дозволяє зробити цю систему унікальною та підлаштувати під певні випадки використання, необхідні, для прикладу, саме при використанні у випадках роботи з низьким тиском, де потрібна висока чутливість керування, або малими втратами. Особливу актуальність набуває така гнучкість при створенні вузькоспеціалізованих електронно-променевих систем, де клапани можуть регулювати витік охолоджувальної рідини або контроль атмосфери всередині вакуумної камери [23].

В умовах новітнього виробництва дедалі більшої популярності набувають комбіновані підходи, де аналогове керування використовується у поєднанні з цифровим контролем. До прикладу. Аналоговий модуль формує основний регуляторний вплив, а цифровий блок проводить діагностику, самоналаштування та моніторинг роботи клапана. Завдячуючи такому підходу, можна легко інтегрувати швидкодію аналогової системи у цифрову та

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

автоматизувати процес керування.

2.3 Методи реалізації цифрового керування клапанами

Універсальним та сучасним є цифрове керування автоматизованими системами регулювання. Воно дозволяє досягти високої адаптивності. Точності та гнучкості керування. Порівнюючи цей метод з аналоговими системами, цифрове керування базується на застосування мікропроцесорної техніки, програмованих логічних контролерів, цифрових сигналових процесорів та вбудованих систем, які забезпечують обчислення, логіку дій, прийняття рішень та адаптацію до змін середовища у режимі реального часу. Основною перевагою цифрового підходу є можливість реалізації складних алгоритмів регулювання, таких як ПД, нечітка логіка, адаптивне або предиктивне керування, а також інтеграція керованих клапанів у структури розподілених або мережових систем автоматизації [24]. На фото 2.2 зображено цифровий блок керування пропорційним клапаном гідравлічної системи [56].

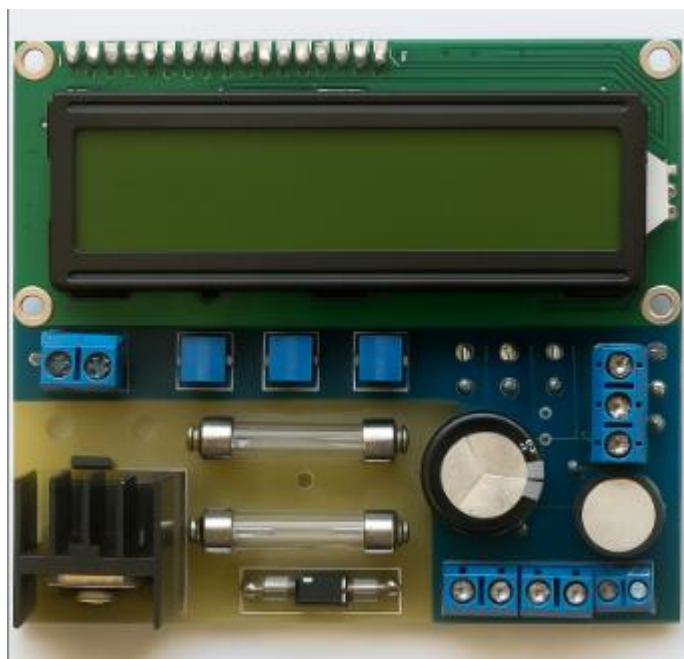


Рис.2.2 Цифровий блок управління пропорційним клапаном гідравлічної системи

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Робота цифрового керування клапанами передбачає формування дискретного керуючого сигналу на основі математичної моделі об'єкта керування, де враховується зворотній зв'язок, який може бути реалізований за допомогою цифрових датчиків положення тиску, витрати чи температури. Отримані дані оцифровуються, обробляються у цифровому процесорі та на основі закладених у програму алгоритмів перетворюються на певний сигнал керування, який передається на цифро-аналоговий перетворювач і після цього на драйвер виконавчого механізму. Таким чином, цифрове керування включає повний цикл – від збору вхідної інформації до формування вихідного впливу. Це забезпечує більш високу стабільність системи, здатність до самодіагностики, реєстрації параметрів, виявлення відхилень та навіть прогнозування відмов на основі аналізу даних [25].

У залежності від конкретного застосування, цифрове керування можна організувати, як у централізованій системі, так і децентралізованій архітектурі. У централізованих системах вся обробка сигналів і прийняття основних рішень приймаються у центральному контролері, який керує всіма основними процесами та великою кількістю виконавчих органів, включаючи пропорційний клапан. Децентралізовані системи передбачають використання інтелектуальних модулів безпосередньо на місці встановлення клапана, тобто такі модулі мають власні мікроконтролери, які мають можливість виконувати алгоритми керування автономно, обмінюючись лише головною інформацією з центральною системою. Подібна архітектура підвищує швидкодію, знижує навантаження на центральний процесор та забезпечує більшу надійність завдяки локальній обробці аварійних ситуацій [26].

Наступним важливим аспектом цифрових систем керування є властивість реалізації функцій автоматичної ідентифікації виконавчих пристроїв, віддалене налаштування параметрів, оновлення програмного забезпечення та діагностика системи через інтерфейси типу RS-485, CAN, Modbus, PROFIBUS або Ethernet. Ця властивість значно розширює спектр функціональності керованих клапанів

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

та дозволяє інтегрувати їх у складні системи промисловими об'єктами. Цифрові інтерфейси також дають можливість передавати не тільки керуючі команди, а й великі обсяги технологічних параметрів, які можна використовувати для побудови систем моніторингу, віддаленого обслуговування та оптимізації процесів.

Практична реалізація цифрового управління клапанами представляє з себе розробку і налаштування прошивки мікроконтролера і проектування електричних схем із цифровими входами, виходами, захистами та інтерфейсними модулями. Для цієї реалізації можна обрати такі мікроконтролери як STM32, AVR або ESP3, вони популярні через свою вартість, функціонал та потужність роботи. Завдяки ним можна початково створити невеличкий проект і потім масштабувати у стартап. Для виконання складніших систем, зокрема для високоточних електронно-променевиx комплексів, використовують ПЛК середнього, або високого класу, які дозволяють масштабувати керування, зберігати та обробляти дані, керувати кількома виконавчими механізмами одночасно.

2.4 Порівняння аналогового та цифрового методу регулювання

Керування виконавчими механізмами, зокрема пропорційними клапанами, може здійснюватись як аналоговими, так і цифровими способами. Кожен з цих підходів має як ряд переваг, так і ряд недоліків. А для того, аби обрати валідний підхід, потрібно звернути увагу на технічні характеристики, економічні, експлуатаційні вимоги до конкретної системи. Протягом довгого часу аналогове керування користувалось високою популярністю завдяки своїй простоті, відносно низькій вартості елементної бази, та високій швидкодії. Такі системи реалізуються на основі подання неперервного електричного сигналу на виконавчий пристрій і це дозволяє плавно змінювати його положення, або режим роботи. Це забезпечує мінімальні затримки в системі та простоту реалізації

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

базових алгоритмів, таких як пропорційне чи інтегральне регулювання [27].

Але аналоговий підхід обмежений гнучкістю та практично не дозволяє проводити складний аналіз та адаптацію до змін зовнішніх умов. Ти більше, аналогові сигнали зазнають спотворення під впливом шумів, температурних коливань, та старіння елементів схеми, а це все знижує довготривалу точність системи. Також обмеження становлять складність реалізації архівування даних, самодіагностика та віддалене керування. Але, як перевага аналогового управління – це простота виконання блоку керування, стабільність та надійність роботи, для систем де не потрібні вибагливі вимоги до динаміки та функціональності. Сучасні промислові процеси все дедалі частіше вимагають цифрових підходів.

Цифрові підходи до керування, забезпечують суттєво вищу точність, повторюваність та стабільність системи, завдячуючи використанню дискретних сигналів, які нечутливі до більшості з аналогових завад. При цифровому керування сигнал формується мікроконтролером, або програмованим логічним контролером, він забезпечує виконання складних алгоритмів з врахуванням множинних змінних, зворотного зв'язку та інших умов. Такий підхід дозволяє впроваджувати адаптивне регулювання, предиктивні моделі або нечітку логіку, а також інтегрувати систему в локальні та глобальні мережі управління виробництвом [28]. На рис.2.3 зображено порівняння аналогового та цифрового методів управління.

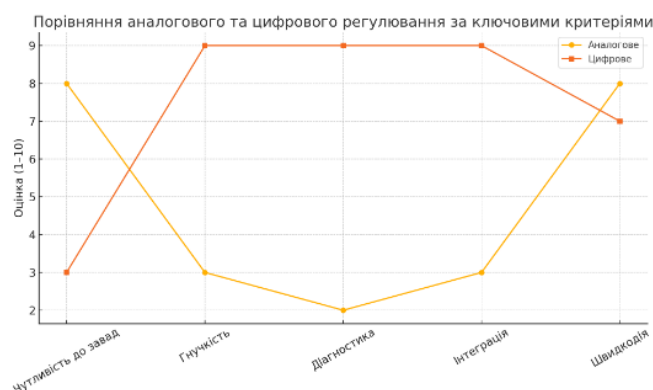


Рис.2.3 Графік порівняння аналогового та цифрового методів управління

									Арк.
									33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

На противагу аналоговим системам, цифрові дають змогу гнучко керувати параметрами регулювання без фізичного втручання в електроніку, а використовуючи програмне налаштування. Цей підхід скорочує час і ресурси на оновлення, чи адаптацію систем до нових умов. До того ж, цифрові контролери мають вбудовані засоби реєстрації аварій, статистики роботи, логування подій та віддаленого моніторингу, що особливо важливо у критичних та відповідальних об'єктах, наприклад, у медичному обладнанні, хімічній промисловості чи енергетиці [29].

Сучасні цифрові системи намагаються не витіснити а поліпшити та удосконалити роботу аналогового керування. Замінити та доповнити вже існуючий функціонал, де цього потребують. Наприклад, аналогові сигнали можуть використовуватись, як проміжні міжконтурні сигнали у гібридних системах, тоді, як цифрове керування приймає роль логіки роботи. Впровадження цифро-аналогових і аналого-цифрових перетворювачів забезпечує взаємодію обох типів сигналів у єдиній архітектурі, це допомагає будувати адаптивні, енергоефективні та масштабні системи для керування. У табл.2.1 зроблено порівняння аналогового та цифрового методу керування.

Таблиця 2.1

Порівняння аналогового та цифрового методу регулювання.

Критерій	Аналогове керування	Цифрове керування
Тип сигналу	Аналоговий	Цифровий
Чутливість до завад	Висока	Низька
Гнучкість налаштування	Низька	Висока
Можливість діагностики	Обмежена	Розширена
Інтеграція з іншими системами	Складна	Легка
Швидкодія	Висока	Середня/висока
Вартість впровадження	Низька	Висока

2.5 Методи та приклади використання операційних підсилювачів у керуванні клапанами

Операційні підсилювачі – це надзвичайно важлива складова аналогової електроніки і широко використовується у схемах керування, зокрема також і при керуванні пропорційними клапанами. Маючи такі важливі властивості, як коефіцієнт підсилення, широкий діапазон частот, мала споживана потужність та гнучка конфігурація – вони набули популярності та стали універсальними елементами для створення різних функціональних вузлів у сигнальних ланцюгах регулювання.

Щодо систем керування клапанами, ОП найчастіше використовують для формування керуючого сигналу, стабілізації струму та напруги, або ж для фільтрації сигналів, їх інтегрування та диференціювання. Вагомою перевагою операційних підсилювачів можна назвати можливість побудови високоточних підсилювачів струму, або напруги для керування обмоткою електромагнітного виконавчого механізму, елемента клапана. Наприклад, використання інвертувального підсилювача з негативним зворотним зв'язком дозволяє забезпечити стабільну амплітуду вихідного сигналу незалежно від змін навантаження, що критично для точного регулювання положення клапана [30].

Найпоширенішим методом, який застосовується при використанні ОП у таких системах створення аналогових підсилювачів струму з обмеженням, які захищають обмотку клапана від перевищення допустимого струму. Таким самим чином реалізуються струмові генератори на основі ОП, які забезпечують стабільне живлення для клапанів з пропорційним керуванням. Також ОП підсилювачі можуть використовуватись, як елементи порівняння сигналів – так звані компаратори, вони дозволяють створити порогову логіку, або автоматичне перемикання між режимами роботи. Наприклад між відкритим та закритим положенням клапана. Такий підхід особливо ефективний у спрощених аналогових системах без застосування мікроконтролерів [30].

					ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Промислові аналогові регулятори часто застосовують інтегруючі, або пропорційно-інтегруючі схеми на базі ОП. Вони використовуються для виконання аналогових пропорційного-інтеграційних регуляторів, або ПІД-регуляторів. Це забезпечує стійке регулювання тиску у системах з використанням електромагнітних, або гідравлічних клапанів. До прикладу, у системах регулювання тиску палива в газотурбінних двигунах, що мають високі вимоги до точності, застосовуються каскадні операційні підсилювачі з фільтрацією шумів та компенсацією нестабільності вхідного сигналу [32]. На рис.2.4 зображено програмний ПІД-регулятор, який використовується у різних системах керування пропорційними клапанами.



Рис.2.4 Програмний ПІД-регулятор

За конструктивними особливостями, операційні підсилювачі прості і тому їх легко інтегрувати у компактні плати керування, що є важливим при обмеженому просторі, наприклад у вбудованих системах чи медичних пристроях. ОП мають широку номенклатуру з різними технічними характеристиками і завдяки цьому, Інженери мають можливість підібрати компонент під конкретні умови експлуатації, в тому числі й для роботи з складними температурними умовами, або у середовищах, де присутні вібрації.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Деякі конструкції навіть забезпечені вмінням автоматично підлаштовувати рівень підсилення залежно від сигналу керування, що реалізується за допомогою додаткових схем з варіативним зворотнім зв'язком на основі польових транзисторів.

Реалізація зворотного зв'язку є не менш важливим фактором застосування операційних підсилювачів. Саме вони забезпечують необхідну динаміку та стійкість, дозволяючи підтримувати необхідний режим роботи клапана навіть при умовах флуктацій навантаження, або зміни зовнішніх параметрів. Це особливо цінується у динамічних системах, таких як електронно-променевої гармати, прецизійному дозуванні, або мікропневматичних приладах.

Отже, операційні підсилювачі це сучасне та популярне рішення для побудови надійної системи керування пропорційним клапаном електронно-променевої гармати. Можливість адаптації їх до різних схемотехнічних рішень, простота інтеграції до існуючих систем та висока стабільність роботи роблять їх універсальними засобами для реалізації подібних систем керування. Тому у даній роботі було використано операційні підсилювачі та на їх основі проведена реалізація драйвера виконавчого пристрою.

Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто новітні методи керування пропорційними клапанами, зокрема аналогові та цифрові підходи, а також їх переваги та недоліки. Аналогові системи застосовують в більшості для нескладних, обмежених функціональностей. Вони прості у виконанні, швидкодії та енергоефективні. Цифрова схемотехніка навпаки, забезпечує високу точність, легку інтеграцію у готові системи та гнучке налаштування параметрів, однак такі системи складніші та вимагають складнішого технічного впровадження. Порівняння довело, що найефективнішим є комбінований метод у якому застосовуються обидві технології і поєднують швидкодію аналогових систем із

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

розширеними можливостями цифрових контролерів. Детально проаналізовано роль операційних підсилювачів у реалізації схем керування клапанами. Отже, для даної роботи буде використаний саме аналогова схемотехніка, адже вона проста у виконанні і достатня для поставленого технічного завдання. Отримані результати та висновки обґрунтували теоретичну основу для обрання методу керування пропорційним клапаном та для побудови практичної системи драйвера виконавчого пристрою.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

3.1 Розробка структурної схеми

Рекомендоване функціональне наповнення драйвера виконавчого пристрою зображено на рис.3.1.



Рисунок 3.1 Структурна схема функціоналу драйвера виконавчого пристрою

Якщо розглядати детально описану структурну схему драйвера, то можна виділити наступні основні блоки:

Джерело живлення являє собою багаторівневу систему електропостачання, що забезпечує стабільною електричною енергією всі функціональні блоки системи керування [53]. Основне силове живлення +24В постійного струму призначене для підсилювача потужності та електромагнітної котушки пропорційного клапана, забезпечуючи необхідний струм до 5А.

Додатково система включає двополярне аналогове живлення $\pm 15\text{В}$ для операційних підсилювачів, що входять до складу суматора, підсилювача зворотного зв'язку та генератора дітерингованого сигналу. Стабільність напруги живлення не гірше $\pm 1\%$ забезпечується інтегрованими стабілізаторами з низьким

					ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Піппис	Дата		39

рівнем пульсацій [54].

Система живлення обладнана багаторівневим захистом: електронними запобіжниками, обмежувачами струму та температурним захистом від перегріву. Конденсатори фільтрації великої ємності забезпечують стабільність живлення при динамічних навантаженнях, найчастіше, під час швидких перемикань пропорційного клапана.

Джерело вхідного сигналу являє собою блок формування керуючого напруги, що визначає бажаний рівень струму через електромагнітну котушку пропорційного клапана [33]. В аналізованій схемі це реалізовано через потенціометр або зовнішній аналоговий сигнал управління, який може подаватися від системи управління. Вхідний сигнал зазвичай має діапазон 0-10В або 4-20мА, що відповідає стандартам промислової автоматики [34]. Цей блок забезпечує лінійну залежність між керуючим сигналом та бажаним положенням виконавчого елемента клапана.

Блок формування керуючого сигналу відповідає за створення напруги управління, яка визначає необхідний рівень струму в електромагнітній котушці пропорційного клапана [33]. У досліджуваній конфігурації використовується потенціометр або зовнішній аналоговий керуючий сигнал від системи верхнього рівня. Робочий діапазон сигналу відповідає промисловим стандартам: 0-10В або 4-20мА [34]. Даний компонент забезпечує прямо пропорційну залежність між управлінням та цільовим положенням виконавчого механізму клапана.

Генерація дітерингованого сигналу відіграє ключову роль у функціонуванні пропорційного клапана, попереджаючи заклинювання виконавчих елементів [35]. Формується високочастотний коливальний сигнал (синусоїдальний або меандр) з невеликою амплітудою (2-10% від максимуму) та частотою у діапазоні 50-200 Гц, який накладається на основний керуючий сигнал.

Застосування дітерингу особливо актуальне при роботі з густими робочими рідинами або в забруднених умовах, де існує ризик "прилипання"

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

рухомих частин до опорних поверхонь через статичне тертя. Безперервні мікроколивання виконавчого елемента забезпечують його рухливість та суттєво поліпшують лінійність робочої характеристики клапана, особливо при малих керуючих сигналах [36].

Захисний блок обмеження струму контролює та попереджає перевищення допустимих значень струму через електромагнітну котушку [40]. Система включає моніторинг поточного навантаження через струмовий датчик та обмеження керуючого впливу на підсилювач при досягненні критичних значень.

Технічна реалізація базується на компараторі з гістерезисом, який співставляє показання струмового датчика з референсним рівнем максимально допустимого струму. При перевищенні порогу відбувається зниження коефіцієнта передачі або повна блокада управляючого сигналу до нормалізації параметрів. Це забезпечує захист як електромагнітної котушки від перегріву, так і силових транзисторів від пошкодження [41].

Суматор у схемі додатково реалізує функціонал ПІ-регулятора (пропорційно-інтегрального), що гарантує стабільність автоматичної системи регулювання та мінімізує стаціонарну похибку. Інтегральна компонента усуває статичну похибку в сталому режимі, тоді як пропорційна забезпечує швидкодію системи [37].

Силовий підсилювач являє собою транзисторну схему для підсилення сигналу помилки до рівня, необхідного для керування електромагнітною котушкою [38]. Схемотехнічний аналіз показує використання гібридної конфігурації з біполярними та польовими транзисторами, що забезпечує високий коефіцієнт підсилення за потужністю з мінімальними спотвореннями.

Конструкція включає попередній підсилювач на операційному підсилювачі для формування керуючого сигналу та вихідний каскад на потужних транзисторах, здатних забезпечити струм 2-5А [39]. Схема доповнена системою струмового захисту та запобігання перевантажень, що підвищує експлуатаційну надійність драйвера.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Пропорційний клапан функціонує як виконавчий механізм, перетворюючи електричний керуючий сигнал у механічне переміщення золотника або регульовального елемента [40]. Електромагнітна котушка характеризується індуктивністю 10-50мГн та активним опором 2-20Ом відповідно до типу та потужності. Електромагнітна сила прямо пропорційна струму котушки, що забезпечує лінійну залежність керування-позиціонування [41].

Конструктивно котушка намотана на феромагнітному осерді з високою магнітною проникністю для максимальної ефективності перетворення електричної енергії в механічну. Часова характеристика спрацювання сучасних пропорційних клапанів складає 15-50мс, що визначається індуктивними параметрами котушки та характеристиками драйвера [42].

Струмовий датчик забезпечує формування сигналу зворотного зв'язку по струму електромагнітної котушки [43]. У розглянутій схемі використовується прецизійний шунтуючий резистор (0.1-1Ом), увімкнений послідовно з котушкою. Напруга на шунті пропорційна струму та підсилюється диференційним підсилювачем для створення сигналу зворотного зв'язку.

Точність струмового датчика визначає загальну точність системи позиціонування клапана. Сучасні прецизійні шунти забезпечують похибку струмових вимірювань не більше 0.5%, що задовольняє вимоги точності пропорційних клапанів [44].

Підсилювач зворотного зв'язку призначений для підсилення та обробки сигналу струмового датчика до рівня, сумісного з входом суматора [45]. Реалізується на базі інструментального операційного підсилювача з високим коефіцієнтом придушення синфазних сигналів ($CMRR > 80\text{дБ}$) та низьким температурним дрейфом.

Коефіцієнт підсилення визначається з умови забезпечення одиничної передавальної функції замкненої системи у номінальному режимі. Блок може включати фільтр нижніх частот для придушення високочастотних перешкод та забезпечення системної стійкості [46].

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Система реалізує принцип автоматичного регулювання з від'ємним зворотним зв'язком. Керуючий сигнал подається на перший вхід суматора, а на другий надходить сигнал зворотного зв'язку, пропорційний фактичному струму котушки. Різниця сигналів (похибка регулювання) підсилюється силовим каскадом та подається на електромагнітну котушку [47].

При зростанні керуючого впливу збільшується сигнал похибки, що призводить до підвищення струму котушки та зростання електромагнітної сили. Це спричиняє відповідне переміщення виконавчого елемента клапана. Паралельно зростає сигнал зворотного зв'язку від струмового датчика, що зменшує похибку регулювання до досягнення рівноважного стану [48].

Така конфігурація забезпечує високоточне позиціонування виконавчого елемента (типово $\pm 1-2\%$ від повного ходу) та швидку реакцію на зміни керування. Стійкість системи гарантується оптимальним вибором параметрів регулятора та введенням необхідних частотних корекцій [49].

Розроблена система керування забезпечує наступні технічні параметри: діапазон керуючих сигналів 0-10В або 4-20мА, максимальний вихідний струм 5А при напрузі живлення 24В, точність регулювання $\pm 1\%$, час перехідного процесу не більше 100мс [50]. Система обладнана багаторівневим захистом від короткого замикання, перевантажень та перегріву для надійної експлуатації в промислових умовах.

Робочий температурний діапазон системи $-20...+70^{\circ}\text{C}$ дозволяє застосування у широкому спектрі промислових застосувань. Ступінь захисту корпусу IP65 забезпечує функціонування в умовах підвищеної вологості та запиленості [51, 52].

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.2 Розробка принципової електричної схеми та вибір компонентної бази

У результаті постанови та аналізу задачі наданої до розробки, сконструйовано електричну принципову схему, що прикладається до комплексу разом із пояснювальною запискою. Розрахунки, що детальніше розкривають принцип розробки електричної принципової схеми, а також підтверджують коректність вибору елементної бази, наведені у п.3.3 даного розділу.

Система керування клапаном електронно-променевої гармати вагомим чином визначає важливі характеристики системи керування пропорційним клапаном і тому при розробці системи необхідно врахувати особливості роботи та управління натікача газу і електронної гармати для підвищення стабільності роботи клапана з електромагнітним приводом. Основними функціональними особливостями системи керування виступають джерело напруги, суматор, який доданий для того, щоб порівняти сигнали з датчика та джерела напруги, операційний підсилювач вихідного сигналу, який безпосередньо подається на підсилюючий каскад транзисторів і самі підсилюючі транзистори різних номіналів для послідовного та точного підсилення сигналу, який поступає на клапан. Існують декілька факторів, які тим, чи іншим чином впливають на плавне керування пропорційним клапаном, якого намагаються досягти, такі як електромагнітний гістерезис, тертя, залипання клапана це все знижує чутливість керування та погіршує роботу системи, при цьому затрачаючи більше потужності на вирішення наведених проблем. Отож, щоб вирішити наведені питання, які викликані магнітним гістерезисом і тертям, у розробленій системі здійснюється лінеаризація нелінійних характеристик електромагнітного клапана. У електричній принциповій схемі, для зменшення гістерезису та запобігання залипання електромагнітного клапана, доданий генератор імпульсів на якому створюється сигнал, який модулюється по імпульсній напрузі, яка у результаті надходить на суматор може бути регульована по тривалості імпульсів,

					ДЕ11.111811.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

амплітуді, або ж частоті.

У результаті вирішення поставленої задачі розроблено принципову електричну схему керування пропорційним клапаном електронно-променевої гармати, яка наведена на рис.3.2.

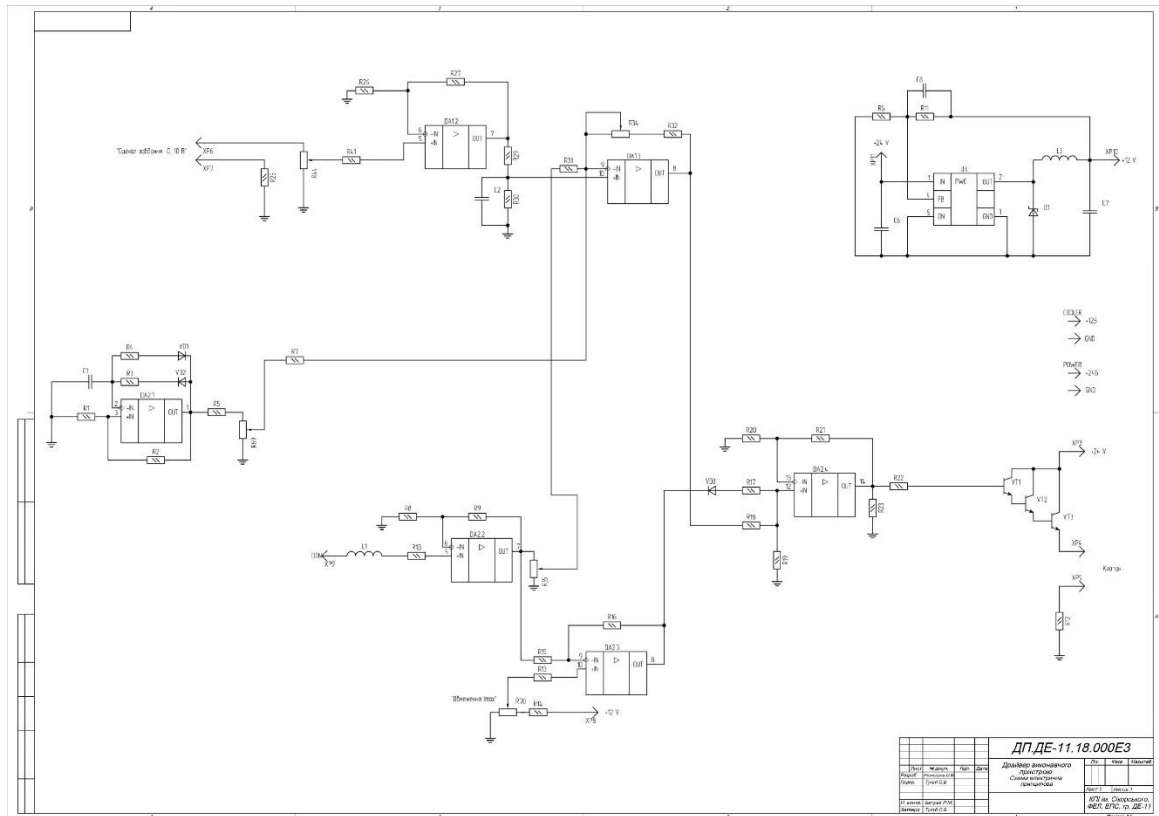


Рис. 3.2 Схема електрична принципова

За допомогою електричної принципової схеми було виконано трасування плати. У програмному середовищі KiCad відкриваємо основне вікно програми та вказуємо шлях до необхідних бібліотек. У редакторі друкованих плат, у робочій площині, розташовуємо компоненти таким чином, аби забезпечити мінімальну довжину з'єднань та уникнути перехрещення доріжок. Опісля, налаштовуємо параметри друкованої плати, вмикаючи розміри доріжок, відстані між ними та кількість шарів плати.

Наступним етапом виступає трасування. Провідні доріжки прокладаємо між виводами компонентів відповідно до електричних з'єднань. Широкими

доріжками проводимо такі важливі сигнали, як живлення та земля. Після закінчення трасування друкованої плати, валідуємо плату, перевіряємо наявність помилок з'єднання, застосовуючи вбудовані засоби перевірки. Плата одностороння, але компактна за рахунок розміщення деяких компонентів на зворотній стороні.

Кінцевий вигляд плати, яку ми отримуємо у результаті, представлений на рис.3.3.

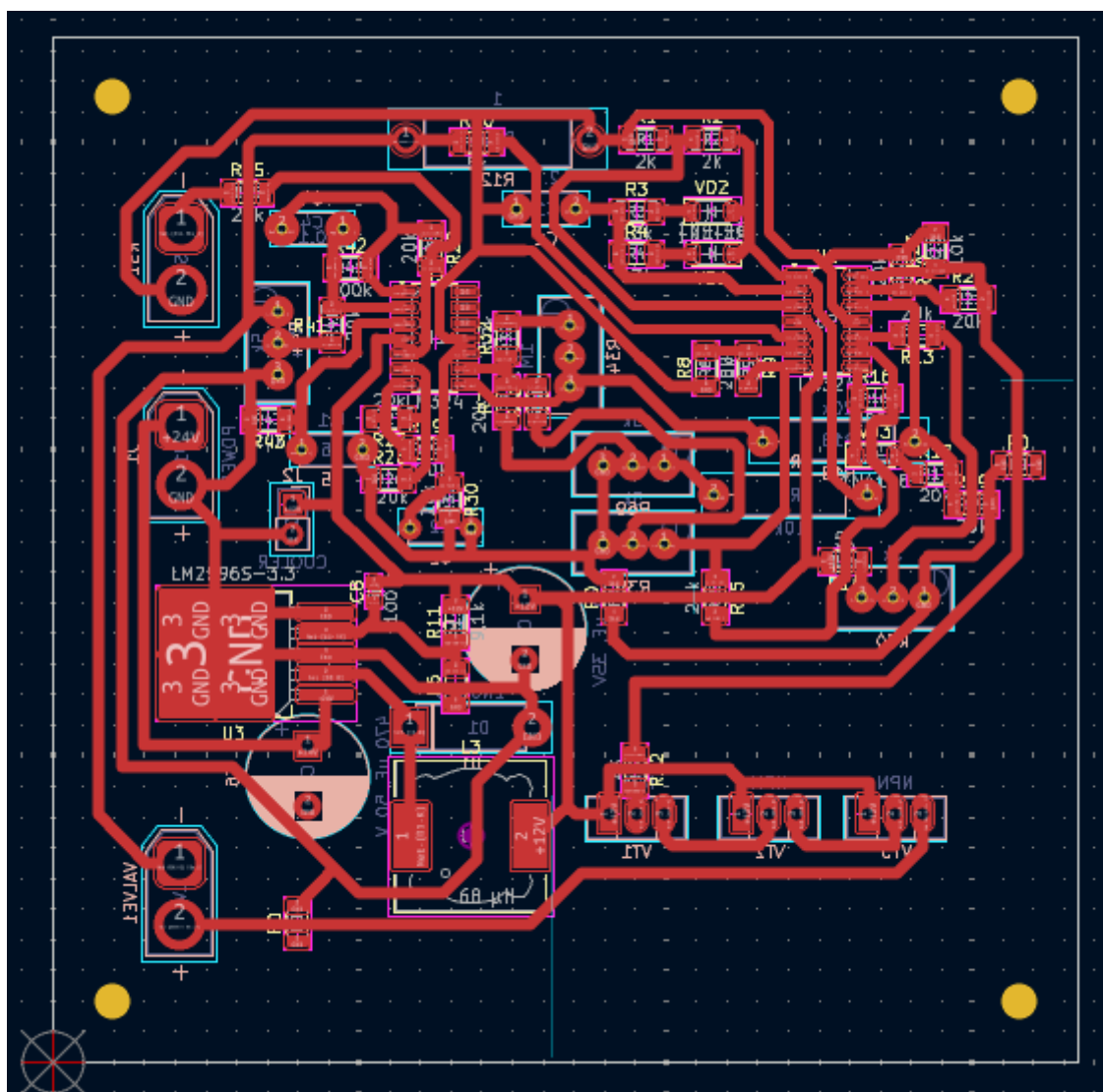


Рис.3.3 Друкована плата, розведена у програмному середовищі KiCad

Отримуємо готовий ескіз для друку, зображений на рис.3.4.

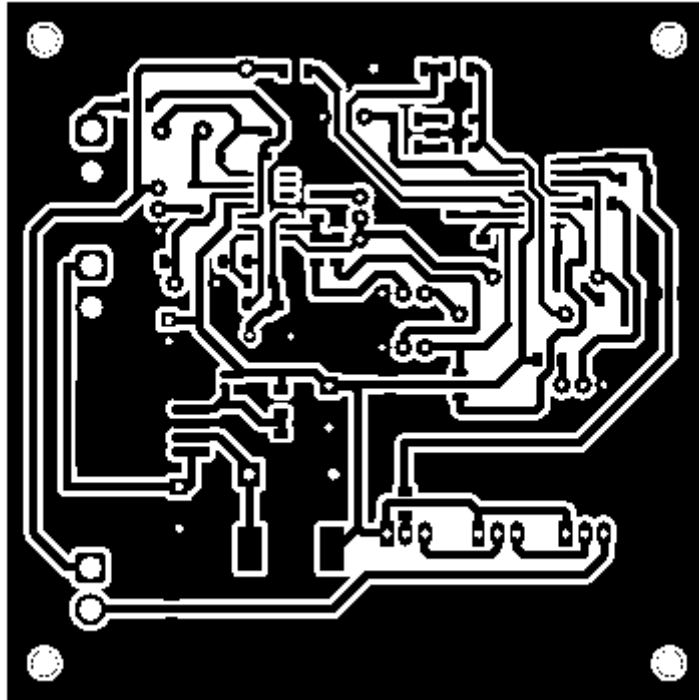


Рис.3.4 Ескіз друкованої плати

Креслення друкованої плати виглядають наступним чином, рис.3.5.

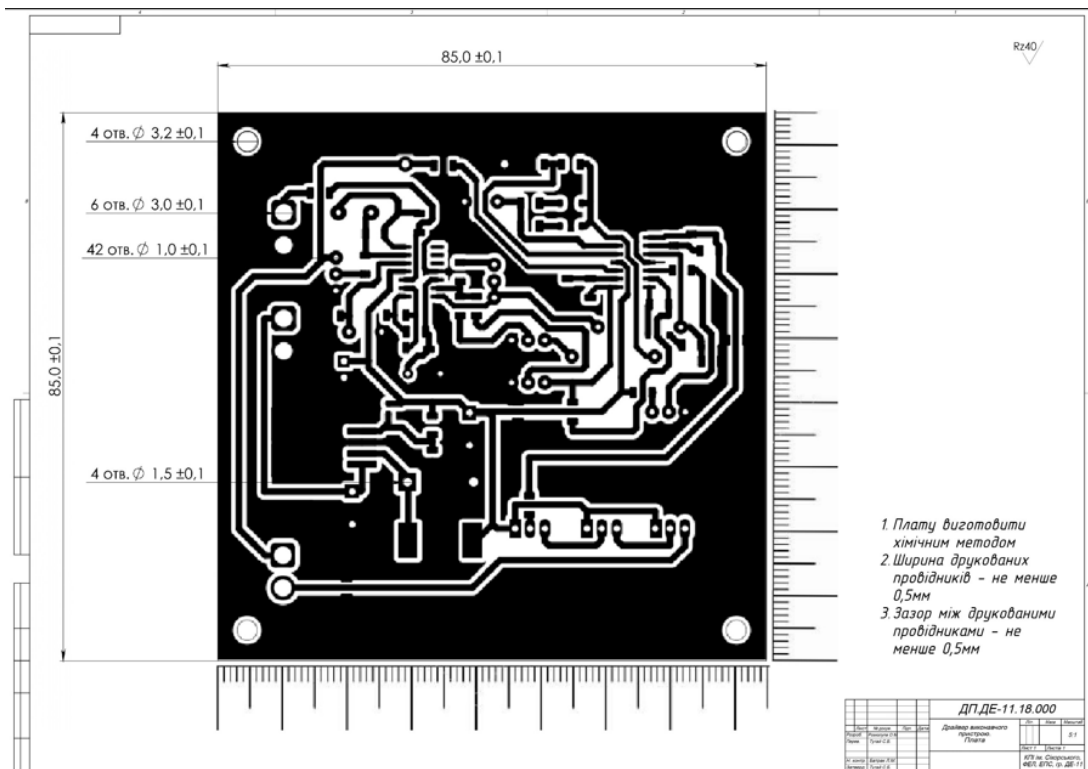


Рис.3.5 Креслення друкованої плати

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДЕ11.111811.000 ПЗ

Арк.

47

3.2.3 Вибір транзисторів

У схемі присутні біполярні транзистори, які працюють у ключовому режимі або в схемах узгодження рівнів. Їхнє застосування у схемі дозволяє комутувати сигнали керування, формувати імпульси або підсилювати струм для навантаження. Кожен з трьох транзисторів має підсилювати дію попереднього. Тому обираємо їх наступним чином: в якості першого каскаду використовується малопотужний низькострумний транзистор BC547, який забезпечує підсилення слабкого сигналу та передає його на базу наступного транзистора. Його висока вхідна чутливість і коефіцієнт підсилення дозволяють ефективно обробити сигнал навіть від високорезистивних джерел. Другий каскад реалізується за допомогою універсального транзистора 2N2222, що має вищий струм колектора і забезпечує додаткове підсилення сигналу від попереднього етапу. Завдяки своїм характеристикам цей транзистор слугує проміжною ланкою між первинним підсиленням та потужним вихідним каскадом. На завершальному етапі використовується транзистор BD139, що здатен комутувати струми до 1,5 А, завдяки чому виконує роль силового елемента, безпосередньо керуючи струмом через навантаження.

Загальна структура підсилювача будується за схемою каскадного підсилення з загальним емітером, де вихід одного транзистора через резистивний діляк подається на базу наступного. Це дозволяє не лише наростити амплітуду сигналу, але й адаптувати рівні напруги для сумісності між каскадами. Перевагою такого рішення є високий загальний коефіцієнт підсилення, який обчислюється як добуток коефіцієнтів підсилення кожного транзистора. Крім того, застосування саме біполярних NPN-транзисторів з колекторним навантаженням дозволяє забезпечити швидкодію та термічну стабільність схеми.

Таким чином, реалізація трикаскадного підсилювача на транзисторах BC547, 2N2222 та BD139 є технічно обґрунтованим рішенням для забезпечення надійного керування пропорційним електромагнітним клапаном у складі

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

системи, що потребує плавного регулювання сили струму при обмеженому вхідному сигналі. Транзистори часто використовують у парі з ОП для підсилення струмового навантаження на виконавчі елементи, такі як пропорційний клапан [30].

3.2.4 Вибір діодів

Використання діодів виконує декілька функцій в системі – випрямлення наруги в перетворювачах, захист від зворотної полярності, пригнічення імпульсів від індуктивних елементів. Для даної роботи оберемо типовий варіант - 1N4148, він має швидкодіючий сигнал. У схемах із котушками діоди виконують важливу функцію демпфування, захищаючи ключові елементи (транзистори, ОП) від перенапруги. Шотткі-діоди особливо цінні в імпульсних джерелах живлення завдяки малому прямому падінню наруги. На рис. 3.8 зображено діод 1N4148.



Рис.3.8 Діод 1N4148

3.2.5 Вибір резисторів

Резистори виконують функцію регулювання рівня струмів і наруги в електричних колах. Їхні електричні характеристики залежать від типу матеріалу, з якого вони виготовлені, а також від конструктивного виконання. Враховуючи вимоги технічного завдання та особливості електричної принципової схеми,

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		50

було обрано типи резисторів, що повністю відповідають необхідним параметрам. У процесі проєктування пристрою передбачено використання керамічних SMD-резисторів типорозміру 0805 з номінальною потужністю 0.125 Вт, 0.25 Вт та 0.5 Вт, а також потенціометрів на 5 кОм і 10 кОм. Діапазон номіналів опору таких резисторів становить від 1 Ом до 50 МОм. Також такі резистори також враховують допуски $\pm 1\%$ та $\pm 5\%$.

3.2.6 Вибір конденсаторів

Електричні конденсатори використовуються для накопичення електроенергії у електричному полі. Електричні характеристики, так само, як і у резисторів, визначаються конструкцією та типом матеріалу, який використовується для їх побудови.

Конденсатори, зокрема електролітичні (100 мкФ, 25 В) — для фільтрації живлення, та керамічні 100 нФ — для високочастотної фільтрації, використовуються для стабілізації напруги, фільтрації шумів та формування часових постійних. Фірма конденсаторів – Hitano.

3.2.7 Вибір котушок індуктивності

Котушки індуктивності служать для накопичення енергії і імпульсному перетворювачі. Вони мають мати низький опір обмотки та на достатньому рівні струмовий запас для уникнення насичення. У цьому випадку підійде така котушка індуктивності, як MSS1210 220 мкГн. Використання такої якісної котушки, як наведена, покращує ефективність перетворення та зменшує електромагнітні завади у системі.

3.2.8 Вибір потенціометрів

Потенціометри використовують як налаштувальні компоненти у схемах підсилення, чи визначення опорної напруги. Вони забезпечують точне налаштування без потреби підбору резисторів вручну. А у системах з

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

прецизійним керуванням ще й зберігають значення при довготривалому використанні. Для даної схеми підійдуть потенціометри такого виду – ВАОТЕР 3296W-1-104LF.

3.3 Розрахунок схеми

3.3.1 Розрахунок споживання елементів схеми та драйвера виконавчого пристрою

Для того, аби розуміти ефективність та енерговитрати певних елементів схеми а також всієї системи керування пропорційним клапаном в цілому, необхідно визначити енергоспоживання елементів та загалом системи керування. Визначення енергоспоживання є вагомим кроком до розуміння стабільності роботи системи, тобто наскільки довго та без проблем можуть працювати компоненти схеми та електрична схема загалом. Визначення енергоспоживання дасть чітке поняття про ефективність зібраної схеми і допоможе у результаті обрати коректне джерело живлення, яке буде здатне забезпечити необхідну потужність і струм із певним рівнем запасу. Джерело живлення є першочерговим елементом завдяки якому працює схема. Забезпечення перетворення енергії з мережі у стабілізований струм та напругу першочергове завдання джерела напруги, яке гарантує роботу всіх елементів схеми, таких як операційні підсилювачі, транзистори та каскади, які вони утворюють, генератора заданого сигналу, датчика струму натікача, і врешті-решт електромагнітного пропорційного клапана. Маючи дані про те, яку кількість енергії витрачається на навантаження системи і скільки витрачається на нагрівання, тобто на втрати, буде корисним в подальшому для оптимізації схеми, тобто фактичної заміни певних елементів системи таких як стабілізатори, або конденсатори і допоможе для підвищення рівня коефіцієнта корисної дії. Компоненти, здатні розсіювати потужність, тобто які мають тепловідведення на корпусі, вище перераховані транзистори та

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

стабілізатори нагріваються під час постійної та довготривалої роботи, для забезпечення контролю стабільної робочої температури та для розрахунку теплового навантаження елементів буде здійснений підбір валідних радіаторів для охолодження транзисторів та стабілізаторів.

Отож, для зручного розрахунку енергоспоживання всієї системи керування пропорційним клапаном електронної гармати, розділимо всю систему на певні категорії за функціональними частинами блоків. Можна виділити такі функціональні блоки наведеної системи як, операційні підсилювачі, понижуючий перетворювач напруги, який включає в себе імпульсне джерело живлення, транзисторний каскад, основний елемент - електромагнітний клапан, та додаткові пасивні компоненти схеми.

Проведемо розрахунок енергоспоживання операційних підсилювачів LM324. На схемі наведено два операційних підсилювачі по 14 виводів на кожному у корпусі DIP-14. Напруга живлення схеми – 24В, струм, який споживається мікросхемою близько 1 мА на весь наявний корпус.

Звідси потужність, яка виділиться на одному корпусі мікросхеми:

$$P = U \cdot I = 24 \cdot 0,001 = 0,024 \text{Вт}$$

Якщо розрахувати потужність, яка виділиться для двох корпусів, отримаємо:

$$P_{\text{о.п}} = 2 \cdot 0,024 = 0,048 \text{Вт}$$

Розрахунок для навантаження, яке споживає імпульсний стабілізатор LM2596S-3.3(може інший), буде організований наступним чином. Мікросхема споживає 3,3В, струм при цьому близько 300мА, як результат вихідна потужність :

$$P_{\text{вих}} = 3,3 \cdot 0,3 = 0,99 \text{Вт}$$

Якщо ККД мікросхеми у середньому становить 80%, то вхідна споживана потужність:

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta} = \frac{0,99}{0,8} = 1,23 \text{Вт}$$

									Арк.
									53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Споживання транзистора BD249C знайдемо за наступними кроками. Напруга насичення даного транзистора становить 1,2В, а струм через клапан 1,5А, тож потужність, яка буде розсіяна на куллері транзистора має значення:

$$P_{тр} = U_{нас} \cdot I = 1,2 \cdot 1,5 = 1,8 \text{Вт}$$

Енергоспоживання пропорційного клапана, який споживає близько 1,5А при напрузі 24В має значення:

$$P_{кл} = U \cdot I = 24 \cdot 1,5 = 36 \text{Вт}$$

Таким чином, отримано найосновніші енергоспоживання частин цілої системи і виходячи з отриманих даних, можна розрахувати загальне енергоспоживання системи керування пропорційним клапаном. Для цього побудуємо таблицю енергоспоживання.

Загальне споживання системи:

$$P_{заг} = P_{кл} + P_{тр} + P_{вх} + P_{о.п} = 36 + 1,8 + 1,23 + 0,048 = 39,078 \text{Вт}$$

Отже загальне споживання системи становить близько 40Вт. У табл.3.1 відображено споживання елементів системи та загальне споживання системи.

Таблиця 3.1

Споживання елементів системи

Елемент	Потужність, що споживається
LM324	0,048 Вт
LM2596S-3.3	1,23 Вт
BD249C	1,8 Вт
Електромагнітний клапан	36 Вт
Загальне споживання системи	40 Вт

Отже, як видно з результатів розрахунків, система керування драйвером виконавчого пристрою має високу ефективність, яка у загальному складає близько 92%, саме завдячуючи тому, що більшість споживання припадає на корисне навантаження, а саме електромагнітний клапан. Правильний вибір компонентів забезпечив мінімальні втрати у керуючій електронній частині.

Розглянувши доступні види джерел живлення, можна сказати, що ідеальним варіантом буде імпульсне джерело живлення, яке забезпечить потрібне тепловідведення для силових компонентів, з потужністю 70 Вт, напругою 24В та струмом 2,5 – 3А.

3.3.2 Розрахунок теплового навантаження на транзисторі

Для того, аби визначити чи потрібний радіатор для охолодження транзисторів, чи ні, необхідно розрахувати теплове навантаження на транзисторах. Для основного транзистора на схемі (BD249C) розрахуємо теплове навантаження та площу радіатора необхідного для охолодження.

Виходячи з того, що напруга насичення ключового транзистора сягає 1,2В, а допустима розсіювана корпусом мікросхеми потужність 2Вт, визначимо струм навантаження, який буде збільшений у $2\text{Вт}/1,2\text{В} = 1,6\text{А}$ для корпусу ТО-218.

Взявши дані з даташиту, такі як з'єднання з навколишнім середовищем – $37,5^\circ\text{C}$ і з'єднання з ізольованим корпусом 1°C , визначимо потужність, яка виділяється на кристалі мікросхеми. Порогова напруга становить $V_t = 2\text{В}$ (при максимальній температурі напівпровідника $T_n = 150^\circ\text{C}$).

Обрахуємо потужність, що виділяється на кристалі мікросхеми BD249C:

$$P_{nn} = I_{max} \cdot V_t = 1,6 \cdot 2 = 3,3 \text{ Вт},$$

де P_{nn} – потужність, яка виділяється на напівпровідниковому кристалі, I_{max} – максимальний струм.

Визначимо максимальну потужність у колі споживання схеми:

$$P_{max} = I_{max} \cdot U,$$

де U – напруга на навантаженні мікросхеми.

Тоді максимальна потужність, яка виділяється у колі становитиме:

$$P_{max} = 1,6 \cdot 24 = 40 \text{ Вт}.$$

Отже, радіатор потрібний для охолодження має розсіювати потужність:

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		55

$$P_{рад} = P_{max} - P_{nn} = 40 - 3,3 = 36,7 \text{ Вт}$$

Для оцінення необхідного охолоджувача формула матиме наступний вигляд:

$$S = \left(\frac{37,5}{P_{рад}} \right)^2,$$

де S – площа поверхні радіатора охолодження, $см^2$, $P_{рад}$ – тепловий опір радіатора, $^{\circ}C / \text{Вт}$.

Тепловий опір радіатора знайдемо наступним чином:

$$R_{рад} = q \cdot \frac{[(T_n - T_n) - P_{nn}(R_{нк} + R_{кн})]}{P_{рад}},$$

де q – коефіцієнт, який зауважує нерівномірний розподіл температури по тепловідводу ($q = 0,96$), $R_{кн}$ – тепловий контактний опір між корпусом та радіатором $0,5^{\circ}C / \text{Вт}$.

Виходячи з вище наведеного виразу обчислимо $R_{рад}$:

$$R_{рад} = 0,96 \cdot \frac{[(150 - 25) - 3,3(0,9 + 0,5)]}{36,7} = 3,14^{\circ}C / \text{Вт}.$$

Отже:

$$S = \left(\frac{37,5}{3,14} \right)^2 = 12 \text{ см}^2.$$

Таким чином, для транзистора BD249C потрібен радіатор загальної площі 12 см^2 . Таким радіатором можна обрати анодовий алюмінієвий радіатор з ребрами, розмірами $25,4 \times 12 \times 6,5$ мм. Прикладом такого радіатора може стати HS-112-25. Його переваги полягають в тому, що він має компактні розміри, що особливо корисно для встановлення у щільно змонтованих друкованих платах. Забезпечує надійну теплопровідність та захист від корозій, тим самим підвищуючи тривалість експлуатації радіатора. Вміє продуктивно розсіювати без додаткового охолодження. Радіатор HS-112-25 наведений на рис.3.9.

										Арк.
										56
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ					



Рис.3.9 Радіатор охолодження HS-112-25

Висновок до розділу

У результаті схемотехнічного проектування було розроблено структурну та принципову електричну схеми драйвера виконавчого пристрою, призначеного для керування пропорційним електромагнітним клапаном. Обґрунтовано вибір основних компонентів, таких як перетворювачі напруги, операційні підсилювачі, транзистори та інші пасивні елементи. Ретельно підібрана елементна база забезпечує надійну роботу пристрою, враховуючи вимоги до плавності керування, енергоефективності та захисту від перевантажень. Завдяки розрахунку енергоспоживання та теплового навантаження на ключових елементах схеми було забезпечено оптимальні умови експлуатації пристрою з урахуванням режимів тривалої роботи.

Здійснені розрахунки підтвердили працездатність обраної архітектури, її відповідність вимогам електронно-променевої гармати, а також здатність адаптації до змін у навантаженні. Таким чином, розділ 3 підтвердив доцільність вибраного підходу до побудови електронної частини драйвера, сформувавши основу для подальшої реалізації пристрою у вигляді фізичної друкованої плати.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

4. ПРОЄКТУВАННЯ ДРУКОВАНОГО ВУЗЛА

4.1 Обрання виду та матеріалів для виготовлення друкованої плати

Створюючи друковану плату виробу, важливо враховувати, що друкована плата відіграє важливу роль у різних аспектах виконуючи дві найосновніші функції: забезпечення надійних електричних з'єднань між компонентами і виконують роль опор для відповідних компонентів. Для ефективного виконання наведених задач, необхідно правильно обрати матеріал для виготовлення друкованої плати. Відповідний матеріал покращить електричні характеристики з'єднань і у той же час забезпечить стійкість та витривалість друкованої плати до непередбачуваних умов роботи. Декілька частин компонентів утворюють суцільну схему, а потім компоненти з'єднуються доріжками, за допомогою майданчиків та ліній і утворюють повну друковану плату. Зазвичай плата містить мідні шари, які вбудовуються у плоску ламіновану композитну підкладку, вона містить такі матеріали, як епоксидна смола, скловолокно. Спеціально розроблено багат шарові структури, для утворення більшої щільності ланцюга та зменшення композитних розмірів плати, вони дозволяють виробляти не одношарові, а декількох-шарові друковані плати, де шари поєднуються нагріванням для створення єдиного компактного середовища. Існують такі види друкованих плат у залежності від кількості нанесених на них шарів доріжок, які створені для поєднання компонентів: одношарові друковані плати. Одношарові друковані плати служать для нанесення з'єднувальних доріжок з однієї сторони діелектричної основи. Вони не складні у виготовленні і доступні своєю легкістю монтажу компонентів, зазвичай такий вид плат використовують для легких схем, які не містять великої купи компонентів і на яких з легкістю можна розмістити всі складники плати.

Якщо ж, необхідно розмістити багато компонентів, скоротити кількість з'єднань з однієї сторони і зробити розробляну друковану плату дещо

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		58

простішою, потрібно використати такий тип друкованих плат, як двостороння друкована плата. Такі плати спрощують трасування провідників, дозволяють підвищити надійність з'єднань між компонентами, мають набагато вищу щільність монтажу, ніж названі раніше односторонні друковані плати. Отож, для створення високої механічної міцності кріплень у двосторонніх друкованих платах передбачено можливість розміщення вивідних компонентів з однієї сторони(до прикладу, зворотної), а SMD-компонентів з іншої(лицьової сторони). Двосторонні друковані плати набули широкої популярності серед інженерів для виготовлення друкованих плат для електронних приладів та пристроїв.

Також не меншої популярності зазнали багат шарові друковані плати. Такі плати створюють за допомогою об'єднання в одне ціле декількох шарів діелектрика і основних малюнків, які йдуть по черзі один за одним. Багат шарова основа - це те, у що поєднуються шари плати, коли виробляються. Багат шарові плати – це дороговартісні плати, адже виготовлення такої плати передбачає затрачання більших ресурсів, уважності до деталей та обережності при нанесенні початкових малюнків, які будуть чергуватись. Через цей ряд причин, такі плати не зазнали дуже широкої популярності, адже вони складні при конструюванні. Існує декілька технологій створення наведених друкованих плат, загально воно називається пресування, а потім поділяється на два види такі як, здійснення наскрізних перехідних отворів для створення електричних зв'язків багат шарової структури і наступний це – використання переходів між шарами безпосередньо. Ці два способи забезпечують надійне з'єднання доріжок та компонентів та загалом перший спосіб отримав назву – глухі переходи, через те, що міжшарові переходи здійснюються із зовнішніх у внутрішні шари структури, а другий – приховані, адже вони знаходяться всередині структури, між шарами.

Для плати, яка досліджується у поданій роботі, було обрано двошарову друковану плату, адже само вона дозволяє розміщувати компоненти, що мають виводи на одній стороні, а SMD – компоненти на іншій. Рішення щодо вибору структури плати було здійснене на основі аналізу видів друкованих плат.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		59

Основна задача створюваної плати – це надійність з'єднань та зменшення використання площі поверхні плати, тому для коректної та розумної організації компонентів на платі обрано саме двошаровий тип плати. Цей варіант можна назвати найвигіднішим та найкращим. Передбачається довготривала робота пристрою, при якій потрібна точність при керуванні пропорційним клапаном електронної гармати, мінімальна площа плати та надійність пристрою, тому двостороння друківана плата допоможе забезпечити ці всі вимоги.

Розглянемо матеріали, які найчастіше застосовуються для різних типів друківаних плат. Основний елемент – це підкладка, яка служить для всіх друківаних відбитків, себто ізолятором для провідних шарів. При виконанні найважчих друківаних плат, найпоширенішим матеріалом для підкладки виступає FR4 - це своєрідна фенольна смола. Фенольні смоли широко відомі гарною механічною міцністю та здатністю до електроізоляції. Але багато проектів нехтують цим матеріалом і обирають порівняно дешевші варіанти, такі, як фенольні та епоксидні смоли. Також розповсюдженим матеріалом вважається поліемідні та поліефірні матеріали, які у свою чергу забезпечують певний коефіцієнт гнучкості для друківаної плати. Інженери мають можливість детально ознайомитись з вимогами проекту та обрати саме той варіант, який задовільнить оптимальну функціональність та довговічність приладу, себто друківаної плати. Часто на практиці використовують матеріали підкладки з металевими сердечниками, наприклад такими матеріалами можуть слугувати мідь та алюміній. Провідний шар вважається ключовим мідним шаром, який відповідає за формування електричних слідів, які саме забезпечують з'єднання компонентів на платі. Ця тонка мідна фольга наноситься на непровідну основу, у загальному випадку на епоксидну смолу, яка армована скловолокном та кількома ізоляційними шарами. Для ламінування мідної фольги при виробництві, використовують нагрівання та клей.

Якщо говорити про двосторонню друківану плату, то обидві сторони плати добре покриті міддю для утворення необхідних стабільних електричних

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		60

з'єднань. Кожен шар багатошарової друкованої плати оснащений своїми провідними шляхами, товщина нанесення мідного матеріалу безпосередньо впливає на електричні параметри елементів, такі як опори, ємності та індуктивності. Товщину міді на друкованій платі контролюють у залежності від кількості шарів на платі, отож, важливо адаптувати відповідно до функціональності та багатозадачності пристрою його конструкцію.

FR4 – широкодоступний та відомий матеріал для виготовлення друкованих плат. Його повна назва Flame Retardant 4, що відразу звертає увагу на те, що даний матеріал має вогнезахисні властивості. Матеріали FR4 виконані з склокомпозиту та епоксидної смоли, а отже не обділені на спеціальні добавки, які під час виробничого процесу додаються для покращення термічних, вогнезахисних та електричних властивостей матеріалу.

Тефлон – наступний матеріал, який широко застосовується при виготовленні друкованих плат, тефлонового ламінату та клейових матеріалів. Цей матеріал є ідеальним для застосування у високочастотних колах, адже має термоелектричні властивості і виняткові електричні властивості. Тефлон має маленький електричний опір, тому забезпечує високу продуктивність у високочастотних колах і не дозволяє втрат сигналу, це є його найосновнішою перевагою.

CEM-3 – вигідний по ціні, епоксидний композитний матеріал, який є дешевшим порівняно з Flame Retardant 4, хоча має дуже подібні електричні та електромеханічні характеристики. Він виготовляється з тканини та епоксидної смоли, де наповнювачем виступає целюлозний папір.

Отже, порівнявши більшість матеріалів для підкладки для виготовлення плати підійде надійний матеріал - Flame Retardant 4, це склотекстоліт з напилення з фольги та гарною нагрівостійкістю. З обидвох сторін поданий склотекстоліт оброблений мідною електролітичною фольгою для нанесення доріжок наприклад методом фрезерування.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		61

4.2 Обрання класу точності

При виготовленні друкованої плати важливо обрати точність виготовлення, яка може залежати від ряду технологічних параметрів, і по суті обумовлює головні параметри компонентів друкованої плати. Зазвичай це найбільше має стосунок до таких типів параметрів: мінімальна ширина провідників, мінімальний зазор між елементами провідного малюнку і подібні до них.

Відповідно до ГОСТ 23571-86, обумовлено п'ять класів точності друкованих плат. Зокрема обрання певного типу класу точності передбачає огляд конкретного виробництва, для якого виготовляється ця плата. Якщо спробувати спочатку вибрати клас точності і не звертати увагу на виробництво, то це може привести до того, що мета проекту не буде виконана.

Задля точного виконання проекту, потрібно обирати граничні значення елементів друкованого нанесення із врахування їх похибки виконання. Такі дані, як граничні значення компонентів друкованого монтажу і їх допустимі граничні похибки занесено до табл. 4.1 та 4.2 зокрема.

Таблиця 4.1

Граничні значення основних параметрів поверхневого монтажу

Параметр	Позначення параметру	Клас точності			
		2	3	4	5
Ширина друкованого провідника, мм	b_{np}^e	0,45	0,25	0,15	0,10
Відстань між елементами друкованого монтажу, мм	l^e	0,45	0,25	0,15	0,10
Гарантований поясок, мм	b_{no}	0,20	0,10	0,05	0,03
Відношення діаметру найменшого з металізованих отворів до товщини плати	K_{dm}	0,40	0,33	0,25	0,20

									Арк.
									62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Допустимі похибки виконання елементів друкованого монтажу

Похибка	Позначення	Максимальне значення, мм
Зміщення провідників відносно ліній КС	$\delta_{сп}$	0,05
Розташування отворів (усіх) відносно вузла КС	δ_0	0,07
Розташування КМ відносно вузла КС	$\delta_{КМ}$	0,015(0,05)
Фотокопії та фотошаблони	$\delta_{фф}$	0,06
Розташування Км відносно вузла КС на фотошаблоні	$\delta_{фш}$	0,05

Розглянемо ці п'ять класів точності друкованих плат. Перший та другий клас точності забезпечуються звичайним обладнанням, яке не потребує особливих вимог та не передбачає складних конструкторських рішень. Існують випадки, коли плати таких видів точності виготовляють навіть не на обладнанні, а за допомогою підручних матеріалів та обладнання. Зазвичай такі класи точності плат мають невелику кількість компонентів, а отже, й щільність монтажу низька, також вони мають малі конструктивні параметри і розробляються для використання у порівняно бюджетних пристроях.

Третій клас точності – це клас точності, який передбачає використання певного конструкторського устаткування, зазвичай не складного, а звичайних приладів. Цей клас точності є найпоширенішим, адже дозволяє забезпечити гарну щільність розміщення компонентів на друкованій платі, доволі легке трасування доріжок та кріплення елементів схеми до плати.

А ось на високоточному та дорогавартісному обладнанні виготовляють друковані плати четвертого типу точності. Цей клас точності має чіткі вимоги до матеріалів, з яких створюються друковані плати, до приміщень, у яких це відбувається і до обладнання за допомогою якого відбувається весь процес

									Арк.
									63
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

конструювання друкованої плати. Але все-таки це не можна порівняти з п'ятим класом точності виконання друкованих плат.

Виходячи з опису попереднього, четвертого класу точності, можна зробити висновок, що цей клас точності потребує особливого та непересічного високоточного устаткування. Також необхідні дорогоцінні матеріали та чисте, з дотриманням усіх норм, виробниче приміщення. Таких умов вимагає п'ятий тип точності і не кожне пересічне виробництво може забезпечити організацію таким обладнанням та такими умовами виготовлення.

Для пристрою, який розробляється у даній роботі, обрано третій клас точності, адже це дозволить використати сучасні типи обладнання та виготовити друковану плату, забезпечити надійність отриманого виробу та дозволити монтувати компоненти щільно і цим самим обумовити мале використання поверхні плати. Цей тип точності надасть необхідну щільність трасування доріжок дозволить монтаж компонентів так, аби не нехтувати габаритами пристрою.

4.3 Вибір методу виготовлення друкованої плати

Для обрання потрібного методу виготовлення друкованої плати зробимо огляд декількох найпопулярніших та найдоступніших методів виготовлення плат. Такими методами є: хімічний субтрактивний, метод пресування друкованих плат, метод пошарового нарощування, метод металізації наскрізних отворів та метод фрезерування плат.

Хімічний субтрактивний метод передбачає застосування при виробництві друкованої плати металізацію наскрізних отворів, і пошарове нарощення шару покриття. Для цього методу використовують фольговані ізоляційні матеріали.

Метод пресування друкованих плат застосовується у виробництві друкованих плат. Заснований цей метод на створенні міжшарових з'єднань при використанні металізації отворів, як і у випадку простих друкованих плат.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Отож, для цього способу характерне використання напівадитивного методу виготовлення заготовок із яких потім і збирається готовий пакет друкованої плати.

Метод пошарового нарощування має наступні особливості: при цьому способі виробництва друкованих плат чергують послідовність ізоляційного шару та провідникового шару, утворюючи таким чином шаровий текстоліт. З'єднання провідних елементів здійснюється гальванічним нарощуванням такого матеріалу, як міді, у отворах, які належать ізоляційному шару.

Метод фрезерування плат обумовлює виготовлення друкованої плати шляхом фрезерування провідних доріжок на ЧПУ станку. Для цього попередньо створюється файли з картами фрезерування, себто випилювання доріжок і за допомогою ЧПУ станка, створюється необхідний рисунок доріжок, які мають з'єднувати компоненти, на платі.

Метод металізації наскрізних отворів визначає виготовлення спеціальних ядер, як власне і метод попарного пресування, але на цих ядрах виконано провідний малюнок майбутніх внутрішніх шарів друкованої плати. Після того, як заготовка буде спресована із ядер, роблять наскрізні отвори, гальванічно осаджують шар міді і наносять топологічний рисунок зовнішніх шарів друкованої плати комбінованим позитивним методом.

Провівши детальний аналіз наданих методів виготовлення плати і вивчивши вимоги до технічного завдання, у даній роботі буде використано метод фрезерування, для виготовлення друкованої плати. Адже саме цей метод дозволить швидко та без зайвих зусиль отримати підвищену надійність готової плати та зменшити людський фактор впливу на готовий виріб при виконанні доріжок для з'єднання елементів схеми. Також цей метод забезпечить високі електроізоляційні властивості друкованої плати, бо основа з склотекстоліту забезпечить електроізоляцію у всьому технологічному циклі роботи.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		65

4.4 Виготовлення друкованої плати на ЧПУ станку

Вигляд ЧПУ станка, за допомогою якого було створено плату представлено на рис.4.1.



Рис.4.1 Вигляд ЧПУ станка для фрезерування плати

1. Першим кроком підключаємо станок і запускаємо програму Grblcontrol і вибираємо файли, які ми створювали, а саме починаємо з виїмки. Габарит плати 85 мм на 85 мм, тому беремо пластину необхідного розміру.
2. Видаляємо пил з склотекстоліту і наклеюємо двохсторонній скотч на потрібну область текстоліту.
3. Розміщуємо текстоліт так, щоб можна було підключитись крокодиллом, або у кутик припаяти провід, щоб підключитись крокодиллом.
4. Приклеюємо плату на основу станка і придавлюємо, щоб текстоліт гарно приклеївся.
5. Ставимо фрезу в патрон.
6. У програмі спрямовуємо стіл у початок координат, виставляємо, щоб фреза була у потрібному місці.

									Арк.
									66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

16. Останній крок - вирізаємо плату з текстоліту за допомогою ще одного свердла.

17. Очищуємо плату, прибираємо пил, зашкурюємо наждачкою доріжки, щоб прибрати виступаючі частинки текстоліту і промиваємо водою.

Отримана друкована плата має такий вигляд, як на рис.4.2.

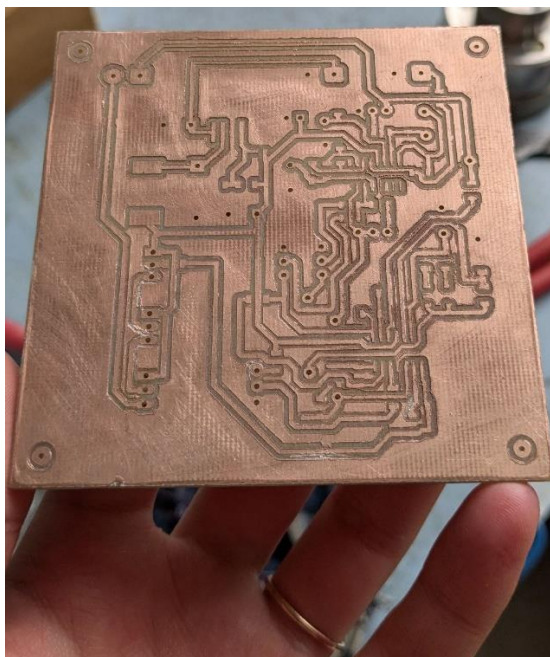


Рис.4.2 Готова плата, доріжки якої виконані фрезеруванням

4.5 Монтаж компонентів на друковану плату

Для монтажу SMD компонентів на друковану плату, виконаємо такі кроки:

1. Підготуємо плату до монтажу компонентів. На даному етапі плату готуємо до роботи, наносимо та розподіляємо на неї спеціальну пасту, або просто припій. Вона наноситься у місцях виведення компонентів.

2. Виконуємо безпосереднє встановлення всіх компонентів на друковану плату.

3. Всі елементи припаюються до друкованої плати за допомогою розплавленого припою і прогріваються місця для контактів паяльником.

4. Зачищаємо поверхню плати від залишків пасту, що знаходяться на

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		68

ній, після чого на поверхню наносимо спеціальне захисне напилення.

Для монтажу звичайних вивідних компонентів:

1. Вставляємо виводи компонентів в спеціальні отвори на друкованій платі.
2. Перевертаємо плату, щоб не бачити компонента, а бачити ніжки виводів.
3. Використовуємо припій у вигляді дроту, підносимо його до ніжки виводу і прогріваємо паяльником, крапля рівномірно розтікається навколо ніжки і компонент припаяно.

Друкована плата на якій здійснено монтаж всіх необхідних компонентів має вигляд зі сторони нанесених доріжок на рис.4.3 та зі зворотного боку на рис.4.4.

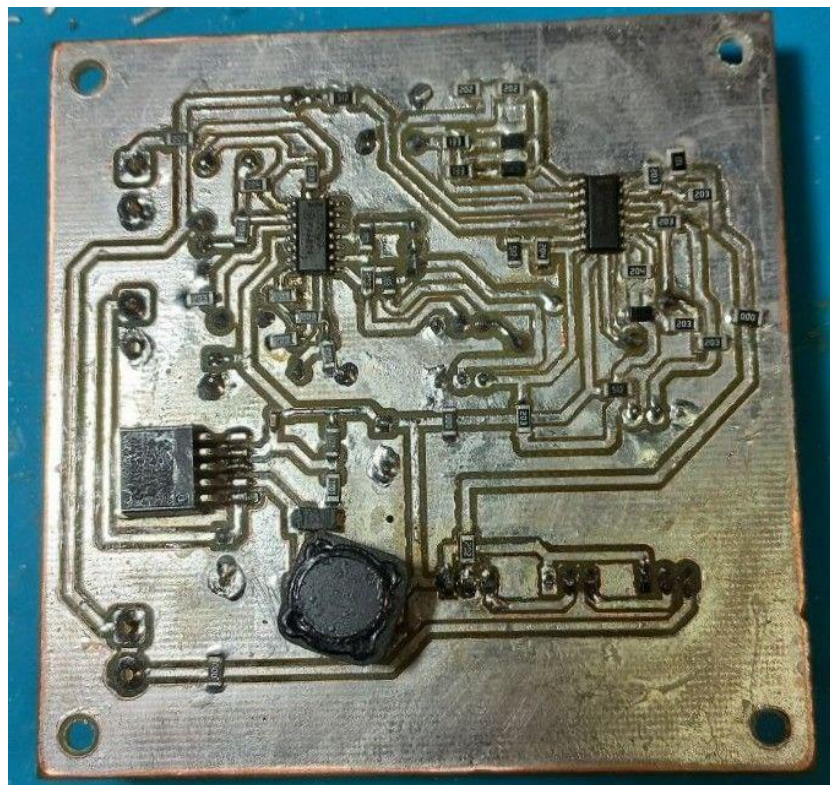


Рис.4.3 Вигляд плати зі сторони з нанесеними доріжками

									Арк.
									69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

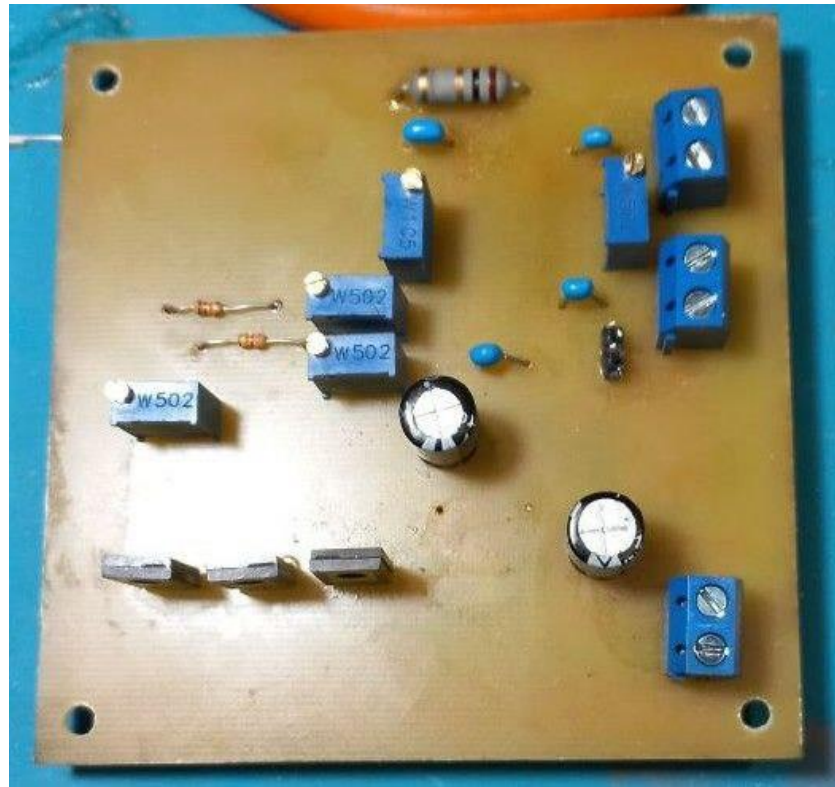


Рис.4.4 Плата з монтажем компонентів зі зворотнього боку

4.7 Конструкторсько-технологічні розрахунки

4.7.1 Розрахунок компонентів друкованої плати

З виразу визначимо мінімальну ширину друкованого провідника по постійному струмові $b_{\min I}$ (мм), для ланцюгів живлення плати та землі:

$$b_{\min I} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}},$$

де I_{\max} – максимально можливий струм у ланцюзі, А;

$j_{\text{доп}}$ – допустима щільність струму для друкованої плати, яка виготовлена методом фрезерування, $j_{\text{доп}} = 5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$;

$t_{\text{пров}}$ – товщина друкованого провідника. Товщина мідного шару складає – 35 мм.

									Арк.
									70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Друкований провідник виготовляється методом фрезерування. Максимально допустимий струм, який може проходити по шині живлення – 30 мА.

Виходячи з цих даних, розрахуємо ширину друкованого провідника по постійному струмові для живлення по формулі (3.1):

$$b_{\min I} = \frac{I_{\max}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,03}{5 \cdot 0,035} = 0,17 \text{ мм}$$

Отримане значення $b_{\min I} = 0,17$ мм наближене до значення класу точності 3, $b_{\min I} = 0,2 - 0,3$ мм. Тому, оптимальна ширина провідника за постійним струмом для ланцюгів живлення та землі складає – 0,2 мм.

4.7.2 Установлення мінімальної ширини провідникової доріжки при заданому падінні напруги на ньому

З допомогою наведеної формули визначимо мінімальну ширину доріжки провідника із заувагою на допустиме значення падіння напруги на мінімальній ширині доріжки провідника:

$$b_{\min} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}},$$

де ρ – питомий опір провідника, виготовленого шляхом фрезерування,

$$\rho = 0,018 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$L_{\text{пров}}$ – довжина, яка характеризує найдовший друкований провідник для друкованої плати, $L_{\text{пров}} = 110,15$ мм

$U_{\text{доп}}$ – коректне прийнятне значення падіння напруги на друкованому провіднику, $U_{\text{доп}} = 0,05 \cdot 24 = 1,2$ В

Знайдемо мінімальну ширину провідника:

$$b_{\min U} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{U_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}} = \frac{0,018 \cdot 0,03 \cdot 110,15}{1,2 \cdot 0,035} = 1,4162 \text{ мм}$$

									Арк.
									71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Обрахована ширина провідника відповідає значенням першого класу точності, навіть маючи певний запас, що є хорошим показником з боку надійності і допустимих струмів, які можуть проходити по провіднику.

4.7.3 Обрахунок діаметра отвору для монтажу компонентів

Для виконання розрахунку монтажного отвору скористаємось формулою:

$$d \geq d_{\text{вс}} + \Delta d_{\text{мо}} + r,$$

де $d_{\text{вс}}$ – діаметр для виводу елемента, для якого саме визначається діаметр монтажного отвору,

$\Delta d_{\text{мо}}$ – граничне мінімально допустиме значення від номінального діаметра отвору МО, $\Delta d_{\text{мо}} = 0,1$ мм,

R – різниця між максимальним діаметром та мінімальним значенням номінального діаметра МО, $r = 0,1 \dots 0,2$ мм.

Звідси випливає, що діаметр монтажного отвору для компонентів матиме значення:

$$d \geq d_{\text{вс}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 1 + 0,1 + 0,2 = 1,03 \text{ мм}$$

4.7.4 Розрахунок параметрів контактної площадки

На рис.4.5 зображено вигляд контактної площадки:

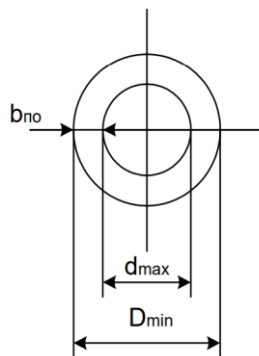


Рис.4.5 Зображення контактної площадки

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Зовнішній, тобто мінімальний ефективний діаметр D_{\min} та внутрішній – максимальний діаметр просвердленого отвору контактної площадки d_{\max} визначається відповідно до формул наведених нижче:

$$D_{\min} = D_{\min1} + 0,05,$$

де $D_{\min1}$ – мінімально допустимий ефективний діаметр контактної площадки у мм,

0,05 – контактний майданчик виготовляють шляхом фрезерування, з врахуванням механічної похибки.

$$D_{\min1} = 2 \left(b_{\text{по}} + \frac{d_{\max}}{2} + \delta_o + \delta_{\text{КМ}} \right),$$

де d_{\max} – максимальний діаметр отвору, який просверлили в друкованій платі, у мм,

$b_{\text{по}}$ – ширина поясу довкола контактної площадки, $b_{\text{по}} = 0,02$ мм,

δ_o – похибка, яка враховує розташування центра отвору відносно вузла координатної сітки, $\delta_o = 0,065$ мм,

$\delta_{\text{КМ}}$ – похибка розміщення центра координатної площадки відносно вузла координатної сітки, $\delta_{\text{КМ}} = 0,055$ мм.

Визначимо максимальний діаметр просвердленого отвору друкованої плати:

$$d_{\max} = d + \Delta d + (0,1 \dots 0,15),$$

де d – номінальний діаметр отвору, у мм,

Δd – допустимий діаметр отвору, $\Delta d = 0,05$ мм.

Тож маємо наступний вираз:

$$d_{\max} = 1 + 0,05 + 0,1 = 1,15 \text{ мм}$$

Таким чином

$$D_{\min1} = 2 \left(0,02 + \frac{1,15}{2} + 0,065 + 0,055 \right) = 1,43 \text{ мм}$$

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Визначимо D_{\min} :

$$D_{\min} = 1,43 + 0,05 = 1,48 \text{ мм}$$

Отримуємо максимальний діаметр контактної площадки:

$$D_{\max} = D_{\min} + 0,02,$$

Звідси:

$$D_{\max} = 1,48 + 0,02 = 1,5 \text{ мм}$$

4.7.5 Визначення мінімально допустимої ширини провідника

Слідуючи формулі, визначимо мінімальну ширину провідника:

$$b_{\min} = b_{\text{пр}}^{\Gamma} + 0,05,$$

де b_{\min} – ширина мінімально допустима, яка може бути у провідника,

$b_{\text{пр}}^{\Gamma}$ – значення з таблиці класу точностей, яке для третього класу

точності,

$b_{\text{пр}}^{\Gamma} = 0,3$ мм, це граничне значення точності для цього класу.

$$b_{\min} = b_{\text{пр}}^{\Gamma} + 0,05 = 0,3 + 0,05 = 0,35 \text{ мм}$$

Максимальну ширину провідника знайдемо з формули:

$$b_{\max} = b_{\min} + 0,02 = 0,35 + 0,02 = 0,37 \text{ мм}$$

4.7.6 Обчислення мінімальної відстані, яка може бути між контактною площадкою і провідником

На рис.4.6 зображено параметри, які впливають на розміри відстані між провідником та контактним майданчиком.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

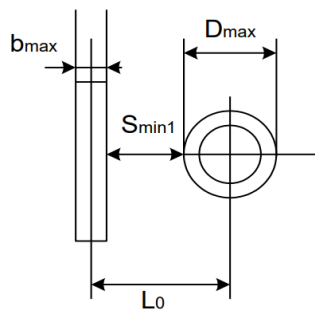


Рис.4.6 Параметри, які мають вплив на відстань між провідником та контакною площадкою

Визначимо мінімальну відстань між двома сусідніми провідниками:

$$L_{\text{ПКМ min}} = L_0 - \left(\frac{D_{\text{max}}}{2} + \delta_{\text{КМ}} + \frac{b_{\text{max}}}{2} + \delta_{\text{ЗП}} \right),$$

де L_0 – відстань, яка пролягає між центрами отворів та друкованим провідником, яка кратна координатній сітці, $L_0 = 1,25$ мм,

D_{max} – максимально допустимий діаметр контактної площадки,

b_{max} – максимально допустима ширина провідника друкованої плати,

$\delta_{\text{КМ}}$ – похибка розміщення центра координатного майданчика відносно вузла координатної сітки, $\delta_{\text{КМ}} = 0,055$ мм,

$\delta_{\text{ЗП}}$ – похибка зміщення координати провідника відносно координатної сітки, $\delta_{\text{ЗП}} = 0,05$ мм.

$$L_{\text{ПКМ min}} = 1,25 - \left(\frac{1,5}{2} + 0,055 + \frac{0,37}{2} + 0,05 \right) = 0,21 \text{ мм}$$

4.7.7 Визначення мінімально допустимої відстані між сусідніми кроями провідників

На рис.4.7 висвітлені параметри мінімальної відстані між кроями провідників:

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

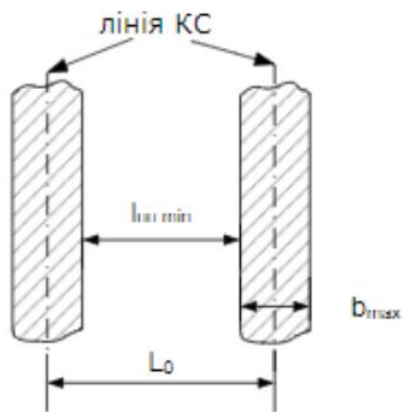


Рис.4.7 Параметри, які впливають на мінімальну відстань між провідником та краями провідників

Відстань між краями провідників визначимо з формули:

$$L_{III \min} = L_0 - (b_{\max} + 2 \cdot \delta_{зП}),$$

Тож,

$$L_{III \min} = 1,25 - (0,37 + 2 \cdot 0,05) = 0,78 \text{ мм}$$

4.7.8 Розрахунок мінімальної відстані між двома контактними площадками

Існують параметри, які впливають на проміжок між контактними майданчиками, ці параметри показані на рис.4.8.

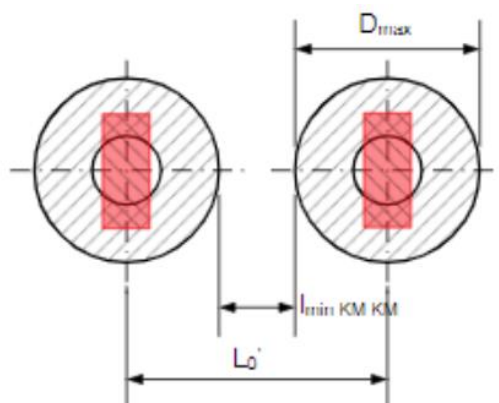


Рис.4.8 Параметри, які мають вплив на проміжок між двома контактними майданчиками

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Визначимо відстань між двома контактними майданчиками за формулою:

$$L_{\text{КМ КМ min}} = L_0 - (D_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{КМ}}),$$

де L_0 – відстань між двома сусідніми центрами координатних майданчиків, $L_0 = 2,5$ мм.

Отримуємо:

$$L_{\text{КМ КМ min}} = L_0 - (D_{\text{max}} + 2 \cdot \delta_{\text{КМ}}) = 2,5 - (1,5 + 2 \cdot 0,055) = 0,89 \text{ мм}$$

Можна зробити висновок, що значення, отримані у результаті, задовільняють умови третього класу точності.

4.8 Проектування друкованої плати у програмному середовищі KiCad

Програмне середовище KiCad представляє безліч можливостей для моделювання та створення односторонніх, чи двосторонніх плат. Дане середовище проектування має багато інструментів корисних для описаних цілей. У KiCad є змога промодельювати готову плату у 3D-виді, тому для даної роботи, цей інструментарій підходить бездоганно. Середовище KiCad забезпечує основні етапи побудови та моделювання готової друкованої плати, а саме:

1. Створення власної бібліотеки з електронними компонентами.
2. Створення бібліотеки для посадкових місць.
3. Розробка принципової електричної схеми.
4. Трасування друкованої плати та 3D-моделювання готового виробу.

Для розробки та моделювання друкованої плати були здійснені наступні кроки:

1. Розробка нового проекту:

Для цього у програмі KiCad відкриваємо вкладку «File» і робимо новий проект. Даємо йому назву та розташовуємо у потрібній папці. Варто наперед зробити теку, яка міститиме всі пов'язані з проектом документи.

2. Створення власної бібліотеки з електронними компонентами:

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ	

Програмне середовище KiCad дає можливість юзерам використовувати, як вже готові компоненти, так і створити свої власні. Для другого варіанту переходимо у вкладку «File», натискаємо на поле «Створити новий символ» та задаємо характеристики майбутньому електричному компоненту, такі як: назву, номери виводів, тип корпусу і т.д. Розробляємо графічні зображення тільки відповідно до стандартів

ГОСТ, розміщуємо виводи компонентів у правильних місцях і називаємо їх. Зберігаємо готовий компонент у бібліотеці компонентів. Так само створюємо всі інші необхідні елементи.

3. Організація бібліотеки посадкових місць:

Для цього генеруємо нову бібліотеку у вкладці «File», за допомогою поля «Нова бібліотека», створюємо нове посадкове місце за допомогою кнопки «Створити нове посадкове місце», або ж використовуємо для цього комбінацію клавіш $CTR+N$. Потім задаємо розміри контактному майданчику, згідно розрахунків та створюємо контур компонента на шарі з силскріну, по іншому називається «Silkscreen». Зберігаємо у бібліотеці нове посадкове місце.

4. Розробка принципової електричної схеми:

Безпосередньо розробка електричної принципової схеми відбувається у схемотехнічному редакторі під назвою «Eeschema». Тому переходимо туди та розміщуємо електронні компоненти на полотні з власної та наявної бібліотеки. З'єднуємо компоненти відповідно до схеми, використовуючи інструмент «Place wire». Розташовуємо все у зручних позиціях та задаємо кожному компоненту номінали. Призначаємо посадкові місця для кожного символу з створеної бібліотеки «Symbol Properties». Перевіряємо на валідність всі електричні з'єднання, які були здійснені та генеруємо список з'єднань.

5. Створення друкованої електричної плати:

Для проектування друкованої плати використовуємо редактор «PCB Editor», тому переходимо туди. Першим кроком імпортуємо список з'єднань із редактора «Eeschema». Маючи розміри друкованої плати створюємо контур на

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата		78

шарі «Edge.Cuts». Враховуючи певні обмеження, а саме технологічні та конструктивні, розміщуємо компоненти на визначеному полотні. Для спрощення травмування, виконуємо його автоматично і підправляємо відповідно до власних побажань. Робимо отвори відповідно до розрахунків та перевіряємо на помилки трасування. Для того, аби побачити майбутній готовий виріб, робимо 3D-візуалізацію, зображену на рис.4.9.

6. Генерація готових специфікацій:

За допомогою програмного середовища KiCad генеруємо гербер-файли, які мають у собі інформацію про топологію провідникових доріжок. Створюємо файл, що має інформацію про кількість та розміри отворів. І врешті-решт створюємо автоматичну специфікацію з необхідними компонентами, які будуть використані при виготовленні друкованої плати.

7. Розробка конструкторської документації:

У вже відомому нам редакторі «PCB Editor» створюємо креслення для друкованої плати. Зазначаємо розміри отворів на платі та власне розміри плати. Експортуємо готовий проект для додавання до загальної документації. Використовуємо інструмент «Plot», і генеруємо PDF-файл.

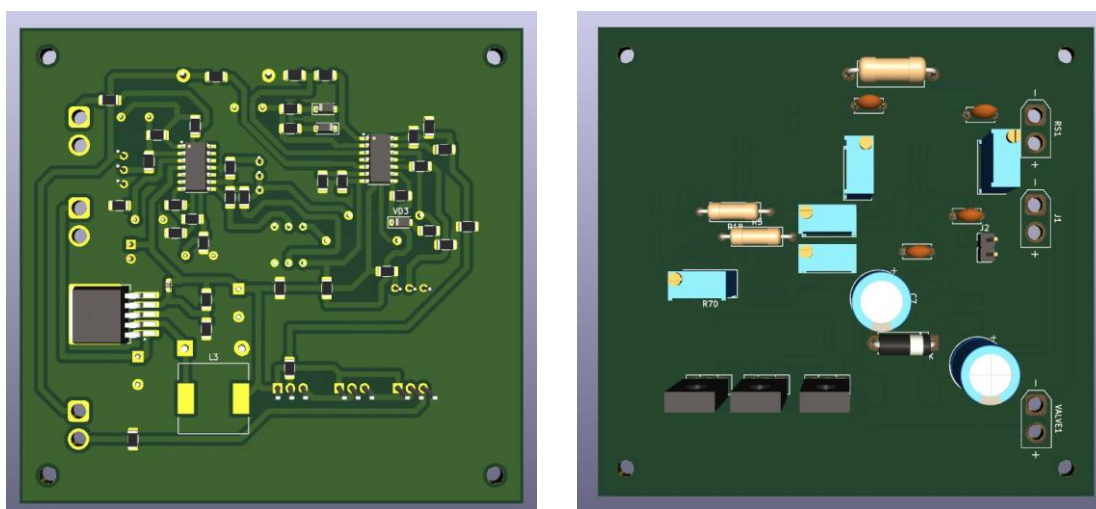


Рис.4.9 Драйвер виконавчого пристрою

4.9 Електричний розрахунок друкованої плати

Ємнісний та індуктивні зв'язки у провідниках з'являються внаслідок зменшення геометричних розмірів конструктивно-технологічних компонентів та у результаті збільшення щільності посадки компонентів на друкованій платі між сигнальними провідниками, це причини через які на друкованій платі наявні ці зв'язки. Завади – основна проблема на сусідніх сигнальних провідниках, яка з'являється завдяки перемиканню компонентів по різних сигнальних ланцюгах, по яких у цей самий час тече високочастотний імпульсний струм, що має високі фронти, а при існуючих паразитних зв'язках, ці струми утворюють завади, таким чином обумовлюючи виникнення випадкових спрацювань на дискретних елементах.

Небажані приховані ємності та індуктивності, які присутні у високочастотних колах називаються паразитні реактивності. До таких паразитних реактивностей належать: ємності, котрі знаходяться між контактними майданчиками та землею, шаром шини живлення та провідними доріжками; індуктивності, які створені довжиною виводів ніжок певних компонентів та протяжними доріжками; вплив також має взаємодія між перехідними отворами та зокрема й інші чинники плати. Важливим завданням є забезпечення низьких значень перешкод, адже необхідно, щоб рівень завад не перевищував норму.

Затримка включення схеми – це саме те, у чому виражається дія паразитних ємностей та індуктивностей сигнального електричного кола. Час на який потрібно зробити затримку обумовлюється струмом, навантаженням а також опором сигнального провідника.

Задля здійснення точної оцінки наслідків паразитних індуктивностей та ємностей, далі проведено електричний розрахунок друкованої плати.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.9.1 Обчислення падіння напруги на найдовшому друкованому провіднику

За допомогою формули розрахуємо падіння напруги на найдовшому провіднику:

$$U_{пад} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{b_{np} \cdot t_{np}},$$

де ρ – питомий об'ємний опір для плати, яка виготовлена методом фрезерування, $\rho = 0,018 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

I_{max} – максимально можливий струм у ланцюзі, $I_{max} = 30 \text{ мА}$;

t_{np} – товщина друкованого провідника. Товщина мідного шару складає – 35 мм;

b_{np} – мінімально допустима ширина друкованого провідника, $b_{np} = 0,35 \text{ мм}$;

l_{np} – максимально допустима довжина друкованого провідника, $l_{np} = 110,15 \text{ мм}$.

Звідси, падіння напруги складає:

$$U_{пад} = \frac{0,018 \cdot 0,03 \cdot 0,11015}{0,00035 \cdot 0,035} = 4,86 \text{ В} = 486 \text{ мВ}$$

Розраховане значення падіння напруги складає близько 5% від напруги живлення.

4.9.2 Розрахунок потужності втрат односторонньої друкованої плати

За допомогою формули , визначимо значення втрат на друкованій платі:

$$P_{втр} = 2\pi f C E_n^2 \tan \sigma,$$

де f – одиниця, бо розрахунок проводиться для постійного струму;

$\tan \sigma$ - тангенс кута діелектричних втрат для матеріалу з якого зроблена друкована плата, $\tan \sigma = 0,002$, матеріал друкованої плати – FR4;

C – ємність друкованої плати, яка обраховується по формулі:

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C = \frac{0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h},$$

де ε - діелектрична стала проникності, $\varepsilon = 4,5$ для матеріалу FR4;

S_m - площам металізації на друкованій платі, мм;

h - товщина друкованої плати;

Отож отримуємо:

$$C = \frac{0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_m}{h} = \frac{0,009 \cdot 4,5 \cdot 56,2}{1,5} = 1,52 \text{ нФ.}$$

Таким чином потужність втрат:

$$P_{втр} = 2\pi f C E_n^2 \tan \sigma = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 1,72 \cdot 120 \cdot 0,002 \approx 2,59 \text{ мкВт}$$

4.9.3 Визначення значення ємності між двома провідниками, що знаходяться по сусідству і мають однакову ширину

Ширина між двома сусідніми провідниками знаходиться з формули:

$$C = 0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{np} \cdot \left[\log \frac{2S}{b_{np} + t_{np}} \right]^{-1},$$

де ε - діелектрична стала проникності, $\varepsilon = 4,5$ для матеріалу FR4;

l_{np} - довжина взаємного перекриття для двох паралельних провідників, мм;

S - відстань між двома паралельними провідниками, мм;

b_{np} - мінімально допустима ширина друкованого провідника, $b_{np} = 0,35 \text{ мм}$;

t_{np} - товщина друкованого провідника. Товщина мідного шару складає – 35 мм;

$$C = 0,12 \cdot 4,5 \cdot 31,57 \cdot \left[\log \frac{2 \cdot 0,357}{0,35 + 0,035} \right]^{-1} = 6,355 \text{ нФ}$$

											Арк.
											82
Змн.	Арк.	№ докум.	Пілпис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ						

4.9.4 Розрахунок величини взаємної індуктивності двох паралельних провідників, котрі мають однакову довжину

Цей розрахунок взаємної індуктивності між двома паралельними провідниками можна виконати за допомогою формули:

$$M = 0,02 \cdot \left(l_{np} \cdot \log \frac{\sqrt{l_{np}^2 + L_0^2} + l_{np}}{L_0} - \sqrt{l_{np}^2 + L_0^2} + L_0 \right),$$

де l_{np} – довжина взаємного перекриття для двох паралельних провідників, см;

L_0 - значення відстані між центральними лініями двох паралельних провідників, см.

$$M = 0,02 \cdot \left(31,57 \cdot \log \frac{\sqrt{0,03^2 + 0,03^2} + 31,57}{0,03} - \sqrt{31,57^2 + 0,03^2} + 0,03 \right) = 1,277 \text{ нГн.}$$

4.10 Розробка корпусу для пристрою

Для розробки корпусу для друкованої плати драйвера виконавчого пристрою використаємо програмне середовище SolidWorks.

Проектуємо окремі частини корпусу згідно розмірів плати.

Кришка до корпусу виглядає так, як показано на рис.4.10.

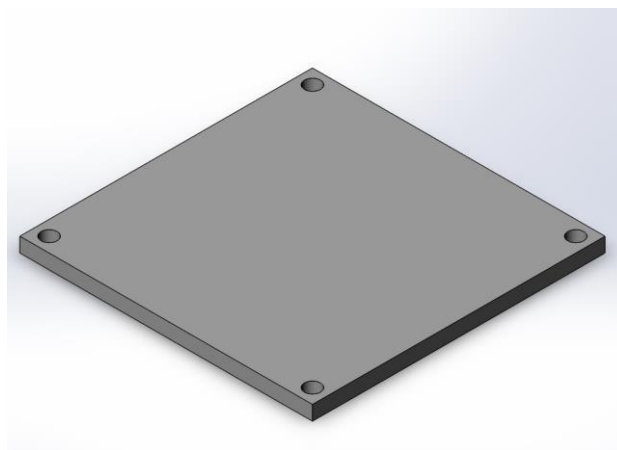


Рис.4.10 Кришка для корпусу пристрою

									Арк.
									83
Змн.	Арк.	№ докум.	Піппис	Дата	ДЕ11.111811.000 ПЗ				

Корпус без кришки має вигляд, як на рис.4.11.

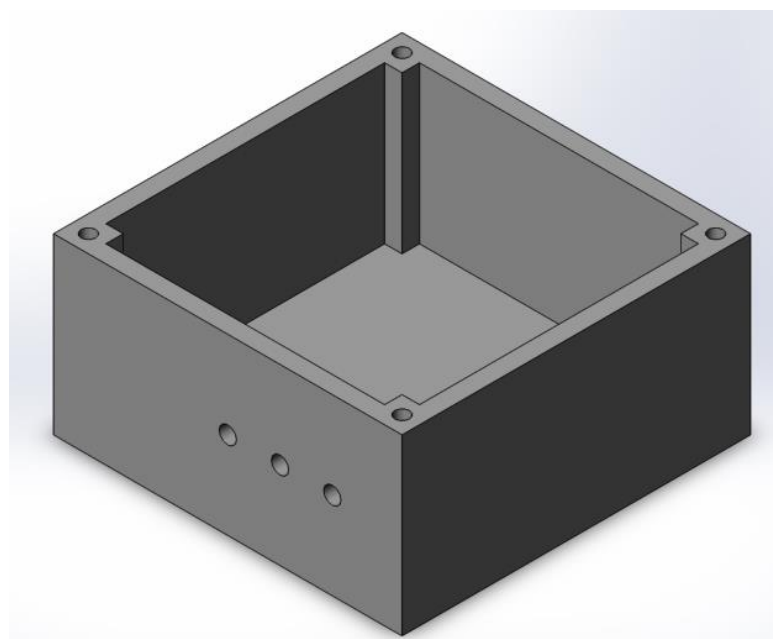


Рис.4.11 Корпус для друкованої плати

Креслення кришки зображено на рис.4.12:

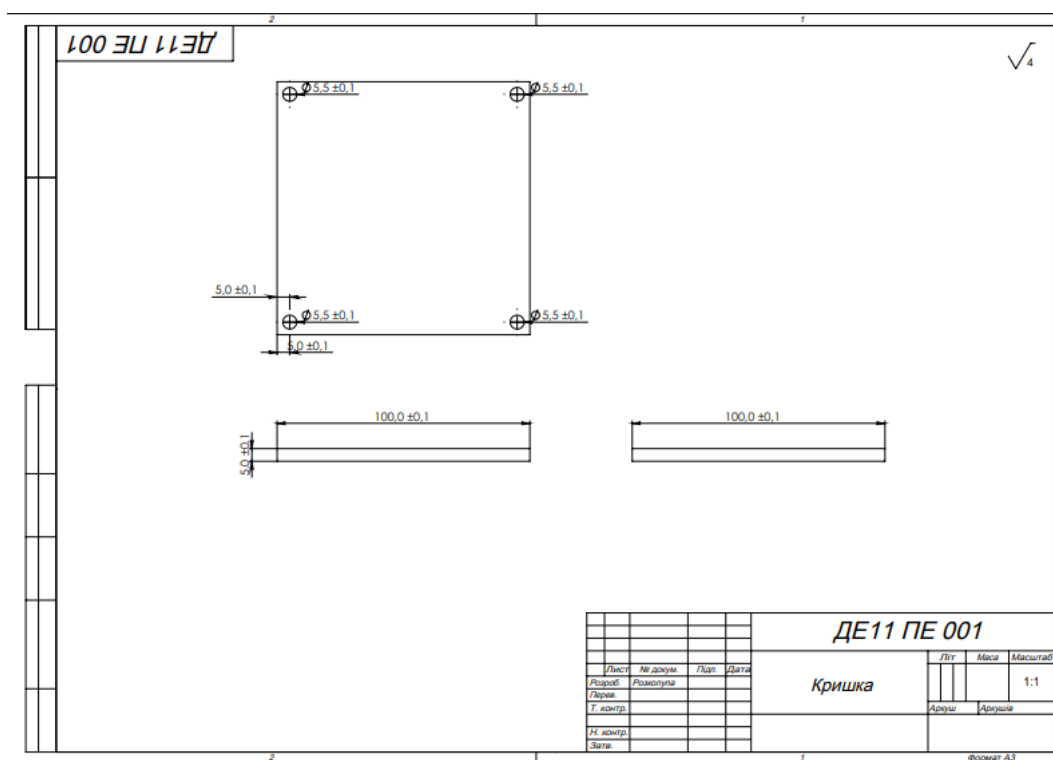


Рис.4.12 Креслення кришки для корпусу

Креслення корпусу представлено на рис.4.13.

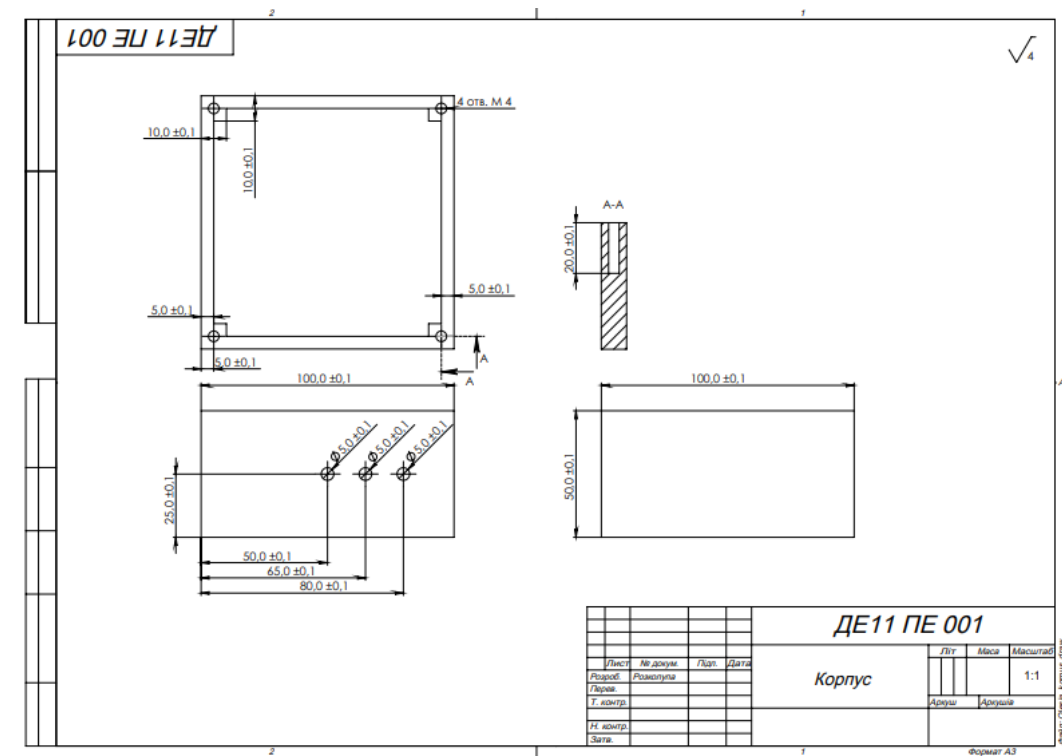


Рис.4.13 Креслення корпусу

Висновок до розділу

У четвертому розділі було детально розглянуто процес проектування та виготовлення друкованої плати драйвера виконавчого пристрою — від вибору матеріалу, класу точності та технології виготовлення до оптимізації розміщення елементів. Виконано конструкторсько-технологічні розрахунки, які охоплювали визначення мінімальних ширин доріжок, міжвивідних відстаней, розмірів контактних майданчиків та отворів для монтажу компонентів. Використання середовища KiCad дозволило створити проєкт плати, що відповідає як сучасним вимогам промислового стандарту, так і умовам ручного або ЧПУ-виготовлення.

Завдяки системному підходу до проектування вдалося виготовити макет, який тестувався. Таким чином, друкований вузол забезпечує компактність, а головне — стабільну роботу драйвера в лабораторних умовах.

5. МОДЕЛЮВАННЯ КРИТИЧНИХ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЧАСТИНИ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ, А САМЕ ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАПРУГИ

5.1 Робота понижуючого перетворювача при стандартних умовах роботи

Вхідні параметри понижуючого DC-DC перетворювача:

1. Вхідна напруга: 24 В;
2. Вхідний струм: $\sim 0,16$ А (залежно від навантаження);
3. Вхідна потужність: $\sim 3,84$ Вт;
4. Частота роботи: 150 кГц;

Вигляд системи до початку подачі живлення на неї представлено на рис.5.1.

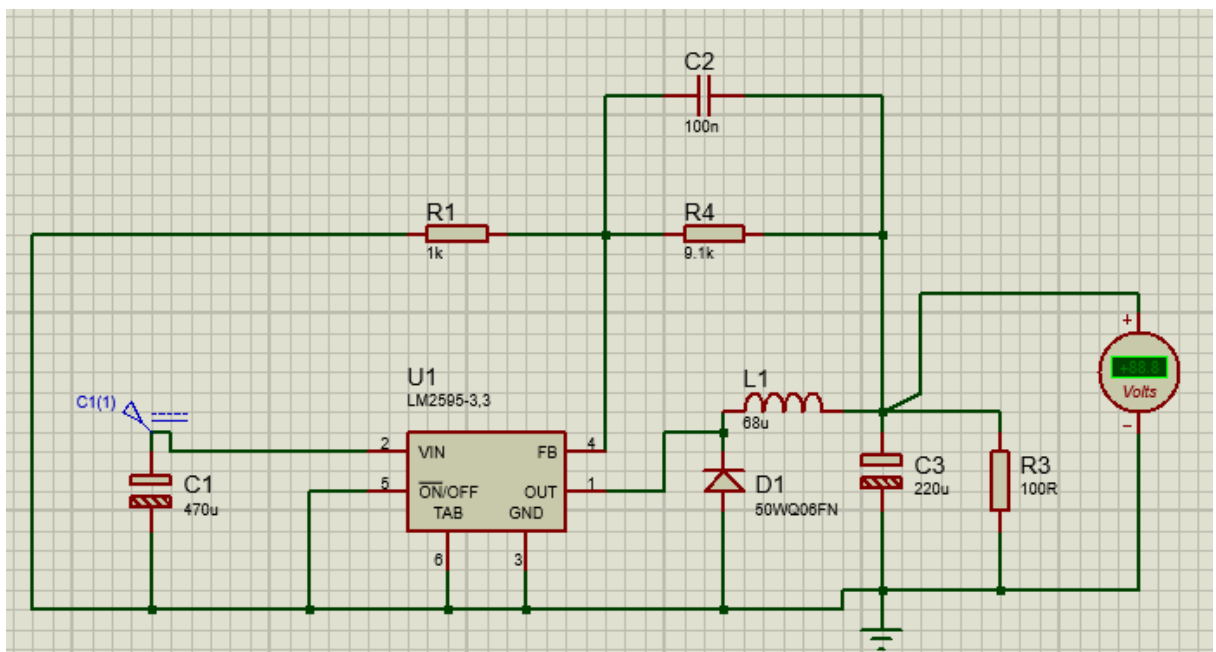


Рис.5.1 Система у стані спокою

Робота системи в нормальному стані, на виході отримуємо 12 В зображена на рис.5.2:

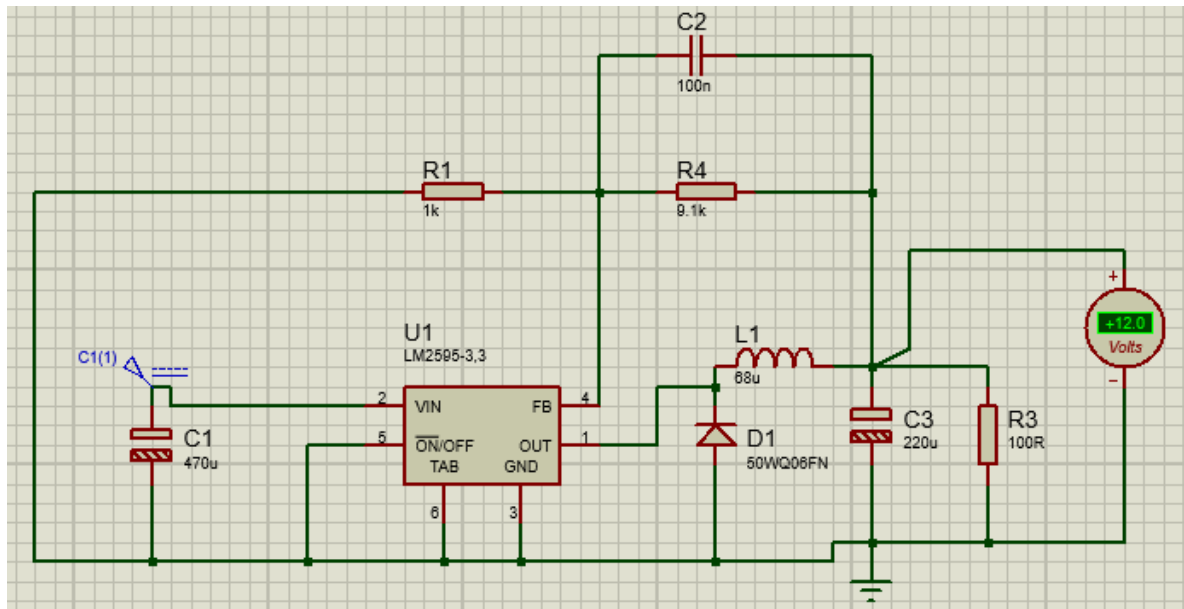


Рис.5.2 Система при роботі в нормальному стані

5.2 Робота перетворювача напруги при вилученні резисторів

Робота системи, якщо перегорить резистор R1, або R4 з дільника напруги. Якщо вилучити R1, напруга на виході впаде, на це є ряд причин: залишковий заряд конденсаторів, індуктивність L1 тимчасово підтримує напругу, внутрішні особливості стабілізації LM2595. Якщо вилучити R4, схема взагалі не працює, адже на вході FB немає необхідного сигналу.

Робота понижуючого перетворювача напруги при вилученні резистора представлена на рис.5.3.

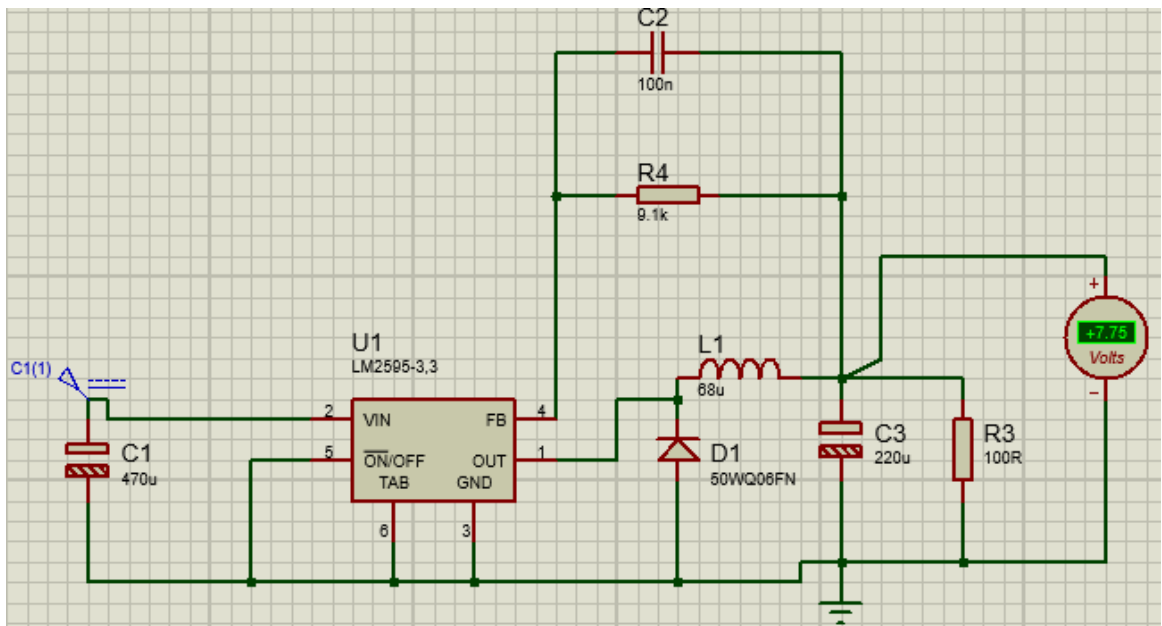


Рис.5.3 Робота системи при вилученні резистора R1

Якщо вилучити резистор R4, система працюватиме, як на рис.5.4:

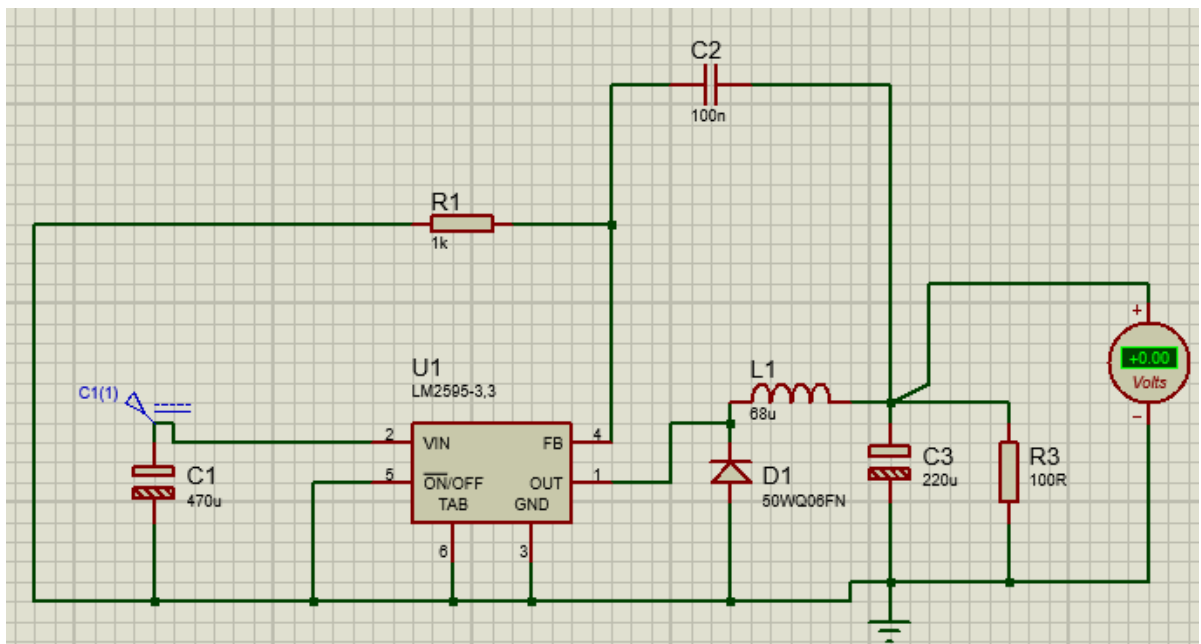


Рис.5.4 Робота системи при вилученні резистора R4

5.3 Робота перетворювача при обриві діода Шотткі

Якщо станеться обрив діода Шотткі, то робота понижуючого перетворювача напруги буде виглядати наступним чином(5.5).

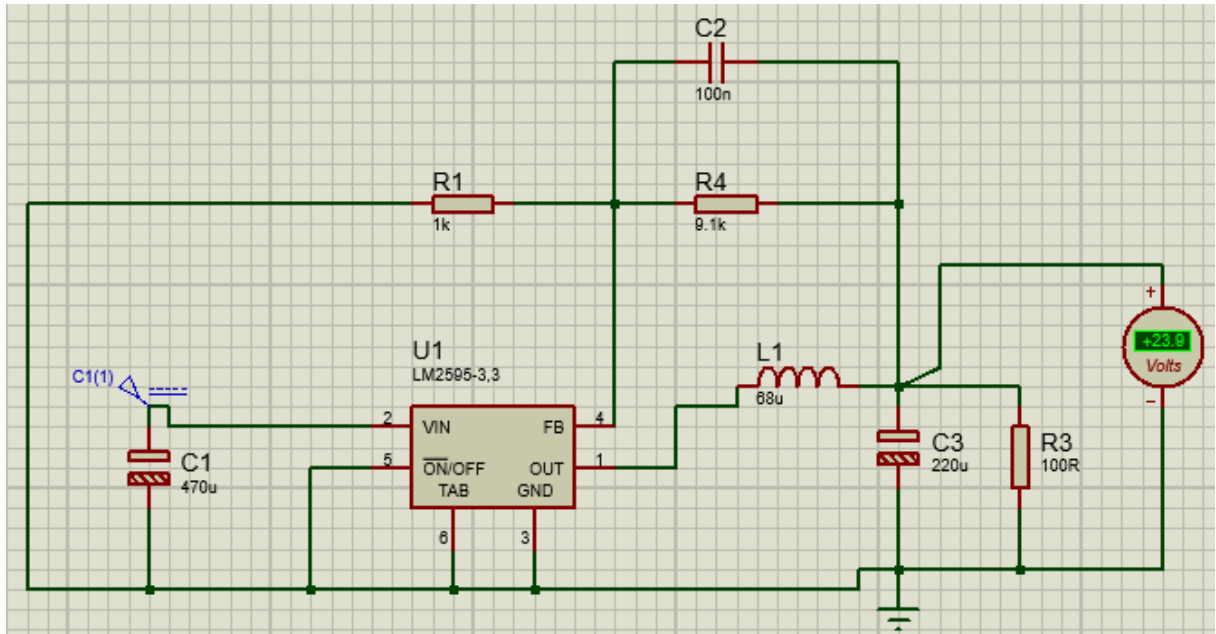


Рис.5.5 Обрив діода Шотткі

При обриві діода D1 вихідна напруга піднялася до ~24 В, це може бути пов'язано з тим, що LM2595 перейшов у нерегульований режим через відсутність випрямлення струму на виході. Діод D1 (Шотткі 50WQ06FN) виконує важливу функцію – забезпечує шлях для струму індуктивності під час закриття ключа у LM2595. Без нього енергія, накопичена в L1, не може розрядитися на вихід, що порушує нормальну роботу стабілізатора. У правильних умовах при обриві D1 вихідна напруга мала б зменшитися до 0 В або значно впасти. Однак у вашому випадку вона стала рівною вхідній (24 В), що свідчить про те, що LM2595 перестав працювати як імпульсний стабілізатор і фактично передає вхідну напругу напряму на вихід. Це може статися, якщо мікросхема переходить у неробочий або лінійний режим, коли відсутня нормальна комутація індуктивності.

Висновок до розділу

У п'ятому розділі було проведено моделювання роботи понижуючого перетворювача напруги в умовах стандартного режиму, а також у випадках відмови окремих компонентів, таких як резистори та діод Шотткі. За результатами моделювання підтверджено відповідність схеми основним вимогам стабільності та безпеки — зокрема, схема демонструє здатність утримувати вихідну напругу у допустимих межах при зміні навантаження. Аналіз показав, що у штатному режимі перетворювач має стабільні параметри, а ефективність перетворення залишається високою завдяки правильно підібраним номіналам елементів.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту розроблено драйвер для керування пропорційним електромагнітним клапаном. У першому розділі проаналізовано принцип роботи електронно-променевих гармат, типи пропорційних клапанів і сформульовано технічні вимоги до системи керування, серед яких: лінійність, швидкодія, обмеження струму, чутливість до невеликих сигналів і повне запирання клапана.

Другий розділ присвячено аналізу методів керування. Встановлено, що для цієї задачі доцільно використовувати аналогову схему, операційними підсилювачами та обмеженням струму, що забезпечує стабільність, енергоефективність і простоту реалізації.

У третьому розділі виконано схемотехнічне проєктування пристрою, розроблено принципову електричну схему та обґрунтовано вибір компонентів, які забезпечують стабільну подачу струму на електромагнітний механізм.

У четвертому розділі спроектовано друковану плату у середовищі KiCad. Обрано односторонню плату FR-4, розраховано ширини доріжок, падіння напруги й теплові втрати. Макет виготовлено фрезеруванням на ЧПУ з урахуванням зручності обслуговування та охолодження. Також у конструкції враховано фізичні особливості виконавчого механізму.

У п'ятому розділі проведено моделювання роботи блоку живлення в Proteus. Перевірено поведінку при стандартній роботі та при імітації відмов компонентів. Схема показала стабільність, надійність і стійкість до короткочасних проблем.

У підсумку, розроблений пристрій відповідає технічному завданню, відзначається простотою реалізації, доступною собівартістю та високою надійністю. Уся необхідна конструкторська документація надана у складі пояснювальної записки.

					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

26. Гусак В.В. Системи цифрового керування в промисловій автоматизації / В. В. Гусак. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 314 с.
27. Білан С. О. Основи автоматичного регулювання та керування технологічними процесами / С. О. Білан. – Київ : Каравела, 2012. – 264 с.
28. Кравчук М. А. Цифрові системи керування : навч. посіб. / М. А. Кравчук. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 312 с.
29. Бачинський А. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв / А. В. Бачинський. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – 328 с.
30. Лавріненко І. П. Електронні компоненти і пристрої : навч. посіб. / І. П. Лавріненко. – Київ : КНУТД, 2013. – 288 с
31. Головка С. П. Аналогова схемотехніка: основи проектування / С. П. Головка. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 304 с.
32. Бучко І. М. Системи автоматичного керування: теорія і практика / І. М. Бучко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – 416 с.
33. Олійник А. П. Системи автоматичного керування електроприводами : навч. посіб. / А. П. Олійник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2018. – 287 с.
34. Петренко В. М. Промислові системи автоматизації : навч. посіб. / В. М. Петренко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 234 с.
35. Іванов С. К. Аналогові електронні схеми : навч. посіб. / С. К. Іванов. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 198 с.
36. Системи автоматичного регулювання : навч. посіб. / за ред. В. І. Бондаренка. – Київ : Техніка, 2018. – 345 с.
37. Коваленко Д. А., Семенов Р. Г. ПІД-регулятори в системах управління : навч. посіб. / Д. А. Коваленко, Р. Г. Семенов. – Дніпро : ДНУ, 2019. – 167 с.
38. Левченко О. М. Транзисторні підсилювачі потужності : навч. посіб. / О. М. Левченко [та ін.]. – Київ : Каравела, 2020. – 289 с.

						<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			94

39. Силова електроніка в системах управління : навч. посіб. / за ред. А. В. Морозова. – Харків : Основа, 2018. – 312 с.
40. Кравченко О. П. Гідро- та пневмоприводи з електронним управлінням : навч. посіб. / О. П. Кравченко. – Одеса : ОНМУ, 2019. – 234 с.
41. Федоров К. І., Антонов В. С. Електромагнітні виконавчі пристрої : навч. посіб. / К. І. Федоров, В. С. Антонов. – Київ : НАУ, 2020. – 178 с.
42. Григоренко А. С. Швидкодіючі електромагнітні системи : навч. посіб. / А. С. Григоренко. – Дніпро : Системні технології, 2018. – 156 с.
43. Романенко К. С. Вимірювання електричних величин у системах автоматики : навч. посіб. / К. С. Романенко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2019. – 201 с.
44. Якименко Г. В. Прецизійні вимірювальні пристрої : навч. посіб. / Г. В. Якименко [та ін.]. – Харків : Колегіум, 2021. – 189 с.
45. Мельник В. І. Операційні підсилювачі та їх застосування : навч. посіб. / В. І. Мельник. – Львів : НУ «ЛП», 2018. – 234 с.
46. Тарасов І. Г., Володимиров П. Т. Фільтри в електронних схемах : навч. посіб. / І. Г. Тарасов, П. Т. Володимиров. – Київ : Техніка, 2020. – 167 с.
47. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. / за ред. О. М. Костенка. – Київ : Вища школа, 2019. – 398 с.
48. Шевченко В. О. Стійкість систем автоматичного регулювання : навч. посіб. / В. О. Шевченко. – Харків : ХНАДУ, 2018. – 234 с.
49. Подригало М. А. Синтез систем управління технічними об'єктами : навч. посіб. / М. А. Подригало [та ін.]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 289 с.
50. Бондаренко В. М. Сучасні драйвери електромагнітних пристроїв : навч. посіб. / В. М. Бондаренко. – Одеса : ОДАБА, 2019. – 178 с.
51. Кузьмінський О. Д. Надійність електронних систем управління : навч. посіб. / О. Д. Кузьмінський. – Київ : КНУ, 2021. – 201 с.
52. Костенко П. Р. Джерела живлення для систем автоматики : навч. посіб. / П. Р. Костенко [та ін.]. – Київ : Техніка, 2019. – 245 с.

						<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			95

53. Семенов А. В. Стабілізатори напруги в електронних пристроях : навч. посіб. / А. В. Семенов. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 178 с.

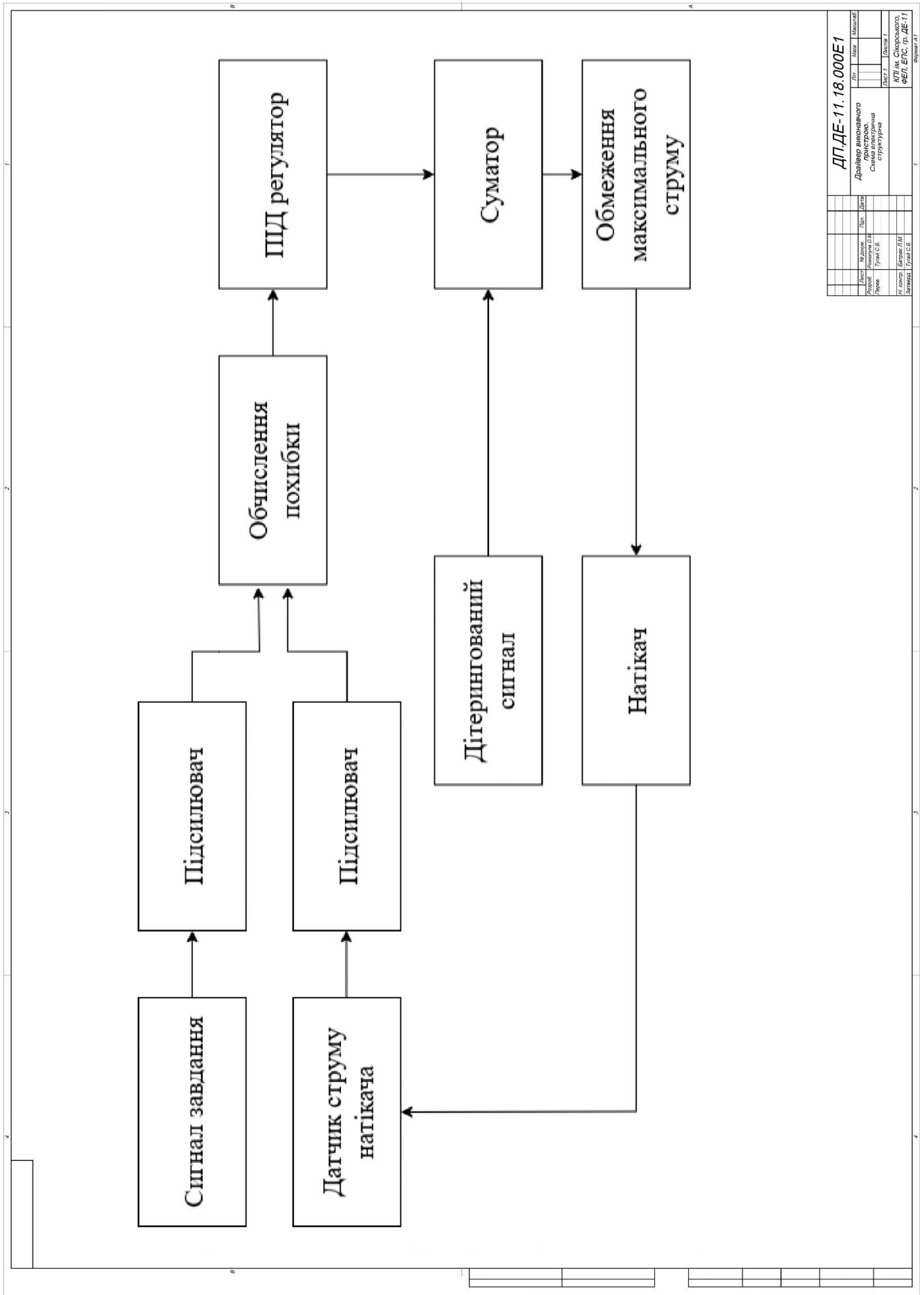
54. Системи електроживлення промислової електроніки : навч. посіб. / за ред. С. М. Іванова. – Дніпро : ДНУ, 2021. – 201 с.

55. Блок керування пропорційним клапаном гідравлічної системи. Артикул: UPK [Електронний ресурс] // Авторські модулі : [вебсайт]. — Режим доступу: <https://avtorskiemoduli.com/UPK/> — Назва з екрана.

56. Цифровий блок керування пропорційним клапаном, керування джойстиком. Артикул: UPKv4 [Електронний ресурс] // Авторські модулі : [вебсайт]. — Режим доступу: <https://avtorskiemoduli.com/UPKv4/> — Назва з екрана.

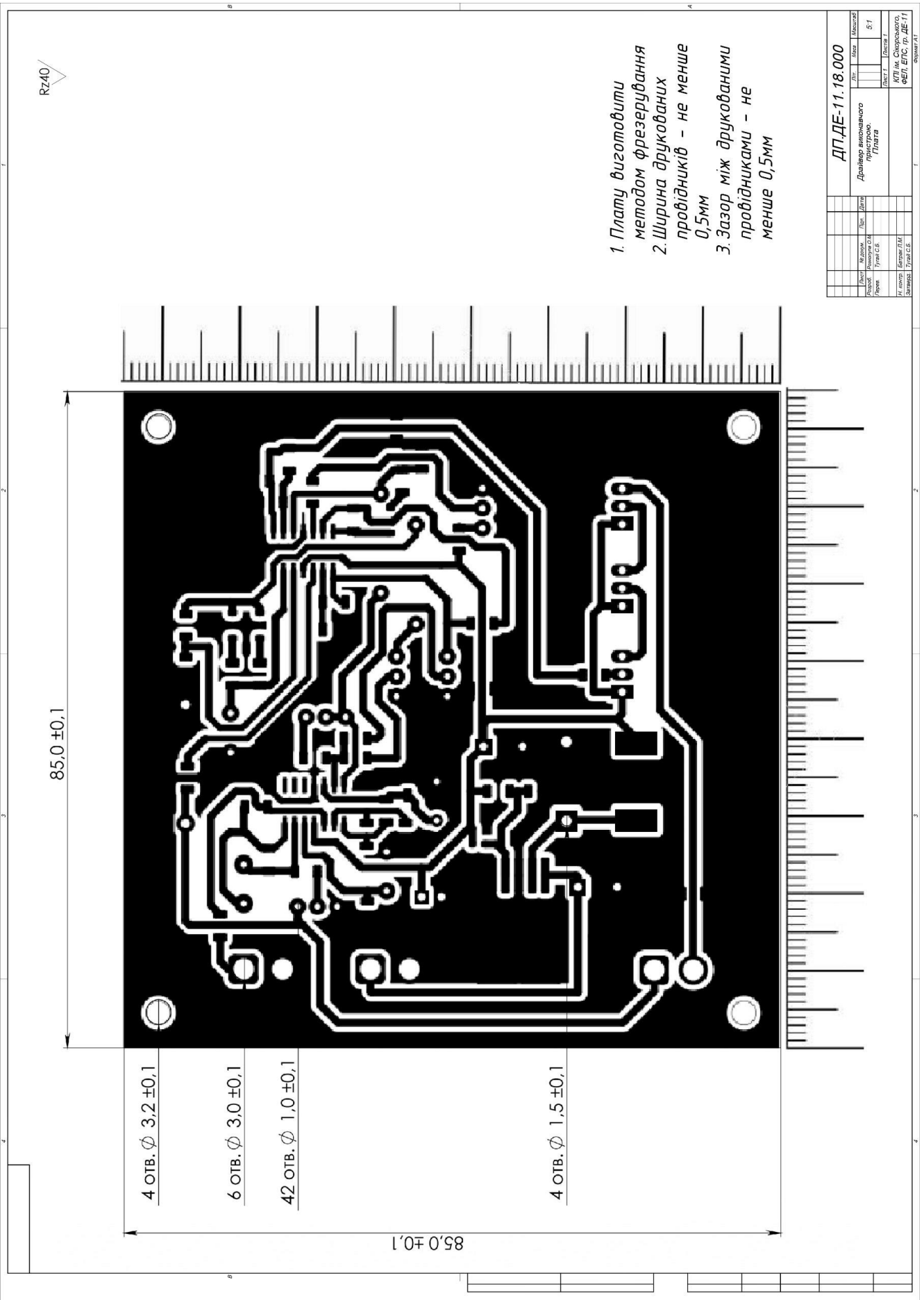
					<i>ДЕ11.111811.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

Додаток А. Схема електрична структурна



ДП ДЕ-11.18.000Е1			
Довідер виконавчого		Лист	Корект
Схеми електричної структури		Розробка ОМ	Дата
Лист	№ докум.	Лист	Корект
Розроб.	Розроб. С.Е.	Лист 1	Лист 1
Згод.	Відп. Д.І.	Лист 1	Лист 1
Згод.	Відп. С.Е.	Лист 1	Лист 1
КП Ім. Скоромого, ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-11			
Формат А1			

Додаток В. Друкована плата



Додаток Г. Перелік елементів

Позначення	Найменування		Кільк.	Примітки
	Резистори			
R1, R2, R22	2 кОм ±5%		3	
R3, R4	13 кОм ±5%		2	
R5, R23, R21, R22	10 кОм ±5%		4	
R69, R35, R70, R14	5 кОм ±5%		6	
R42, R16,	200 кОм ±5%		3	
R17,	20 кОм ±5%		10	
R7, R13, R15, R14	20 кОм ±5%		5	
R18	20 кОм ±5%		1	
R34	1МОм 20 кОм ±5%		1	
R11	9,1 кОм ±5%		1	
R6	1 кОм ±5%		1	
R12	1 Ом 20 ±5%		1	
	Мікросхеми			
U1, U2	LM324DR2G		2	
U3	LM2596S-3.3		1	
	Індуктивності			
L3	68 мкГн ±10%		1	
	Транзистори			
VT1, VT2, VT3	2SD882P		3	
Із м	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Розколула О.М			
Перевір	Тугай С.Б			
Н.контр	Батрак Л.М			
Затверд	Тугай С.Б			
ДП.ДЕ11.1118.000 ПЕЗ				
Драйвер виконавчого пристрою. Перелік елементів			Літ.	Лист
			1	2
КПІ ім. І.Сікорського, ФЕЛ, ЕПС, гр. ДЕ-11				

S U M M A R Y

Driver of Actuator

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization *Electronic Devices and Systems*. Rozkolupa Olesia Nikolaevna. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-11. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. – 97 p., Ill. 36, tables 5.

This diploma project is devoted to the design and implementation of an analog driver intended for use with a proportional electromagnetic valve that regulates gas flow in electron-beam equipment. The system under development forms part of the control loop for an electron beam gun, a critical component in various scientific and industrial technologies, including electron beam welding, lithography, and materials processing. The primary objective of the project is to ensure high precision, stable operation, and fast dynamic response of the valve in order to improve overall system efficiency and control quality.

The theoretical section of the work provides a comprehensive analysis of electron beam formation mechanisms, the importance of gas control via proportional valves, and a comparative review of analog and digital valve control methods. The analog approach was chosen as the most appropriate in this context, mainly due to its inherent advantages such as simplicity, fast reaction time, and high accuracy of current regulation. In many high-frequency or high-stability applications, analog systems outperform digital counterparts by reducing latency and minimizing signal processing overhead.

The hardware part of the project consists of a carefully designed analog driver circuit, optimized for stability, efficiency, and protection. Special attention was given to maintaining stable current regulation through the valve coil, implementing

current limiting to protect the power stage, and addressing the issue of valve "sticking" that may occur during prolonged or high-load operation. The selected components for the circuit were evaluated based on criteria such as thermal stability, reliability, and energy efficiency, ensuring long-term performance under industrial conditions.

An integral part of the design was the voltage converter module, responsible for generating a stable supply voltage for the analog driver. This module was developed and validated through simulation to ensure consistent performance and low electromagnetic interference. The complete schematic was created using KiCad software, which enabled adherence to industrial PCB design standards and ensured accurate component placement and trace routing. To validate the design, the circuit was simulated in the Proteus environment under both normal and fault conditions. These simulations confirmed that the driver operates reliably and remains robust against component failures or external disturbances.

The final outcome of the diploma work is a cost-effective, energy-efficient analog driver tailored to the needs of modern electron beam systems. Its application allows for precise gas flow regulation, which is crucial for achieving accurate beam control and high-quality processing results. The practical significance of the work lies in its potential use in industrial and research setups where electron beam technology is applied.

This project demonstrates the integration of theoretical knowledge with practical electronic engineering skills. It offers a balanced combination of analog electronics, circuit simulation, and printed circuit board design. The driver developed can serve as a foundation for further enhancement, including hybrid analog-digital systems or integration into larger automated control systems.

Keywords: proportional valve, driver, electron beam, voltage converter, analog control, PCB design.