

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення електромеханічних вузлів електроерозійного ЧПУ верстата
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КТРСМ-22-2

Зибенко О. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Разумов-Фризюк Є. А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

17.01.2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'O. O. Zibenko', with a long horizontal stroke extending to the right.

Зибенко О. О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

«» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Зибенку Олександр олександровичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення електромеханічних вузлів електроерозійного ЧПУ верстата _____

Затверджена наказом по університету від _____ 03.11.2023 № 1288 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 17.01.2024 _____

3. Вихідні дані до роботи напряга живлення – 220 В 50 Гц, споживана потужність – не більше 3 кВт, кліматичні умови – УХЛІ 4.2 _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ; _____

4.2 Аналіз електроерозійних верстатів; _____

4.3 Розробка конструкцій електромеханічних вузлів електроерозійного верстата; _____

4.4 Розробка системи керування електроерозійним ЧПУ верстатом; _____

4.5 Охорона праці; _____

4.6 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 17 с. формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	06.11.2023	Виконано
2	Аналіз завдання	10.11.2023	Виконано
3	Огляд літературі за темою роботи	20.11.2023	Виконано
4	Аналіз електроерозійних верстатів	07.12.2023	Виконано
5	Розробка конструкцій електромеханічних вузлів електроерозійного верстата	20.12.2023	Виконано
6	Розробка системи керування електроерозійним ЧПУ верстатом	03.01.2024	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	09.01.2022	Виконано
8	Подання роботи на перевірку інтернет сервісу Unichesk	10.01.2024	Виконано
9	Подання роботи на рецензію	15.01.2024	Виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	16.01.2024	Виконано
11	Подання атестаційної роботи до ЕК	17.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 06.11.2023

Студент _____
(підпис)

Зибенко О. О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. каф. КІТАР Разумов-Фризюк Є.А
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 8 табл., 41 рис., 3 дод., 25 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРОЕРОЗІЯ, ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНА
ОБРОБКА, ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИЙ ВЕРСТАТ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ
УПРАВЛІННЯ, СИТЕМА КЕРУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – технологія електроерозійної обробки.

Предмет дослідження – електроерозійний ЧПУ верстат.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка системи керування електромеханічними вузлами електроерозійного ЧПУ верстата.

Методи дослідження – теоретичний аналіз наявних праць, проектування, моделювання та розрахунок параметрів електромеханічних вузлів.

У кваліфікаційній роботі досліджено та проаналізовано технологію електроерозійної обробки матеріалів, її види та особливості. Розглянуто сучасні електроерозійні ЧПУ верстати.

Розроблено систему координатного переміщення ЧПУ верстата. Розроблено конструкцію виконавчого механізму – генератора імпульсів високої частоти. Обрано всі необхідні деталі та компоненти. Спроектовано та змодельовано друковану плату даного генератора.

Розроблено систему керування електроерозійним верстатом з ЧПУ. Визначені показники стійкості та якості такої системи.

Підняте питання техніки безпеки під час роботи з електроерозійними верстатами.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані у 2 фахових статтях та 1 міжнародній конференції.

ABSTRACT

Explanatory note: 76 p., 8 tables, 41 figures, 3 appendixes, 25 sources.

AUTOMATION, ELECTRICAL DISCHARGE EROSION, ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING, ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE, NUMERICAL CONTROL, CONTROL SYSTEM.

The object of research is the technology of electrical discharge machining.

The subject of research is an EDM machine.

The purpose of the qualification work is to develop a control system for electromechanical components of an EDM machine.

Research methods – theoretical analysis of existing works, design, modeling and calculation of the parameters of electromechanical units.

The qualification work investigates and analyzes the technology of electrical discharge machining of materials, its types and features. Modern electrical discharge machining machines are considered.

The system of coordinate movement of the CNC machine is developed. The design of the actuator – a high-frequency pulse generator – is developed. All necessary parts and components were selected. The printed circuit board of this generator was designed and modeled.

A control system for a CNC EDM machine was developed. The stability and quality indicators of such a system are determined.

The issue of safety when working with electrical discharge machines is raised.

The results of the qualification work were tested in 2 professional articles and 1 international conference.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Дослідження технології електроерозійної обробки та верстатів на її основі.....	11
1.1 Огляд технології електроерозійної обробки матеріалів	11
1.2 Огляд електроерозійних верстатів з ЧПУ	24
1.3 Постановка задач дослідження.....	30
1.4 Висновки до розділу 1	31
2 Розробка конструкцій електромеханічних вузлів електроерозійного верстата	33
2.1 Розробка блок-схеми електроерозійного верстата з ЧПУ	33
2.2 Вибір електронних компонентів координатної системи з ЧПУ	34
2.3 Проектування та моделювання елементів конструкції електроерозійного верстата з ЧПУ	46
2.4 Розробка конструкції виконавчого механізму	50
2.4.1 Розробка та аналіз схеми електричної принципової.....	50
2.4.2 Вибір електронних компонентів	51
2.4.3 Проектування та моделювання елементів виконавчого механізму..	55
2.5 Висновки до розділу 2	58
3 Розробка системи керування електроерозійним ЧПУ верстатом	59
3.1 Розробка системи керування.....	59
3.2 Визначення стійкості системи та показників якості	61
3.3 Висновки до розділу 3	66
4 Охорона праці.....	68
Висновки	72
Перелік джерел посилання	73
Додаток А Апробація наукових результатів дослідження	77
Додаток Б Графічний демонстраційний матеріал.....	89
Додаток В Відомість кваліфікаційної роботи.....	106

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕІМО – електроімпульсна обробка;

ЕІО – електроіскрова обробка;

ЕЕО – електроерозійна обробка;

ЕКО – електроконтактна обробка;

КГП – кульково-гвинтова передача;

МЕП – міжелектродний проміжок;

РР – робоча рідина;

САК – системи автоматичного керування;

ТАУ – теорія автоматичного управління;

ЧПУ – числове програмне управління;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Сучасний прогрес в області машинобудування тісно пов'язаний з розвитком та вдосконаленням обладнання для обробки матеріалів, зокрема, з удосконаленням електроерозійних верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Ці верстати відіграють ключову роль у виробничих процесах, оскільки вони забезпечують високоточну обробку матеріалів з надзвичайною точністю, що є критично важливим у таких сферах, як авіаційна промисловість, точне машинобудування, медичне обладнання та інші. Попит на такі види обробки постійно зростає у зв'язку з потребами цих високотехнологічних галузей.

У відповідь на цей зростаючий попит, важливою є розробка та вдосконалення електромеханічних вузлів електроерозійних верстатів. Ці вузли є вирішальними для підвищення ефективності та точності обробки, оскільки вони безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту. Вдосконалення таких систем не тільки підвищує продуктивність і точність обробки, але й знижує витрати на виробництво за рахунок зменшення часу на обробку і збільшення терміну служби обладнання.

Також, у контексті екологічної безпеки та сталого розвитку, важливим аспектом є оптимізація споживання електроенергії та інших ресурсів, що використовуються у процесі електроерозійної обробки. Сучасні технології, включені в електромеханічні вузли, мають сприяти не тільки підвищенню продуктивності, але й ефективності використання ресурсів, що відповідає глобальним трендам енергозбереження та мінімізації впливу на довкілля.

З огляду на вищевказане, актуальність розробки електромеханічних вузлів електроерозійних ЧПУ верстатів очевидна. Це не тільки відповідає потребам сучасного виробництва, але й сприяє технологічному прогресу, відкриваючи нові можливості для підприємств і науковців у цій області. Враховуючи

це, дана дослідницька робота спрямована на розробку таких вузлів, які б відповідали технічним вимогам, забезпечуючи високу якість обробки при оптимальному використанні ресурсів.

Мета дослідницької роботи – розробка системи керування електромеханічними вузлами електроерозійного ЧПУ верстата.

Об’єкт дослідження – технологія електроерозійної обробки.

Предмет дослідження – електроерозійний ЧПУ верстат.

Методи дослідження – теоретичний аналіз наявних праць, проектування, моделювання та розрахунок параметрів електромеханічних вузлів.

Завдання дослідження полягають у детальному аналізі існуючих рішень у цій галузі, визначенні ключових параметрів та характеристик, необхідних для ефективної роботи верстата, а також розробці власного проекту, який враховуватиме всі сучасні тенденції та інновації у цій сфері.

Наукова новизна роботи полягає у розробці вдосконалених конструкцій електромеханічних вузлів, які забезпечують вищу точність та ефективність обробки. Практична значимість дослідження виражається у можливості застосування розроблених рішень на виробничих підприємствах для підвищення якості та продуктивності електроерозійної обробки.

Робота виконана згідно з рекомендаціями [1-2] та вимогами ДСТУ 3008:2015 [3].

Результати досліджень опубліковані у збірниках [4-5] та доповідались на міжнародному молодіжному форумі [6].

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ ТА ВЕРСТАТІВ НА ЇЇ ОСНОВІ

1.1 Огляд технології електроерозійної обробки матеріалів

В науці і техніці саме явище електричної ерозії, тобто руйнування контактів під дією електричних розрядів, було відоме давно. Зокрема, іскрові і дугові розряди виникають при розриві або відключенні електричних ланцюгів. Електричній ерозії піддаються контакти реле, вимикачів, рубильників і інших подібних пристроїв. Електрична ерозія – дуже шкідливе явище, що скорочує термін служби і знижує надійність електричних пристроїв. Багато досліджень було присвячено усуненню або хоча б зменшенню такого руйнування контактів.

Над цією проблемою працювали такі вчені як Борис Романович Лазаренко і Наталія Іоасафовна Лазаренко. Помістивши електроди в рідкий діелектрик і розмикаючи електричний ланцюг, учені помітили, що рідина мутніла вже після перших розрядів між контактами. Вони встановили: це відбувається тому, що в рідині з'являються дрібні металеві кульки, що виникають внаслідок електричної ерозії електродів. Учені вирішили підсилити ефект руйнування і спробували застосувати електричні розряди для рівномірного видалення металу. З цією метою вони помістили електроди (інструмент і заготовку) в рідкий діелектрик, що прохолоджував розплавлені частки металу і не дозволяв їм осідати на протилежний електрод. Як генератор імпульсів використовувалася батарея конденсаторів 2, що заряджаються від джерела постійного струму; час зарядки конденсаторів регулювали реостатом 1 (рис. 1.1). Так з'явилася перша у світі електроерозійна установка. Електрод-інструмент 3 переміщали по заготовці 4. В міру їхнього зближення зростала напруженість поля в просторі між електродом-інструментом і заготовкою. Цей простір називають міжелектрод-

ним проміжком (МЕР) або просто проміжком. При досягненні визначеної напруженості поля на ділянці з мінімальною відстанню між поверхнями електродів, вимірюваною по перпендикуляру до оброблюваної поверхні і названим мінімальним міжелектродним зазором, виникав електричний розряд (протікав імпульс) струму, під дією якого відбувалося руйнування ділянки заготовки

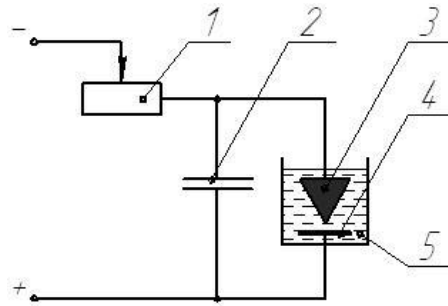


Рисунок 1.1 – Схема електроерозійної установки

Продукти обробки потрапляли в діелектричну рідину 5, де охолоджувалися, не досягаючи електрода-інструмента, і потім осаджувалися на дно ванни. Через деякий час електрод-інструмент зробив отвір в пластині 4, причому контур отвору точно відповідав профілю інструмента.

Так, явище, що вважалось шкідливим, було застосовано для розмірної обробки матеріалів. Винахід електроерозійної обробки (ЕЕО) мав видатне значення. До традиційних способів формоутворення (різання, лиття, обробки тиском) додався зовсім новий, у якому безпосередньо використовувалися електричні процеси.

Спочатку для здійснення ЕЕО застосовувалися винятково іскрові розряди, створювані конденсатором у так називаному RC-генераторі (рис. 1.1). Тому новий процес у той час називали електроіскровою обробкою.

На початку 50-х років були розроблені спеціальні генератори імпульсів, завдяки яким обробку можна було проводити не тільки на коротких іскрових розрядах, але і на більш тривалих – іскро-дугових і дугових розрядах. Щоб відрізнити нові умови здійснення процесу, його стали називати електроімпульсною обробкою.

Оскільки для формоутворення у всіх випадках застосовують те саме явище – електричну ерозію, у даний час ці процеси вважають різновидами ЕЕО і використовують визначення електроіскровий режим ЕЕО і електроімпульсний режим ЕЕО.

Великий внесок у розвиток методів ЕЕО внесли вчені та інженери Б.Н. Золотих, А.Л. Лівшиць, Л.С. Палатник, М.Ш. Отто та ін.

В даний час застосовують кілька технологічних схем електроерозійної обробки.

Прошивання – видалення металу з порожнин, заглиблень, отворів, пазів, із зовнішніх поверхонь. На рис. 1.2 показані схеми виготовлення заглиблення (а) і фасонного стержня (б). Електрод-інструмент 1 поступально переміщається до заготовки 2 зі швидкістю V . Обидва електроди поміщені у ванну 5, заповнену діелектриком 3. Продукти обробки 4 викидаються в міжелектродний проміжок і осідають на дно ванни. Прошиванням можна одержувати поверхні як із прямою, так і з криволінійною віссю.

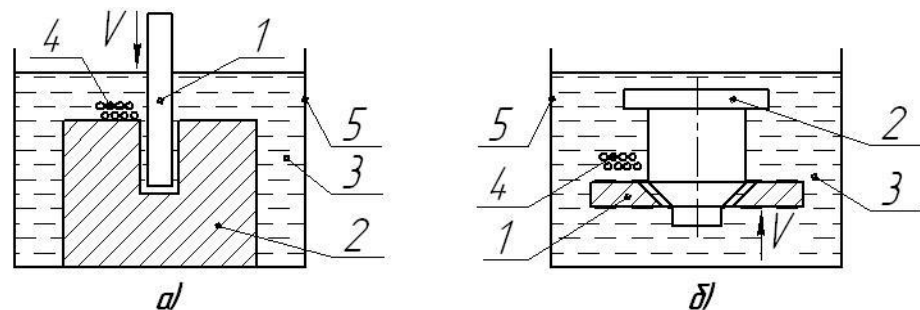


Рисунок 1.2 – Схеми виготовлення заглиблення і фасонного стержня

Існує два варіанти прошивання:

- пряме копіювання, коли електрод-інструмент знаходиться над заготовкою (рис. 1.2, а);
- зворотне копіювання з розташуванням заготовки над електродом-інструментом (рис. 1.2, б). Рух подачі тут може здійснювати заготовка. Другий варіант дозволяє полегшити видалення продуктів обробки і за рахунок скоро-

чення числа бічних розрядів через частки розплавленого металу в міжелектродному проміжку підвищити точність обробки деталі.

Прошивання в електроіскровому режимі профільним інструментом використовують:

а) при прямому копіюванні:

1) для виготовлення кувальних штампів, прес-форм невеликих габаритів із твердих сплавів і сталей;

2) для виготовлення дрібних сіток, хвилеводів, гребінок і інших деталей радіоелектронної промисловості;

3) для прошивання отворів і систем отворів довільного перетину у важкооброблюваних матеріалах (найменший діаметр круглого отвору близько 0,1 мм);

4) для виготовлення отворів із криволінійною віссю;

5) для нарізування різьб на твердосплавній і загартованій сталевій заготовках;

б) при маркуванні деталей;

7) для виготовлення сполучних каналів у корпусних деталях гідроапаратури;

8) для видалення уламків свердел, мітчиків і інших інструментів;

б) при зворотному копіюванні:

1) для виготовлення фасонних зовнішніх поверхонь, що мають східчасті переходи, що перешкоджають виходу металорізального інструмента;

2) для виготовлення фасонних східчастих внутрішніх поверхонь.

Електроерозійне шліфування, схема якого показана на рис. 1.3. Металевий інструмент-електрод-інструмент 1 у формі диска робить обертальний і поступальний рух до заготовки 2 зі швидкістю V . Заготовка може обертатися, як показано на рис. 1.3. Рідину подають поливом з насадки 3. При невеликих габаритах заготовок процес може протікати у ванні з робочою рідиною. Шліфування може бути як зустрічним, так і попутним.

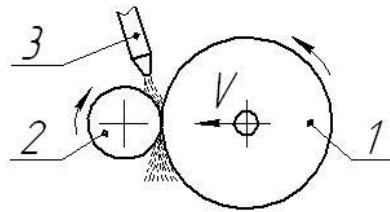


Рисунок 1.3 – Схема електроерозійного шліфування

Електроерозійне шліфування в рідких середовищах використовують:

- при виготовленні деталей з крихких, в'язких матеріалів і деталей, набраних з тонких листів (ротори електричних машин);
- для нарізування зовнішніх різьб на деталях із твердих сплавів і загартованих сталей;
- для одержання прецизійних отворів;
- для заточення ріжучого твердосплавного інструмента;
- для профілювання і виправлення електропровідних абразивних і алмазних кругів.

Електроконтактне шліфування в повітряному середовищі дозволяє видалити товсті шари металу при відносно високій шорсткості поверхні. Воно широко використовується для видалення місцевих дефектів і поверхневого дефектного шару зі злитків, поковок, прокату.

Розрізування профільним або непрофільованим інструментом включає поділ заготовки на частині – відрізання, і одержання непрямолінійного контуру – вирізання, що виконується тільки непрофільованим електродом-інструментом. Профільний інструмент-електрод 1 при розрізуванні деталей (рис. 1.4, а) може бути виконаний у формі диска або пластини. Його переміщують до заготовки 2 зі швидкістю V та у площині його обертання уздовж деталі. Обробка виконується у ванні 5 з діелектричною рідиною 3. Якщо розрізування виконується пластиною з одним поступальним переміщенням її до заготовки, то це буде прошивання. У випадку використання непрофільованого електрода (рис. 1.4, б) інструмент 1 виконують у формі круглого дроту діаметром від 0,02 мм до 0,3 мм або стержня, що можуть переміщатися в різних

напрямах зі швидкістю V у будь-якій частині заготовки 2. Для усунення впливу зносу електрода-інструмента на точність прорізуваних пазів дрід або стержень переміщують (звичайно перемотуванням) уздовж осі зі швидкістю V . Розрізування виконують у ванні з діелектричною рідиною.

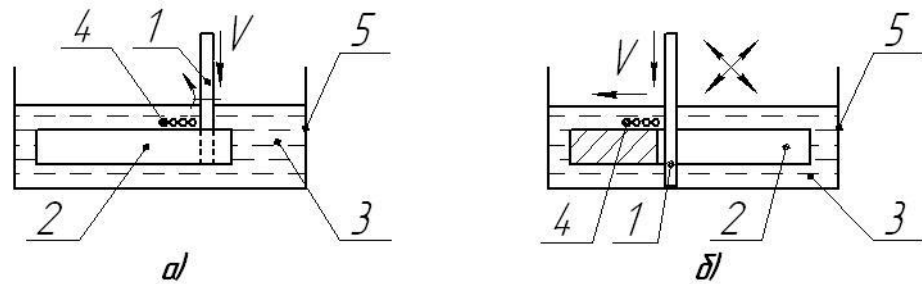


Рисунок 1.4 – Схема розрізування профільним та непрофільованим інструментом

Розрізування профільним електродом-інструментом у електроіскровому режимі дозволяє виконувати:

- пази і щілини малої ширини, наприклад у цангах;
- профільні електроди-інструменти для прошивання;
- розрізування заготовок з вольфраму й інших матеріалів.

Розрізуванням непрофільованим електродом-інструментом одержують:

- вузькі наскрізні або глухі щілини;
- вирубні штампи невеликих габаритів із твердих сплавів і загартованих сталей;
- робочу частину різців і інших інструментів;
- щілини в цангах для закріплення деталей малого діаметра;
- таблетки з магнітних, вольфрамових сплавів, при обробці яких потрібно досягти мінімальної витрати матеріалу;
- написи, знаки, гравюри.

Електроконтактне розрізування диском або стрічкою в рідині використовується:

- для одержання заготовок з важкооброблюваних матеріалів (нержавіючих, жароміцних, титанових, магнітних і інших сплавів);
- для розрізування труб з конструкційних матеріалів;
- для прорізання вузьких пазів і отворів у деталях.

Розрізування в повітряному середовищі знаходить широке використання в металургійній промисловості для:

- поділу на частини прокату;
- відрізання литників з великих литих заготовок.

Електроерозійне зміцнення, що включає легування і нарощування поверхні, зазвичай здійснюють на повітрі. Частини розплавленого металу інструмента на повітрі не встигають охолонути і осідають на поверхні заготовки, утворюючи на ній шар сплаву, який насичений легуючими елементами електроду-інструменту або легуючим компонентом із складу робочого середовища. Крім того, нанесений на заготовку шар загартований до високої твердості і має за рахунок цього підвищену зносостійкість.

Електроерозійне зміцнення і легування застосовують:

- для зміцнення лез сталевих інструментів;
- з метою відновлення розмірів зношених деталей;
- для підвищення зносостійкості рухомих елементів конструкцій;
- для нанесення на електричні контакти матеріалів з малим електричним опором, наприклад срібла.

Видалення металу із заготовки проходить в середовищі діелектрика за рахунок мікророзрядів, що розплавляють частину металу. Розглянемо основні стадії протікання електроерозійного процесу зняття припуску. По мірі зближення електрода-інструмента із заготовкою напруженість E електричного поля збільшується зворотно-пропорційно відстані між електродами (1.1):

$$E = \frac{U}{S}, \quad (1.1)$$

де U – різниця потенціалів електрода-інструмента і заготовки;
 S – зазор між електродами.

Найбільша напруженість виникає на ділянці, де міжелектродний зазор найменший. Розташування цієї ділянки залежить від місцевих виступів, нерівностей на інструменті і заготовці, від наявності і розмірів електропровідних частин, що знаходяться в міжелектродному проміжку. На рис. 1.5 показано формування розрахункового зазору S між електродом-інструментом 3 і заготовкою 4. Зазор залежить від висоти h_b місцевого мікро- чи макровиступа на заготовці. Напруженість поля в районі виступу буде найбільшою, що підвищує ймовірність пробиття між електродного проміжку в цій точці. Крім того напруженість буде залежить від наявності електропровідних частин 1 в діелектрику 2. Частина 1 з розміром $h_ч$ зменшує розрахунковий зазор до розміру S_1+S_2 . Якщо не враховувати можливості присутності в проміжку таких частин, то потрібно було б в розрахунках прийняти зазор, що дорівнює S . Оскільки реальний зазор буде меншим, чим відстань між електродами, то напруженість поля на ділянках, де маються електропровідні частини, буде вище.

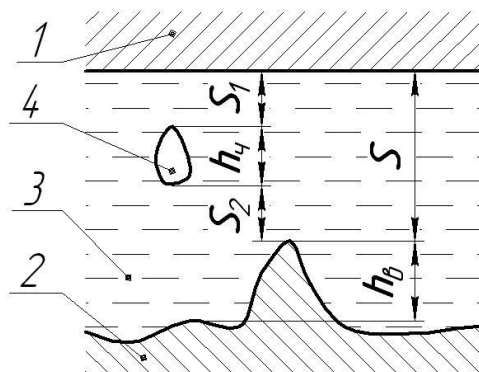


Рисунок 1.5 – Схема формування зазору між електродом-інструментом і заготовкою

Якщо електроди наблизити до відстані кількох десятків мікрометрів, то в деяких місцях напруженість поля може досягнути значення, при якому в місці найменшого зазору виникає електричний розряд, через проміжок протікає струм, тобто має місце спрямований рух електронів. В електричному полі, що виникло в міжелектродному просторі, у напрямку, зворотному руху електронів, відбувається переміщення більш важких часток – іонів. Електрони, що мають меншу масу, швидко досягають позитивно зарядженої поверхні заготовки і нагрівають метал, викликаючи розплавлення і випарювання його в місці проходження струму. У результаті утворюється сферичне заглиблення (рис.1.6) радіусом R .

Частини металу, що вилетіли із заглиблення охолоджуються рідиною, яка знаходиться в зазорі, і застигають у вигляді кульок.

В якості рідини використовують різноманітні діелектрики: масла, гас, дистильовану воду. Під дією розрядів поверхня здобуває форму з явно вираженими поглибленнями (рис.1.6). Такі поглиблення формують мікрорельєф, що характеризує шорсткість поверхні.

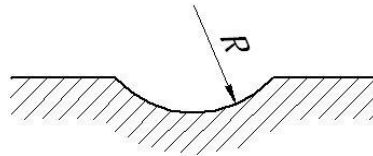


Рисунок 1.6 – Схема формування поглиблення

Поверхневий шар дна поглиблень зазнає впливу термічного циклу нагрівання і швидкого охолодження рідиною. Властивості цього шару відмінні від властивостей металу в глибині заготовки. В електроіскровому режимі більшість іонів, що мають значну масу, не встигає досягти негативно зарядженого електрода і викликати видалення матеріалу з його поверхні. Знімання металу відбувається переважно з анода, який вибирають в якості заготовки. Кількість іонів, що досягають поверхні інструмента, визначає інтенсивність його зносу. Очевидно, чим менше буде знос інструмента, тим точніше можна одержати

деталь. Для цього прагнуть сформувати імпульс з меншою тривалістю, щоб іони не встигали досягти катода. Однак при цьому зростає час обробки і знижується продуктивність.

Полярність, при якій заготовка є анодом, називають прямою. Електроерозійна обробка, при якій використовують електроіскровий режим, зазвичай здійснюється при прямій полярності включення електродів.

Якщо збільшувати тривалість імпульсів струму, то росте інтенсивність знімання металу з катода (інструмента) потоком іонів. Можна підібрати такий час протікання струму, при якому частка знімання металу електронами складе лише незначну частину від загального обсягу вилученого з електродів матеріалу. Тому тут необхідно катодом вибрати заготовку. Полярність, при якій анодом є електрод-інструмент, називають зворотною. Обробку матеріалів при електроімпульсному режимі здійснюють при зворотній полярності включення електродів. Полярність залежить не тільки від тривалості імпульсу, але і від використовуваних як електроди матеріалів. Для зниження зносу електроду-інструменту під впливом потоку електронів його виконують із матеріалів, що мало руйнуються під дією іскрових розрядів (графітових і мідно-графітових композицій). Для кількісної оцінки застосовують поняття відносного зносу – відношення маси або обсягу матеріалу, вилученого з електрода-інструмента, до маси або обсягу металу, знятого з заготовки.

При електроконтактному методі імпульси струму формуються безпосередньо в проміжку. Схема методу приведена на рис. 1.7.

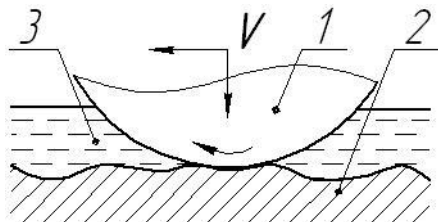


Рисунок 1.7 – Схема електроіскрового методу

Процес протікає в діелектрику 2. Поверхні інструменту-електрода 1 і заготовки 3 не є ідеально гладкими – на них маються нерівності. При обертанні електрода-інструмента виступи наближаються до заготовки аж до контакту. На визначеній відстані S між електродами відбувається розряд, що переходить у дуговий і визиває розплавлення металу. Процес цей короточасний, оскільки за рахунок обертання інструменту-електрода виступ на його поверхні віддаляється від заготовки і розряд у середовищі діелектрика швидко згасає. При цьому методі тривалість і частота імпульсів струму буде залежати від форми і числа виступів на зовнішній поверхні інструмента і від швидкості його обертання. Електрод-інструмент, що обертається сам регулює параметри імпульсів, тому не потрібно спеціального генератора, а використовується постійний або перемінний струм низької напруги. Електроконтактну обробку проводять при прямій полярності.

В міру знімання металу з заготовки електрод-інструмент переміщують у залежності від схеми обробки або уздовж оброблюваної поверхні (шліфування), або по нормалі до неї (розрізування) зі швидкістю V .

Якщо процес протікає в повітряному середовищі, то виникають більш тривалі дугові розряди, чим при процесі в рідині, тому що після контакту між інструментом і заготовкою дуга може горіти досить тривалий час. При цьому розплавлений метал може досягати протилежної поверхні і там застигати, тобто можуть протікати одночасно два процеси – розмірне знімання і нарощування металу. Під дією тепла дуги виплавляються великі ділянки заготовки, процес відбувається інтенсивно і супроводжується сильним світловим випромінюванням.

Електроерозійне легування ведуть при зворотній полярності, і частки розплавленого металу осідають на катоді (заготовці).

Основні технологічні показники процесу (точність, якість поверхні, продуктивність) залежать від кількості виплавленого за один імпульс металу з заглиблення, обумовленого енергією імпульсу, часом дії імпульсів і частотою

їхнього слідування. Енергія імпульсу A_i як робота електричного струму залежить від добутку сили струму I на напругу U за час τ протікання імпульсу (1.2):

$$A_i = \int_0^{\tau} I \cdot U d\tau \quad (1.2)$$

У першому наближенні енергію A_i можна розраховувати за середнім значенням сили струму і напруги (1.3):

$$A_i = U_{сер} \cdot I_{сер} \cdot \tau \quad (1.3)$$

Середнє значення напруги пробую (1.4):

$$U_{сер} = (0,5...0,75) \cdot U_0 \quad (1.4)$$

де U_0 – напруга холостого ходу при розімкнутих електродах. Напруга U_0 легко контролюється в процесі обробки.

При електроіскровому режимі приймають U_0 від 40 В до 180 В. Якщо використовують електроімпульсний режим, то U_0 від 18 В до 36 В. Електроконтактна обробка в рідкому середовищі протікає при U_0 від 18 В до 40 В, у повітрі – при U_0 від 3 В до 12 В.

Середню силу струму визначають через її значення I_k при короткому замиканні електродів (1.5):

$$I_{сер} = (0,5...0,75) \cdot I_k \quad (1.5)$$

Силу струму короткого замикання можна встановлювати і контролю-

вати по приладам верстата. Її вибирають в залежності від оброблюваного матеріалу і необхідної шорсткості поверхні. Для сталі при чорновій обробці I_k від 20 А до 120 А, при чистовій обробці I_k від 0,5 А до 5 А, для твердих сплавів I_k від 0,05 А до 0,2 А.

Тривалість імпульсів τ_i зворотно-пропорційна частоті f їхнього проходження. Оскільки між імпульсами маються паузи, то при розрахунку τ_i необхідно враховувати скважність q – відношення періоду τ_0 повторення імпульсів до їх тривалості (1.6):

$$\tau_i = \frac{1}{q \cdot f} \quad (1.6)$$

Тривалість імпульсу для чорнкової обробки сталей τ_i від 200 мкс до 105 мкс, для чистової обробки τ_i від 5 мкс до 200 мкс. Для твердих сплавів тривалість імпульсу ще на 2-3 порядки нижче. При електроерозійній обробці використовуються імпульси різної форми (рис. 1.8), але однієї полярності (уніполярні).

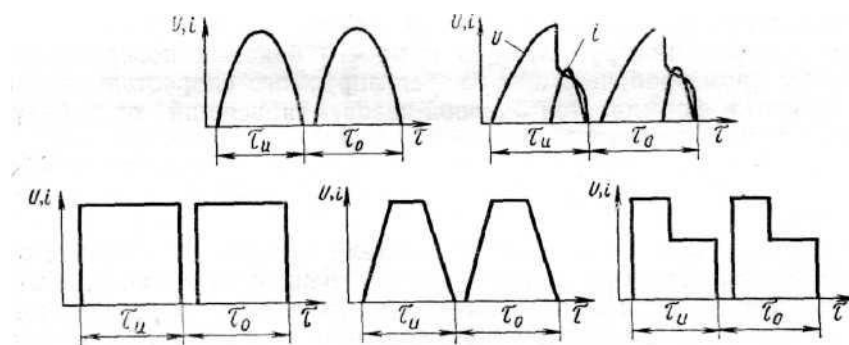


Рисунок 1.8 – Форма імпульсів

Форма імпульсів підбирається такою, щоб при визначених параметрах імпульсу одержати найбільше поглиблення на заготовці, тобто досягти найбільш ефективного використання енергії. Так, збільшення струму в імпульсі в два рази дозволяє для визначеного діапазону режимів підняти швидкість ерозії

від 2,5 разів до 3 разів. У робочому діапазоні режимів вибирають визначене співвідношення максимального значення сили струму в імпульсі до його тривалості [8].

1.2 Огляд електроерозійних верстатів з ЧПУ

Як і в випадку з традиційними металорізальними верстатами, обладнання для фізико-хімічної обробки поділяється на кілька категорій: універсальні, спеціалізовані та спеціальні верстати. Серед електроерозійних верстатів, що набули поширення, можна виділити наступні типи:

- універсальні прошивальні верстати, призначені для роботи за принципами прямого та зворотного копіювання (наприклад, моделі 4Г721М, 4Д721АФ3, 4Д722АФ3, 4П724Ф3М);
- універсальні вирізні верстати (моделі 4531Ф3, 4532Ф3, 4535Ф3);
- універсальні машини для видалення зламаного ріжучого інструменту та шпильок (модель 4Б611);
- спеціалізовані багатопозиційні верстати для перфорації лопатей газотурбінних двигунів, обробки роторів, форсунок та інших подібних деталей;
- спеціалізовані верстати для обробки кільцевих і гвинтових поверхонь змінного перетину (наприклад, моделі МА4730А, МА4727);
- машини для електроконтактної обробки (модель МЕ301).

Серед цих, найбільш розповсюдженими є універсальні прошивальні та вирізні верстати [9]. Один з таких верстатів – електроерозійний копіювально-прошивний верстат Mitsubishi Electric EA12VA, детально зображений на рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Верстат Mitsubishi Electric EA12VA

Основні технічні характеристики верстата для порівняння з аналогами наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики Mitsubishi Electric EA12VA

Характеристика	Од. вим.	Значення
Максимальний розмір заготовки	мм	800 × 550 × 250
Максимальна вага заготовки	кг	700
Розмір столу	мм	700 × 500
Матеріал столу		сталь
Переміщення по осях	мм	400 × 300 × 300
Максимальний робочий струм	А	80
Найкраща шорсткість	мкм	0,1
Мінімальний знос електрода	%	0,1
Об'єм бака діелектрика	л	400

Продовження таблиці 1.1

Характеристика	Од. вим.	Значення
Активна споживана електрична потужність	кВт	4
Система управління		MITSUBISHI ADVANCE
Загальна вага установки	кг	3725
Габаритні розміри установки	мм	2145 × 2050 × 2380

Електроерозійні копіювально-прошивальні верстати, пропоновані компанією MITSUBISHI ELECTRIC, призначені для вирішення найширшого спектру завдань та забезпечують:

- високопродуктивну обробку глибоких та вузьких порожнин без промивання;
- високу продуктивність, і, насамперед, на режимах виходжування;
- високу точність на кінцевому виробі, як наслідок - високу точність позиціонування робочих органів верстата та дуже низькі значення зносу електродів;
- високий клас шорсткості оброблених поверхонь і високу однорідність поверхонь, у тому числі і стосовно великих площ обробки;
- роботу електродами з малими міжелектродними проміжками без втрати продуктивності.

4-х координатний електроерозійний прошивний верстат високої точності Mitsubishi EA12VA, включає трансформатор, лампу освітлення, вісь "С", хід по осях X/Y/Z – 400/300/300, габарити деталі 800x550x250, вага електрода – 50. Патрон EROWA.

Стійкість фільтрів 500-1000 годин, заміна діелектрика кожні 2-3 роки, діелектрик SOREPI LM, ACFE43 фільтри [10].

Електроерозійний дротяно-вирізний верстат з ЧПУ моделі Mitsubishi Electric MV1200R представлений на рис. 1.10.



Рисунок 1.10 – Верстат Mitsubishi Electric MV1200R

Основні технічні характеристики верстата Mitsubishi Electric MV1200R для порівняння з аналогами наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики Mitsubishi Electric MV1200R

Характеристика	Од. вим.	Значення
Максимальний розмір заготовки	мм	810 × 700 × 215
Максимальна вага заготовки	кг	500
Розмір столу	мм	640 × 540
Конструкція столу		замкнутий, цільний
Переміщення по осях	мм	400 × 300 × 220
Найкраща шорсткість	мкм	0,2
Точність обробки	мм	± 0,0015

Продовження таблиці 1.2

Характеристика	Од. вим.	Значення
Діаметр дроту	мм	0,3
Діелектрик		деіонізована вода
Максимальний робочий струм	А	50
Об'єм бака діелектрика	л	550
Активна споживана електрична потужність	кВт	5
Система управління		Mitsubishi M800 D-CUBES
Загальна вага верстата	кг	2700
Габаритні розміри установки	мм	2022 × 2760 × 2015

Серія MV – нове покоління електроерозійних дротяно-вирізних верстатів компанії Mitsubishi Electric

Будучи спадкоємцями інноваційних розробок, вперше використаних і відпрацьованих в машинах лінійки NA, електроерозійні дротяно-вирізні верстати нової серії MV повністю втілили в собі поняття про справжню японську якість: в них плоди передової науки і техніки використані без найменшої шкоди для надійності, а доповнюється низькою собівартістю обробки.

Фахівці компанії використовували не тільки рішення, що вже зарекомендували себе в машинах попередніх поколінь при проектуванні верстатів серії MV, але привнесли і ряд нових розробок, що в сукупності дозволило на немислиму досі висоту підняти планку співвідношення ціна/якість [11].

Портативний електроерозійний екстрактор моделі EDM-8C зображено на рис. 1.8.



Рисунок 1.11 – Екстрактор електроерозійний портативний EDM-8С

Основні технічні характеристики екстрактора EDM-8С для порівняння з аналогами наведені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики портативного електроерозійного екстрактора EDM-8С

Характеристика	Од. вим.	Значення
Вхідна напруга	В/Гц	220/50
Вхідна потужність	Вт	800
Діаметри електрода	мм	10
Швидкість обробки дрібного отвору. Матеріал, що обробляється: загартована сталь.	мм/хв	≈ 1
Хід по осі Z	мм	70
Робоча рідина		дистильована вода
Налаштування глибини, автоматичне повернення та сигналізація		так
Розмір корпусу	мм	380 × 160 × 300
Вага нетто	кг	16

Екстрактор портативний з шпинделем, що переміщається, призначений для локального видалення мітчиків, що зламалися в отворах, і свердл без пошкодження оброблюваної деталі.

В основі роботи верстата лежить принцип електроерозії. Як електрод використовується будь-який латунний стрижень потрібного діаметра.

Видалення інструменту можливе безпосередньо на деталі, закріпленій у верстаті без демонтажу.

Верстат здатний видаляти інструмент, виготовлений з швидкорізальної сталі, так і твердого сплаву. Має систему охолодження утримувача електрода. На верстаті реалізовано функцію контролю глибини обробки (налаштування максимальної глибини обробки 100 мм). Робоча головка встановлюється під кутом 360° щодо поверхні обробки [12].

1.3 Постановка задач дослідження

Під час розробки електромеханічної частини електроерозійного верстата було визначено такі основні завдання:

- створити електромеханічний вузол для електроерозійного верстата, призначеного для поверхневої обробки металів, включаючи маркування, різання та виготовлення отворів;
- верстат має бути обладнаний системою ЧПУ для точного керування переміщенням інструмента відносно оброблюваної заготовки (координатна система з ЧПУ).

Детальні технічні характеристики та вимоги до майбутнього верстата представлено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Вимоги до верстата, що розробляється

Характеристика	Од. вим.	Значення
Розмір робочої зони	мм	500 × 500 × 50
Формати файлів, що підтримуються		.svg, .dxf

Продовження таблиці 1.4

Характеристика	Од. вим.	Значення
Інтерфейс вводу даних		USB, автономний друк з карти microSD
Вхідна напруга живлення	В/Гц	220/50
Максимальна споживана потужність	кВт	3
Точність переміщення в ХУ-площині	мкм	40
Точність переміщення Z-площині	мкм	15
Умови експлуатації		УХЛ 4.2
Максимальна вага	кг	80

Кліматичні умови категорії УХЛ 4 передбачають використання верстата у приміщеннях з контрольованими кліматичними умовами, наприклад, у приміщеннях з опаленням, охолодженням та вентиляцією, включаючи добре вентильовані підземні приміщення. Це місця, захищені від прямого сонячного світла, атмосферних опадів, вітру, піску та зовнішнього пилу; місця з мінімізованим впливом розсіяного сонячного світла та конденсації вологи. Категорія 4.2 включає використання верстата у лабораторних умовах, у капітальних житлових будинках та інших подібних приміщеннях.

1.4 Висновки до розділу 1

У першому розділі кваліфікаційної роботи було досліджено технологію електроерозійної обробки матеріалів. Розглянуто принцип дії електроерозійних верстатів. Розглянуто та порівняно три види електроерозійних верстатів з ЧПУ присутніх на ринку. Визначено та поставлено наступне технічне завдання дослідження:

– розробити електромеханічної частину електроерозійного верстата для поверхневої обробки металів (маркування, різання, створення отворів);

– верстат повинен бути оснащений системою числового програмного управління для переміщення інструменту відносно заготовки, що оброблюється (координатною системою з ЧПУ).

Визначено технічні вимоги майбутнього електроерозійного верстата з ЧПУ.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ВЕРСТАТА

2.1 Розробка блок-схеми електроерозійного верстата з ЧПУ

Було створено структурну блок-схему електроерозійного верстата (рис. 2.1), що ілюструє ключові компоненти системи, їх взаємодію та функціональне призначення.

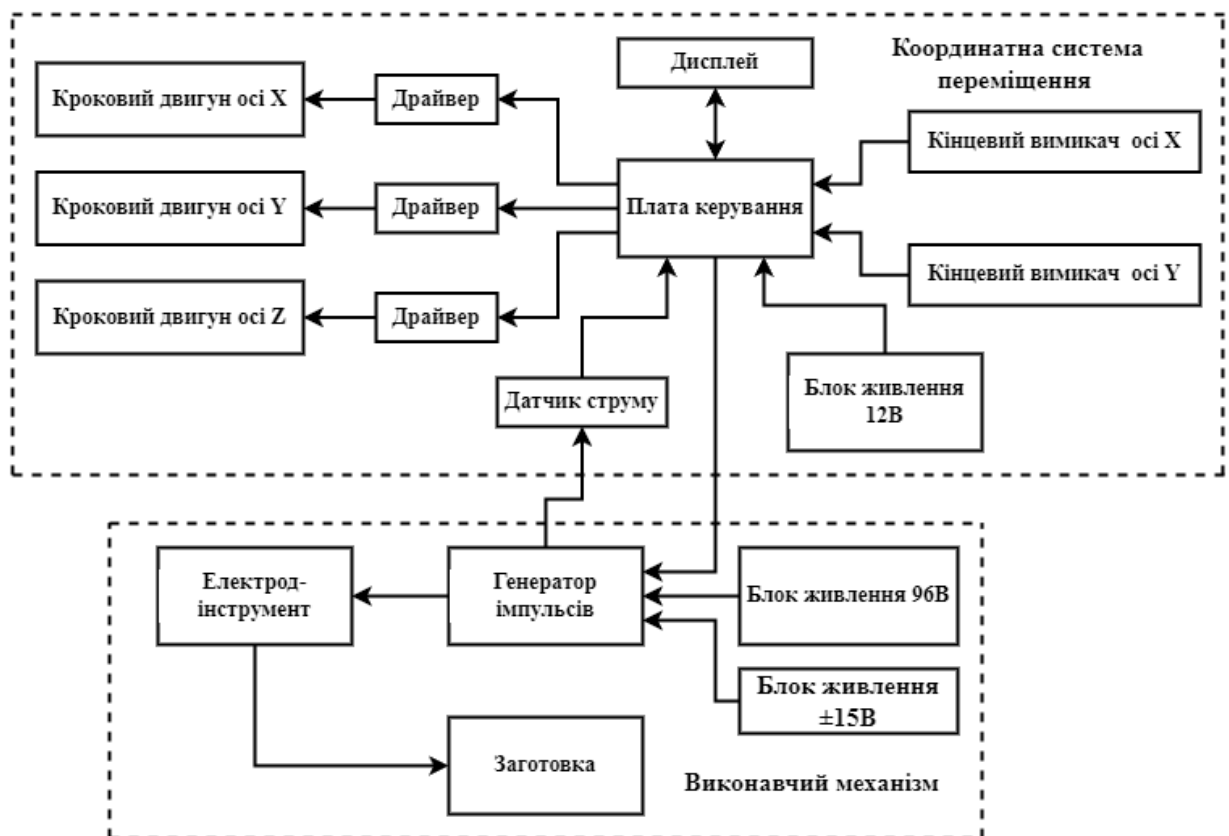


Рисунок 2.1 – Структурна блок-схема електроерозійного верстата

Основні компоненти верстата включають:

- плату керування, яка є центральним елементом системи та управляється програмно. Вона обробляє вхідні дані та відправляє команди до драйверів та генератора імпульсів;

- дисплей, що використовується для налаштувань та візуалізації інформації в процесі роботи;
- драйвер, який відповідає за управління кроковим двигуном, регулюючи його швидкість і напрямком. Драйвер перетворює сигнали від плати керування і передає їх на двигун;
- кроковий двигун, що забезпечує точне переміщення і позиціонування електрод-інструменту відносно заготовки [14];
- кінцевий вимикач, використовуваний для визначення меж координатної системи і як аварійний обмежувач за координатами;
- датчик струму, що дозволяє контролювати положення електрод-інструменту відносно заготовки і надає зворотний зв'язок для системи [14].

2.2 Вибір електронних компонентів координатної системи з ЧПУ

Управління переміщенням виконавчого механізму верстата реалізовано за допомогою Arduino Mega 2560 Rev3, побудованого на мікроконтролері ATmega 2560 (рис. 2.2).

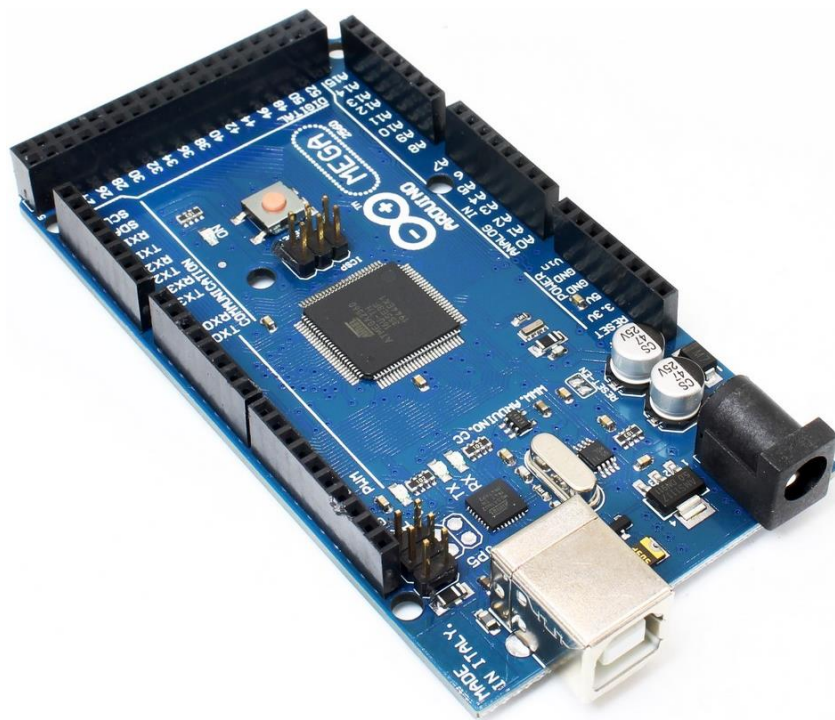


Рисунок 2.2 – Arduino Mega 2560 Rev3

Arduino Mega 2560 – це розширена версія Arduino Uno побудована на мікроконтролері ATmega2560, має більше контактів – 54 цифрових входів/виходів (14 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 16 аналогових входів, більша кількість апаратних serial-портів – 4 послідовних порту UART, кварцовий генератор 16 МГц, USB конектор, роз'єм живлення, роз'єм ICSP та кнопка перезавантаження.

Для роботи з Mega 2560 необхідно підключити платформу до комп'ютера за допомогою кабелю USB або подати живлення за допомогою адаптера AC/DC або акумуляторною батареєю. Arduino Mega 2560 сумісна з усіма платами розширення, розробленими для платформ Arduino Uno або Duemilanove.

Arduino Mega 2560 Rev3 – це остання модель, що прийшла на зміну попереднім Arduino Mega 2560 і Mega 1280. Версія Rev3 включає чіп Atmega16U2 (у версіях Rev1 і Rev2 Atmega8U2) з програмною прошивкою конвертера «USB-наслідків» ранніх версіях мікросхем FTDI. Мікроконтролер ATmega16U2 дозволяє використовувати контролер Arduino Mega2560 як USB-NID пристрій. При перепрошивці цього мікроконтролера можна використовувати контролер як клавіатуру, мишу або ігровий джойстик.

Більш докладні технічні характеристики Arduino Mega 2560 представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики Arduino Mega 2560 Rev3 [15]

Характеристика	Од. вим.	Значення
Мікроконтролер		ATmega2560
Робоча напруга	В	5
Вхідна напруга (рекомендована)	В	від 7 до 12
Вхідна напруга (гранична)	В	від 6 до 20
Цифрові входи/виходи	шт	54 (14 з яких можуть працювати як виходи ШІМ)
Аналогові входи	шт	16

Продовження таблиці 2.1

Постійний струм через вхід/вихід	мА	40
Постійний струм для виведення	В/мА	3,3/50
Флеш пам'ять	кБ	256 (з яких 8 використовуються для завантажувача)
Оперативна пам'ять	кБ	8
Енергонезалежна пам'ять	кБ	4
Тактова частота	МГц	16
Розміри	мм	102 × 53

Arduino Mega може живитися як через підключення USB, так і від зовнішнього джерела живлення. Джерело живлення вибирається автоматично.

Зовнішнє живлення (не USB) може подаватися через перетворювач AC/DC (блок живлення) або від акумуляторної батареї. Перетворювач напруги підключається за допомогою роз'єму 2,1 мм із позитивним полюсом на центральному контакті. Дріт від батареї підключається до виводів Gnd і Vin роз'єму живлення (POWER).

Платформа може працювати при зовнішньому живленні від 6 В до 20 В. При напрузі живлення нижче 7 В, вивід 5V може видавати менше 5 В, при цьому платформа може працювати нестабільно. При використанні напруги вище 12 В регулятор напруги може перегрітися та пошкодити плату. Рекомендований діапазон від 7 В до 12 В.

Плата Mega2560, на відміну від попередніх версій плат, не використовує FTDI USB мікроконтролер. Для обміну даними по USB використовується мікроконтролер Atmega16U2, запрограмований як конвертер USB-to-serial.

Опис елементів плати Arduino Mega 2560:

а) мікроконтролер ATmega2560 – серцем платформи Arduino Mega 2560 є 8-бітний мікроконтролер сімейства AVR – ATmega2560. Він надає 256 КБ флеш-пам'яті для зберігання прошивки, 8 КБ оперативної пам'яті SRAM та 4

КБ енергонезалежної пам'яті EEPROM для зберігання даних;

б) мікроконтролер ATmega16U2 – мікроконтролер ATmega16U2 забезпечує зв'язок мікроконтролера ATmega2560 з USB-портом комп'ютера. При підключенні до комп'ютера Arduino Mega 2560 визначається як віртуальний COM-порт. Прошивка мікросхеми 16U2 використовує стандартні драйвери USB-COM – встановлення зовнішніх драйверів не потрібно;

в) порти введення/виводу;

г) світлодіодна індикація:

1) RX і TX – блимають під час обміну даними між Arduino Mega 2560 та ПК;

2) L – світлодіод виведення 13. При заданні значення HIGH світлодіод вмикається, при LOW – вимикається;

3) ON – наявність живлення на Arduino Mega 2560;

4) USB Type-B – роз'єм USB Type-B призначений для прошивки платформи Arduino Mega 2560 за допомогою комп'ютера;

д) роз'єм для зовнішнього живлення – роз'єм для підключення зовнішнього живлення від 7 В до 12 В;

е) ICSP-роз'єм для ATmega2560 – ICSP-роз'єм призначений для внутрішньосхемного програмування мікроконтролера ATmega2560. Також із застосуванням бібліотеки SPI дані висновки можуть здійснювати зв'язок із платами розширення за інтерфейсом SPI. Лінії SPI виведені на 6-контактний роз'єм, а також продубльовані на цифрових пінах 50(MISO), 51(MOSI), 52(SCK) та 53(SS);

ж) ICSP-роз'єм для ATmega16U2 – ICSP-роз'єм для внутрішньосхемного програмування мікроконтролера ATmega16U2 [15].

Для покращення можливостей Arduino та спрощення інтеграції інших елементів в конструкції верстата, використовується плата розширення RAMPS 1.6 (рис. 2.3). Ця плата, первинно розроблена для виготовлення 3D-принтерів на базі Arduino, відмінно підходить для наших потреб, оскільки її функціональність використовується майже повністю.

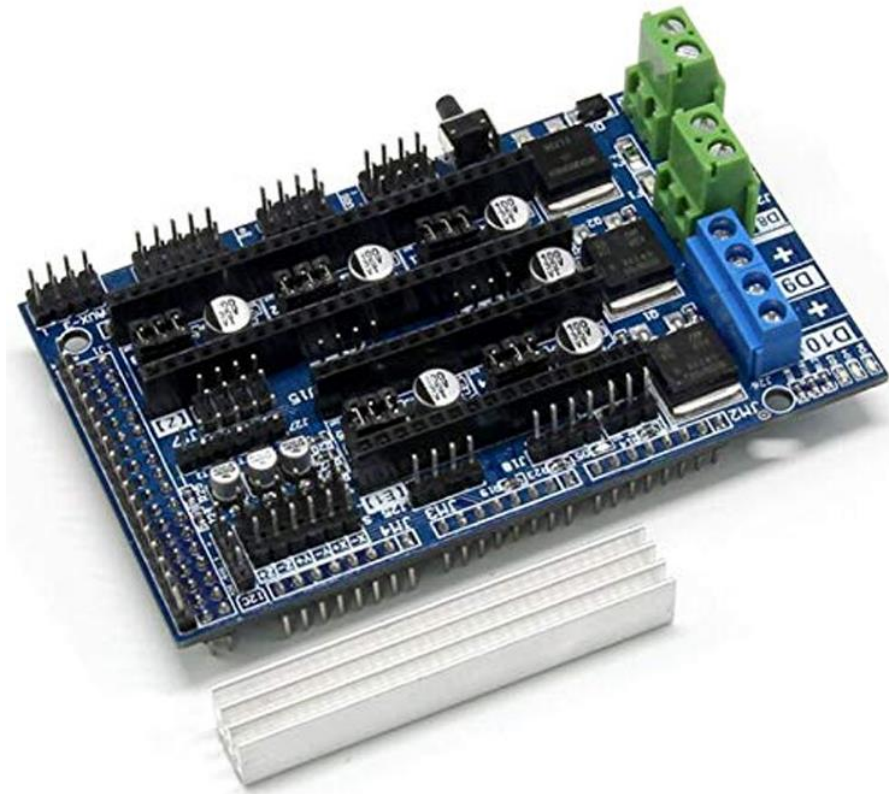


Рисунок 2.3 – Плата розширення RAMPS 1.6

Плата розширення RAMPS 1.6 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) є оновленою версією популярної плати RAMPS 1.4 для управління 3D-принтерами і іншими пристроями на базі Arduino. Ця плата є частиною open-source проекту RepRap, спрямованого на створення самовідтворювальних 3D-принтерів. RAMPS 1.6 забезпечує зручний інтерфейс між багатофункціональною платою Arduino Mega 2560 та різними компонентами 3D-принтера, такими як крокові двигуни, нагрівальні елементи та датчики.

Основні характеристики RAMPS 1.6:

- сумісність з Arduino Mega 2560: плата призначена для роботи з Arduino Mega 2560, забезпечуючи потужну платформу для управління 3D-принтерами;
- покращена теплова стійкість: порівняно з попередніми версіями, RAMPS 1.6 має покращену теплову стійкість завдяки використанню якісних друкованих доріжок і компонентів;

- підтримка кількох крокових двигунів: може управляти до 5 кроковими двигунами незалежно (зазвичай X, Y, Z осі та два екструдери). Це забезпечує гнучкість для складних конструкцій 3D-принтерів;
- модульність: RAMPS 1.6 підтримує підключення різних додаткових модулів, таких як драйвери крокових двигунів, модулі управління нагріванням, датчики кінцевих перемикачів, LCD дисплеї та інше;
- драйвери крокових двигунів: сумісна з драйверами A4988, DRV8825 та іншими, що дозволяє користувачам обирати оптимальні драйвери залежно від потреб;
- розширена підтримка нагрівальних елементів: плата має виходи для підключення нагрівального столу та двох нагрівальних елементів для екструдерів, забезпечуючи контроль температури для різних матеріалів;
- додаткові функції: включає підтримку датчиків температури, вентиляторів охолодження, і можливість розширення для додаткових функцій, таких як автоматичне вирівнювання ліжка;
- покращений дизайн: RAMPS 1.6 була розроблена з урахуванням зворотного зв'язку користувачів попередніх версій, що призвело до покращення дизайну, включно з більш надійними з'єднаннями та кращим розподілом потужності;
- відкрите програмне забезпечення та апаратне забезпечення: RAMPS 1.6 продовжує традиції RepRap проекту, надаючи відкритий доступ до програмного та апаратного забезпечення, що дозволяє спільноті вносити власні покращення та модифікації.

Плата RAMPS 1.6 широко використовується у DIY 3D-принтерах, ЧПУ машинах, граверах та інших проектах, де потрібне керування кроковими двигунами та іншими компонентами. Завдяки своїй модульності та гнучкості, вона дозволяє реалізувати різноманітні проекти в області автоматизації та робототехніки [16].

Для точного руху та позиціонування електрод-інструмента використовуються крокові двигуни типу NEMA 17 (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Кроковий двигун NEMA 17 17HS3401

Крокові двигуни цього типу є синхронними безщітковими моторами з декількома обмотками, які при подачі струму в одну з обмоток статора забезпечують фіксоване положення ротора. Чергове включення обмоток мотора спричиняє його ротор переміщуватися на певні кути, відомі як кроки.

Двигун NEMA 17 характеризується розміром його передньої панелі 1,7 дюйма на 1,7 дюйма і забезпечує більший крутний момент порівняно з меншими кроковими двигунами, наприклад, NEMA 14. Цей тип двигуна має шість дротів, працює на напрузі 12 В і має номінальний струм до 2,5 А, хоча це може змінюватися в залежності від конкретної моделі. При використанні меншої напруги, крутний момент двигуна знижується.

З кожним кроком вал двигуна NEMA17 обертається на $1,8^\circ$. Схема підключення шести дротів двигуна NEMA 17 показана на рис. 2.5.

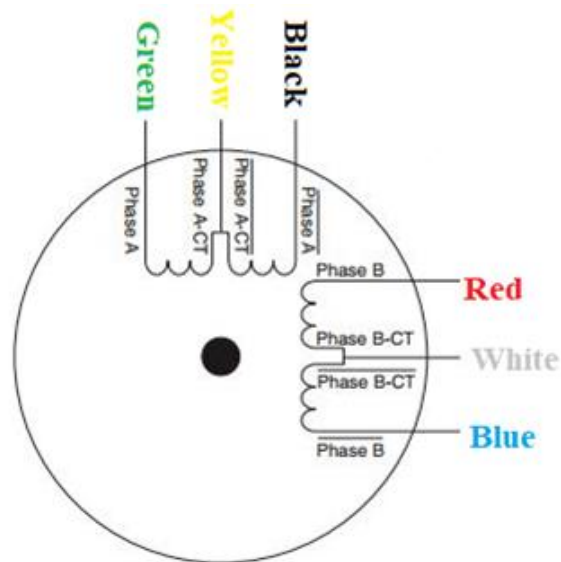


Рисунок 2.5 – Схема підключення двигуна NEMA 17

Згідно з цією схемою, двигун має уніполярне підключення шести дротів, які з'єднані з двома окремими обмотками. Чорний, жовтий та зелений дроти підключені до першої обмотки, тоді як червоний, білий та синій дроти – до другої обмотки. В стандартному режимі роботи центральні дроти обмоток (жовтий та білий) залишаються вільними [17].

Управління рухом крокових двигунів виконується за допомогою драйвера DRV8825 (рис. 2.6).

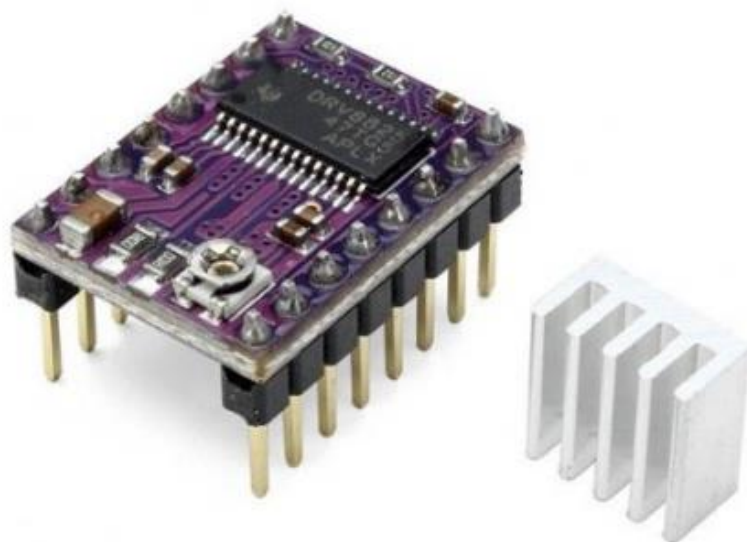


Рисунок 2.6 – Драйвер крокового двигуна DRV8825

DRV8825 є мікросхемою драйвера крокового двигуна, яка широко застосовується в різноманітних проектах, зокрема в 3D-принтерах, ЧПУ машинах та іншому обладнанні для управління кроковими двигунами. Цей драйвер забезпечує високу продуктивність і гнучкість управління кроковими двигунами, дозволяючи користувачам налаштувати різні параметри, такі як струм і крок, для оптимальної роботи двигуна.

Особливістю DRV8825 є його здатність до мікрокрокування, яке дозволяє двигуну робити дуже малі кроки для плавного та точного руху. Завдяки цьому можливе деталізоване управління рухом, що є критично важливим для застосувань, де потрібна висока точність, наприклад, в 3D-друку.

DRV8825 може підтримувати струм до 2,5 А на канал при належному охолодженні, що робить його здатним керувати великою кількістю крокових двигунів без необхідності додаткових компонентів для управління струмом. Ця характеристика дозволяє використовувати драйвер в різноманітних проектах без значних обмежень за потужністю.

Для налаштування струму, що протікає через двигун, використовується потенціометр на платі драйвера. Це дозволяє користувачам легко адаптувати робочі параметри драйвера під конкретний кроковий двигун, забезпечуючи оптимальну роботу системи та зниження ризику перегріву.

DRV8825 також має захист від перенапруги, перегріву та короткого замикання, що робить його надійним рішенням для тривалого використання в проектах. Ці захисні функції гарантують стабільну роботу драйвера навіть у випадках, коли робочі умови не є ідеальними.

Однією з ключових переваг DRV8825 є його здатність до мікрокрокування з роздільною здатністю до 1/32 кроку, що забезпечує високу роздільну здатність руху та дозволяє досягти виняткової плавності роботи двигуна. Ця функція особливо корисна в застосуваннях, де важливі мінімальні вібрації та висока точність розташування.

Завдяки своїм характеристикам та гнучкості у налаштуванні, DRV8825 є популярним вибором серед розробників та хобістів, які шукають надійний та

ефективний спосіб управління кроковими двигунами в своїх проектах. [18].

Для налаштування параметрів роботи та відображення важливої інформації використовується дисплейний модуль RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Модуль RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller

RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller є популярним інтерфейсом для управління 3D-принтерами і ЧПУ машинами, які працюють на базі відкритих платформ, таких як RAMPS 1.4, RAMPS 1.6, або інших сумісних з Arduino контролерів. Цей контролер дозволяє користувачам безпосередньо взаємодіяти з принтером або машиною, надаючи можливість запуску друку, паузи, налаштування параметрів та моніторингу процесу друку без необхідності підключення до комп'ютера.

Контролер оснащений великим графічним LCD-дисплеєм, який забезпечує відображення інформації з високою роздільною здатністю та інтерфейсом, зручним для користувача. Дисплей показує таку інформацію, як температура нагрівальних елементів, стан осей, прогрес друку та інші критичні дані, необхідні для ефективного управління процесом друку.

Крім графічного дисплея, на панелі контролера розташована кнопка-

енкодер, яка дозволяє користувачам легко навігувати по меню та вибирати потрібні налаштування. Це робить інтерфейс дружелюбним та інтуїтивно зрозумілим, зменшуючи поріг входження для нових користувачів та спрощуючи процес управління для досвідчених операторів.

Контролер підтримує SD-картку для безпосереднього читання файлів друку, що дозволяє виконувати друк без прямого підключення до комп'ютера. Ця функція робить 3D-принтер або ЧПУ машину більш автономними, дозволяючи користувачам використовувати їх в місцях, де доступ до комп'ютера обмежений або недоступний.

Інтеграція з популярними прошивками, такими як Marlin, Repetier або іншими, що підтримують графічні інтерфейси, робить RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller універсальним рішенням для широкого спектру 3D-принтерів та ЧПУ машин. Прошивка може бути налаштована для використання всіх можливостей контролера, включаючи кастомізацію екранів, додавання спеціальних команд та оптимізацію інтерфейсу під конкретні потреби користувача.

Завдяки своїм функціям, зручності використання та широкій сумісності, RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller є важливим аксесуаром для будь-якого проекту 3D-друку або автоматизації, де потрібен надійний, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для управління процесами [19].

Для визначення меж координатної системи у конструкції ЧПУ-верстата використовуються оптичні кінцеві вимикачі (Endstop) (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Оптичний кінцевий вимикач (Endstop)

Оптичний кінцевий вимикач (EndStop) є компонентом, який широко використовується в автоматизованих системах, таких як 3D-принтери, ЧПУ машини та робототехніка, для точного визначення положення рухомих частин машини. Відрізняючись від механічних або магнітних кінцевих вимикачів, оптичні вимикачі працюють, використовуючи світловий промінь для визначення присутності або відсутності об'єкта без фізичного контакту з ним.

Оптичний кінцевий вимикач складається з передавача, який генерує світловий промінь (зазвичай інфрачервоне світло), і приймача, який виявляє цей промінь. Коли об'єкт перериває світловий промінь, приймач фіксує цю подію, і система управління отримує сигнал про досягнення кінцевої точки або про перешкоду на шляху рухомої частини.

Переваги оптичних кінцевих вимикачів:

- безконтактна робота: оскільки оптичні вимикачі не вимагають фізичного контакту, вони менш схильні до зносу та пошкодження, що збільшує їхній термін служби порівняно з механічними вимикачами;
- висока точність: оптичні вимикачі можуть дуже точно визначати положення, що є ідеальним для застосувань, де потрібна висока роздільна здатність або точність;
- швидка реакція: реагують на переривання світлового променя дуже швидко, що дозволяє застосовувати їх у системах з високою швидкістю руху;
- імунітет до електромагнітних перешкод: на відміну від інших типів датчиків, оптичні вимикачі менше схильні до помилок через електромагнітні перешкоди, що робить їх надійними в складних промислових умовах.

Оптичні кінцеві вимикачі застосовуються в різноманітних областях, де потрібне точне визначення положення або контроль за рухомими частинами. Вони є незамінними в 3D-принтерах для визначення початкових позицій осей, в ЧПУ машинах для контролю за рухом інструментів, а також в робототехніці та автоматизованих виробничих лініях для різноманітних задач виявлення та позиціонування [20].

2.3 Проектування та моделювання елементів конструкції електроерозійного верстата з ЧПУ

Використовуючи програмний пакет Fusion 360, було спроектовано корпус системи керування верстатом. Результати цього проектування демонструється на рисунку 2.9

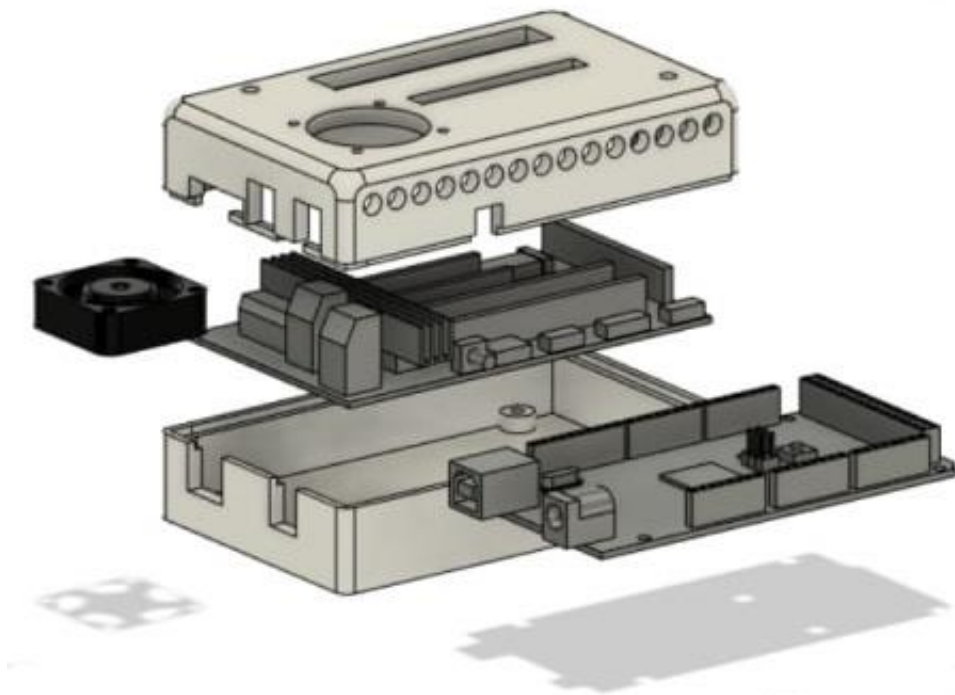


Рисунок 2.9 – «Вибух-схема» корпусу системи керування верстатом

Конструкція корпусу (рис. 2.10 – 2.13) розрахована на розміщення плати Arduino Mega 2560 Rev3 у поєднанні з платою розширення RAMPS 1.6. Для забезпечення достатнього охолодження компонентів, корпус обладнано монтажним місцем для вентилятора розміром 30 мм × 30 мм × 10 мм. Виготовлення корпусу здійснюється за допомогою 3D-друку, використовуючи технологію FFF.

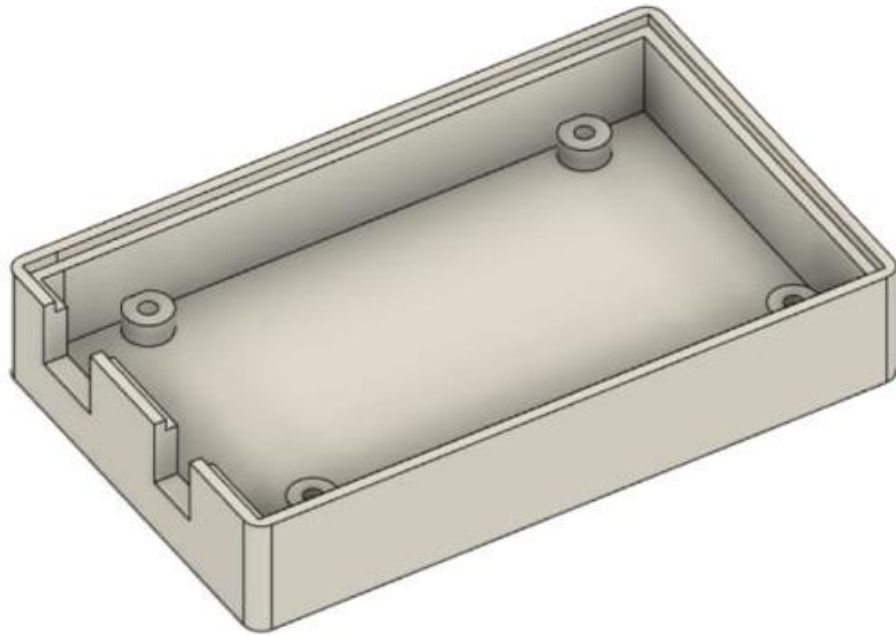


Рисунок 2.10 – 3D модель базової частини корпусу

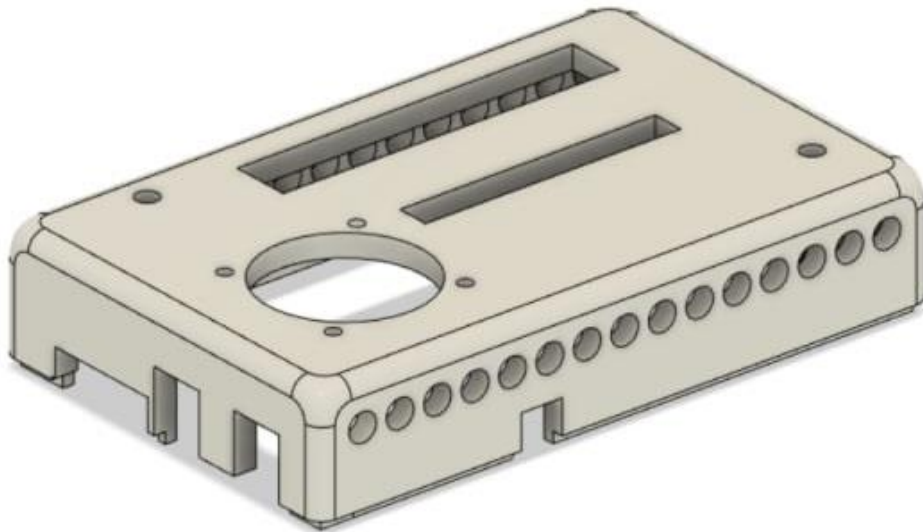


Рисунок 2.11 – 3D модель кришки кришки корпусу

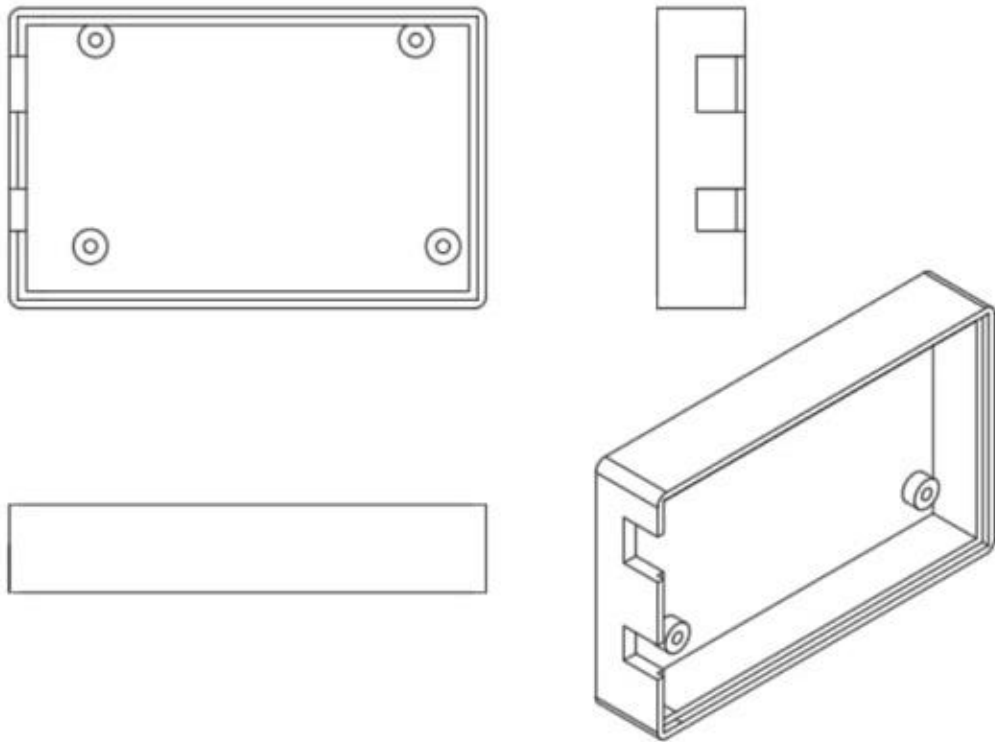


Рисунок 2.12 – Ескіз базової частини корпусу

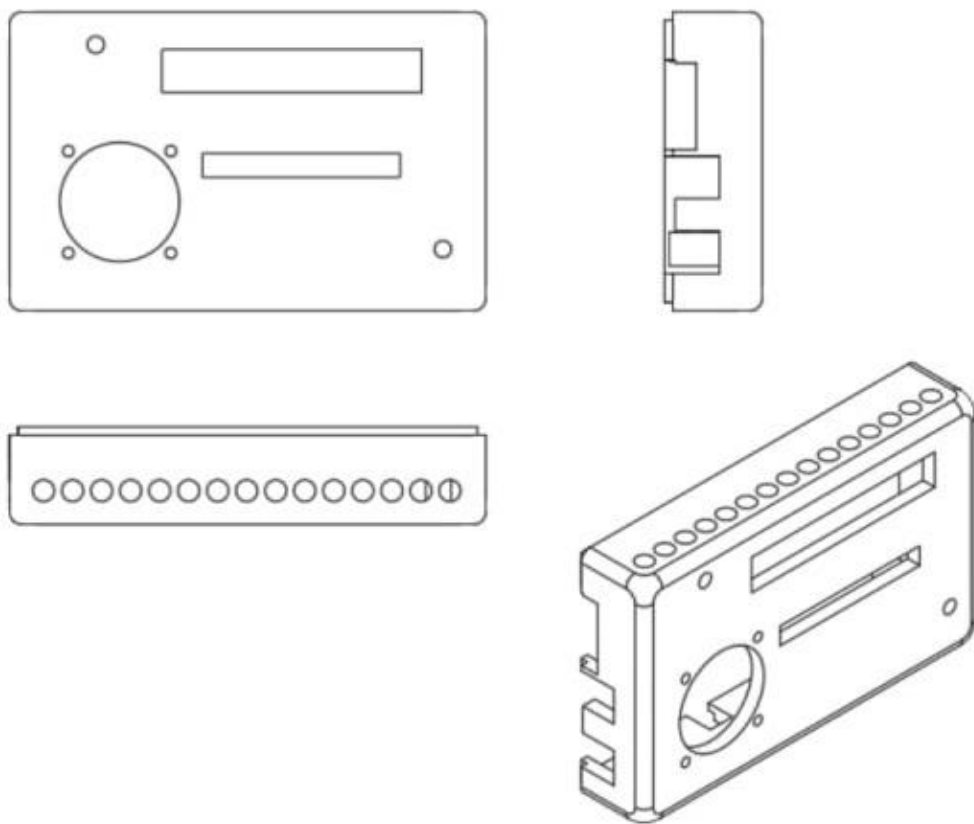


Рисунок 2.13 – Ескіз кришки корпусу

На рис. 2.14 - 2.15 демонструється кронштейн для кріплення крокових двигунів серії NEMA 17.

Кронштейн для монтажу крокового двигуна розроблено для встановлення на верстатний профіль розмірами 30 мм × 30 мм та призначений для з'єднання з опорою кульково-гвинтової передачі (КГП).

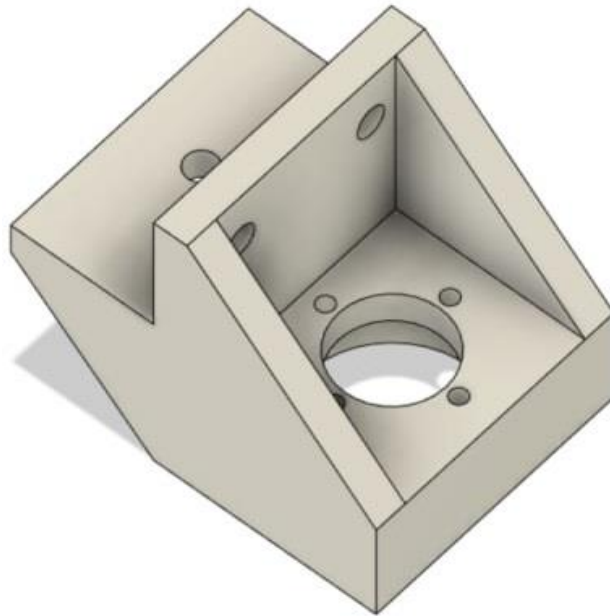


Рисунок 2.14 – 3D модель кронштейну

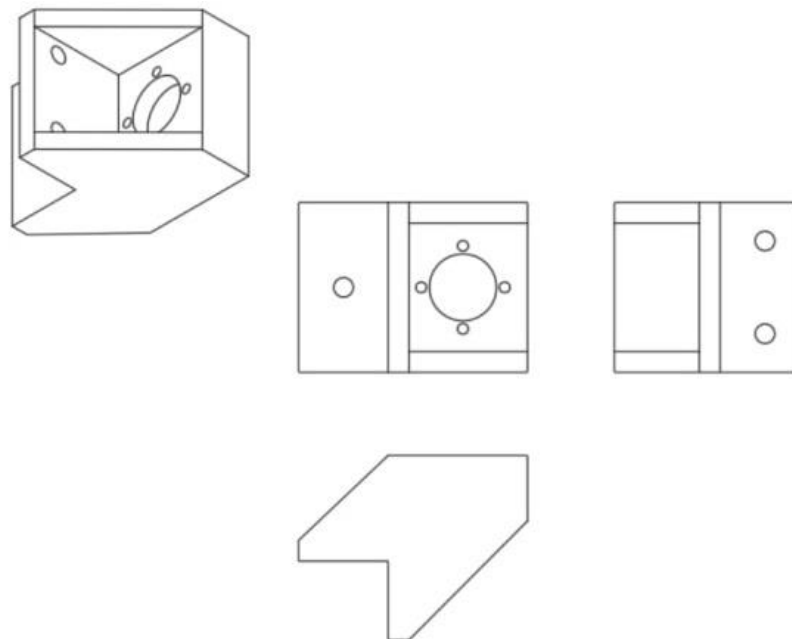


Рисунок 2.15 – Ескіз кронштейну

2.4 Розробка конструкції виконавчого механізму

2.4.1 Розробка та аналіз схеми електричної принципової

Була розроблена схема електрична принципова основної частини виконавчого механізму – генератора імпульсів високої частоти (рис. 2.16).

У процесі створення цієї схеми було застосовано інструмент EasyEDA. EasyEDA – це універсальне веб-базоване середовище для автоматизації проектування електронних схем. Воно включає функціонал для створення принципів схем, розробки друкованих плат, проведення SPICE-симуляцій, а також має можливості для хмарного зберігання даних, управління проектами та навіть замовлення виробництва друкованих плат [21].

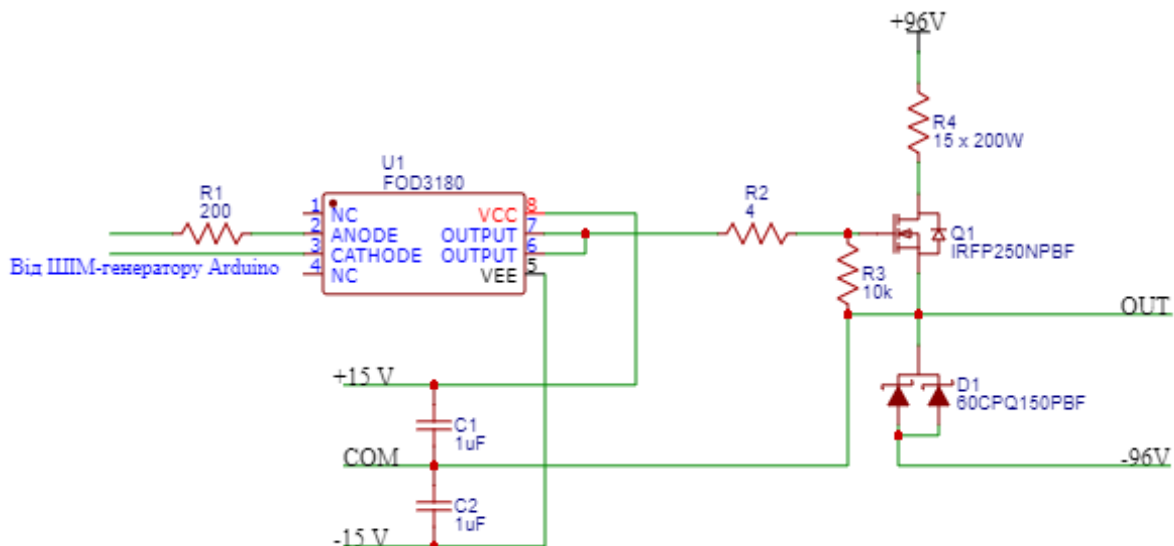


Рисунок 2.16 – Схема електрична принципова генератора імпульсів

У основі цієї схеми лежить силовий ключ, в якому ключову роль відіграє n-канальний MOSFET-транзистор високої напруги. MOSFET-транзистори, що є польовими транзисторами з ізольованим затвором, характеризуються метал-оксид-напівпровідниковою структурою (MOS) і керуються за допомогою електричного поля (Field-Effect). Вони управляються за допомогою напруги, що створює внутрішнє поле, відрізняючись від біполярних транзисторів, що управляються струмом.

У відкритому стані, MOSFET-транзистор функціонує як резистор, залежно від протікаючого струму. Втім, його опір не є постійним і злегка зростає зі збільшенням струму. У закритому стані опір MOSFET-транзистора може сягати декількох МОм, а в відкритому стані знижується до одиниць Ом або мОм.

Однією з проблем підключення MOSFET-транзистора до мікроконтролера є необхідність подачі достатньо високої напруги на затвор для його повного відкриття. Оскільки обраний мікроконтролер може видавати лише до 5 В, для цього використовується спеціальний драйвер-мікросхема.

У якості силового джерела живлення в схемі використовуються два блоки живлення на 48 В з можливістю подачі струму до 8,3 А, які підключаються послідовно, утворюючи на виході двухполярну напругу ± 96 В. Для живлення мікросхеми драйвера використовується двухполярний блок живлення ± 15 В. Використання двухполярного блока живлення зумовлене високою частотою роботи схеми та дозволяє забезпечити більш швидке та надійне закриття транзистора.

Для захисту від зворотних імпульсів, викликаних перехідними процесами, використовується діод Шотткі, який характеризується швидкою реакцією та малим падінням напруги.

Струм у ланцюзі контролюється та обмежується за допомогою резистора підключеного до стоку транзистора. Цей резистор має бути потужним для розсіювання значної кількості тепла, оскільки через нього протікатиме значний струм.

2.4.2 Вибір електронних компонентів

У якості силового транзистора було обрано модель IRFP250NPbF. Детальні технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики транзистора IRFP250NPbF [22]

Характеристика	Од. вим.	Значення
Структура		n-канал
Максимальна напруга сток-витік	В	200
Максимальний струм сток-витік при 25°C	А	30
Максимальна напруга затвор-витік	В	20
Опір каналу у відкритому стані (макс) при I_D	МОм	75/18 А, 10 В
Максимальна розсіювана потужність	Вт	190
Крутизна характеристики	S	17
Корпус		ТО-247АС
Порогова напруга на затворі		4
Вага	г	7,5

Керування затвором транзистора в даній схемі виконується за допомогою драйвера FOD3180.

FOD3180 відноситься до категорії високошвидкісних оптопар, які забезпечують гальванічну ізоляцію між вхідним і вихідним сигналами. Цей компонент широко застосовується для передачі сигналів між різними електричними ланцюгами, забезпечуючи при цьому захист від електричних перешкод, що особливо важливо в промислових додатках та системах, де висока напруга або струми можуть викликати збої в роботі чутливого електронного обладнання.

Основною особливістю FOD3180 є його здатність працювати при дуже високих швидкостях передачі сигналу, що робить його ідеальним для використання в системах управління потужністю, цифрових інтерфейсах та інших додатках, де швидка реакція на сигнали є критично важливою. Він має вбудований світлодіод на вході та фотодетектор на виході, які розділені оптичною ізоляцією, забезпечуючи ефективну ізоляцію вхідної та вихідної частин.

Завдяки цій оптичній ізоляції, FOD3180 може захистити низьковольтні ланцюги від високих напруг, забезпечуючи безпеку та надійність в системах, де присутній ризик електричних перешкод або потенційних пошкоджень від

високої напруги. Цей компонент здатний працювати при широкому діапазоні температур, що робить його придатним для застосування в різноманітних умовах, від промислових додатків до споживчої електроніки.

Використання FOD3180 дозволяє розробникам досягти високої швидкості передачі даних із водночас забезпеченням високого рівня ізоляції, що є важливим для запобігання впливу шуму та забезпечення стабільності роботи систем. Також, ця оптопара може використовуватися для управління потужними навантаженнями, такими як мотори або інші великі споживачі енергії, дозволяючи контролювати їх за допомогою слабких сигналів без ризику пошкодження керуючої електроніки.

Застосування таких компонентів, як FOD3180, в сучасній електроніці та автоматизації дозволяє створювати ефективні, безпечні та надійні системи, здатні витримувати випробування важкими умовами експлуатації та високими електричними навантаженнями.

Основні технічні характеристики цього драйвера наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики драйвера FOD3180 [23]

Характеристика	Од. вим.	Значення
Виробник		ON Semiconductor
Тип корпусу		PDIP-8
Тип виходу		Push-Pull
Кількість каналів		1 Channel
Напруга ізоляції	В	5000
Прямий струм	мА	25
Пряма напруга	В	1,43
Зворотна напруга	В	5
Розсіювання потужності	мВт	295
Робоча температура	°С	від -40 до +100
Час спаду	нс	55
Час наростання	нс	75

У якості зворотного діода обрано модель VS-60CPQ150PBF. Це збірка на базі двох діодів Шоттки зі спільним катодом.

Детальні технічні характеристики діода приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики VS-60CPQ150PBF [24]

Характеристика	Од. вим.	Значення
Матеріал		кремній
Кількість діодів у корпусі		2
Конфігурація діода		1-пара, спільний катод
Максимальна постійна зворотна напруга	В	150
Максимальний (середній) прямий струм на діод	А	30
Максимальна пряма напруга при 25°C	мВ	830 при 30 А
Максимальний зворотний струм при 25°C	мкА	100 при 150 В
Робоча температура переходу	°С	від -55 до +175
Корпус		ТО-247-3/ТО-247АС
Вага	г	7,5

VS-60CPQ150PBF є високопродуктивним діодним мостом (Schottky barrier rectifier) виробництва Vishay, який спеціалізується на напівпровідникових компонентах.

Такі діоди Шоттки, як VS-60CPQ150PBF, часто застосовуються в джерелах живлення, інверторах, системах управління потужністю та інших додатках, де потрібна ефективна робота при високих частотах та потужностях. Основні характеристики цього діода включають здатність витримувати високі робочі температури та надійно працювати в умовах великого тепловиділення, що є критично важливим для компонентів, призначених для використання в потужних джерелах живлення та інверторах.

Ключовою особливістю VS-60CPQ150PBF є його здатність витримувати високу пряму потужність та напругу, що робить його ідеальним для застосувань, де необхідно ефективно управляти великими потоками енергії. Діоди Шотткі, завдяки своїм унікальним властивостям, забезпечують менші втрати потужності порівняно з традиційними кремнієвими діодами, що дозволяє підвищити ефективність системи загалом.

Використання діодного мосту VS-60CPQ150PBF також дозволяє знизити рівень шуму в електричній системі, оскільки висока швидкість перемикачання та низьке пряме падіння напруги зменшують вироблення електромагнітних перешкод. Це робить компонент особливо привабливим для використання в чутливих до шуму додатках, таких як аудіо- та відеоапаратура, високочотні вимірювальні прилади та комунікаційне обладнання.

2.4.3 Проектування та моделювання елементів виконавчого механізму

У програмі EasyEDA було проведено проектування, розробка та моделювання друкованої плати генератора імпульсів. Результати приведені на рис. 2.17 – 2.22.

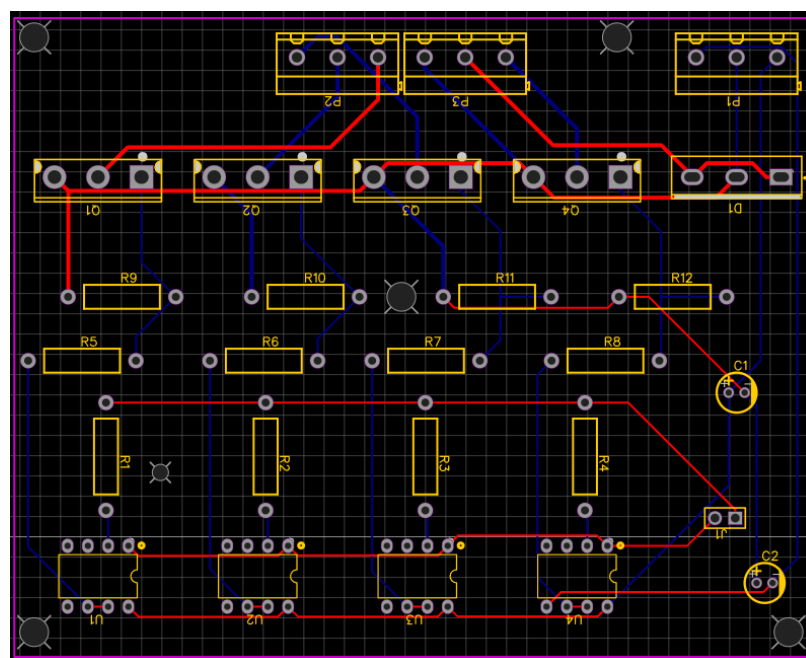


Рисунок 2.17 – Проект друкованої плати у програмі EasyEDA

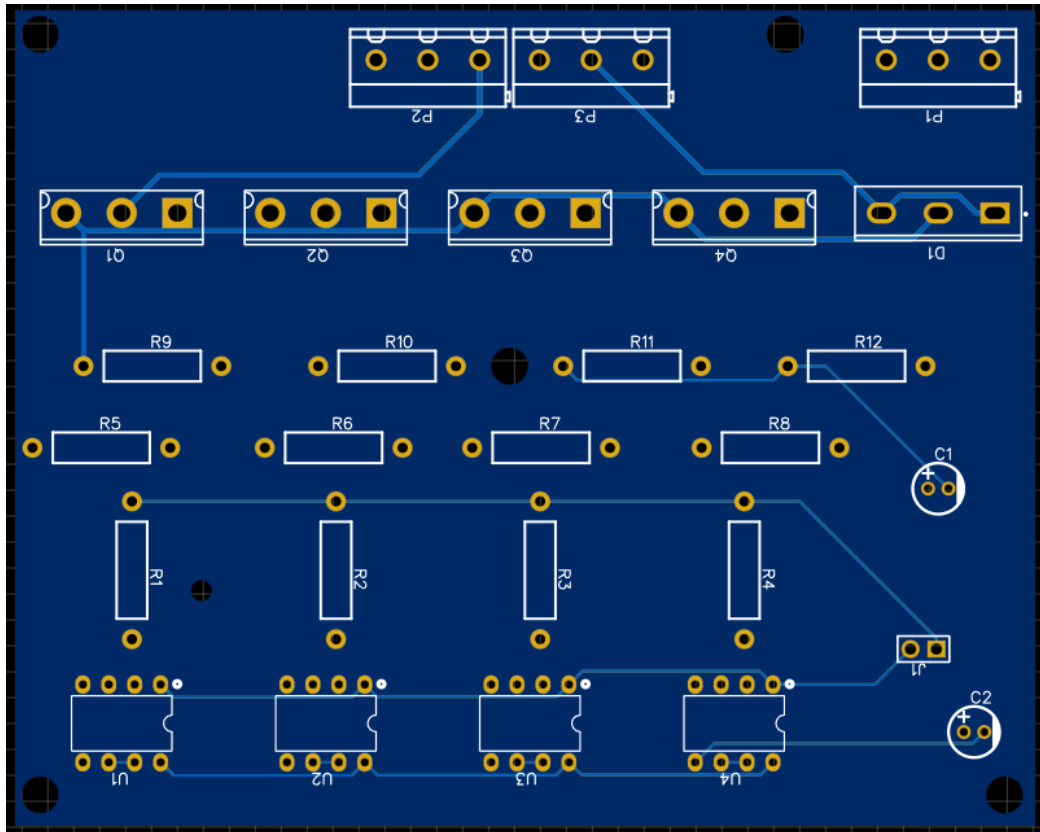


Рисунок 2.18 – 2D модель друкованої плати (лицьова сторона)

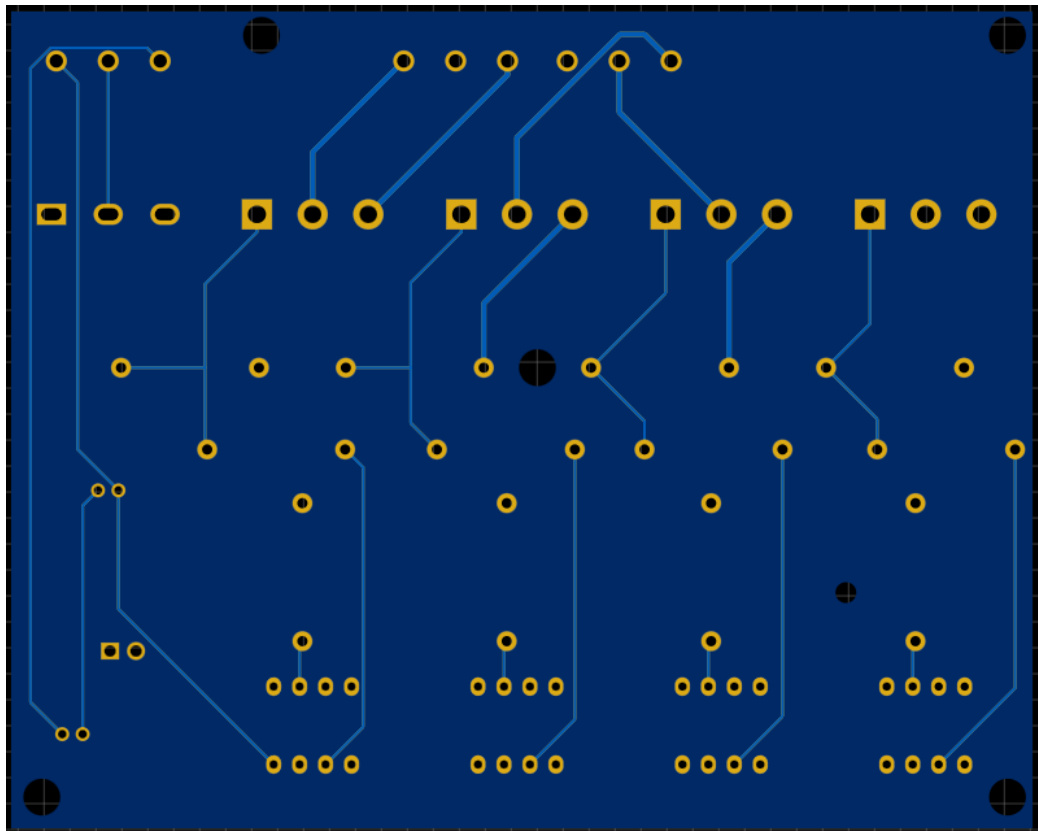


Рисунок 2.19 – 2D модель друкованої плати (зворотна сторона)

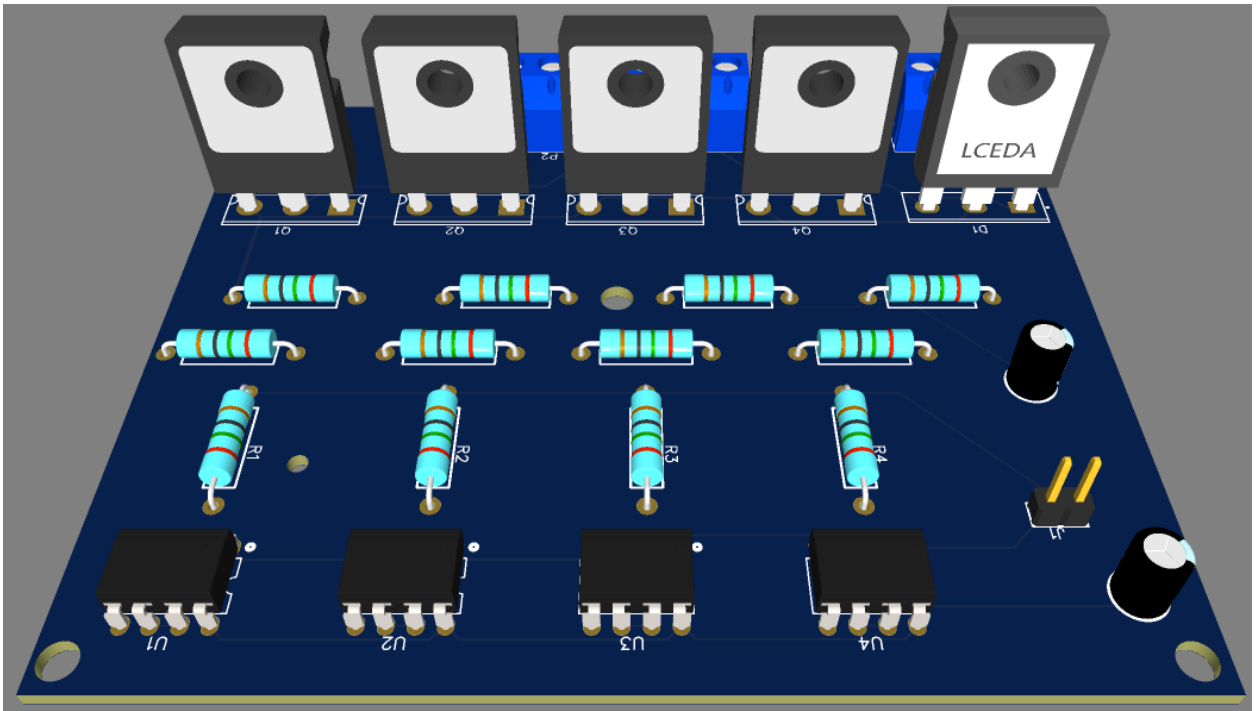


Рисунок 2.20 – 3D модель друкованої плати

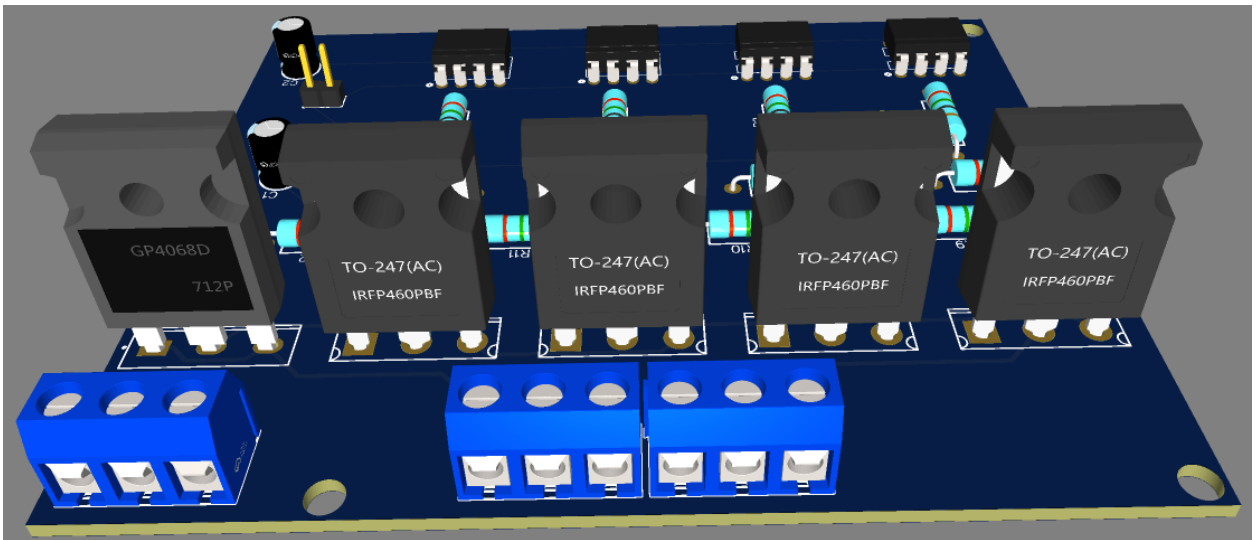


Рисунок 2.21 – 3D модель друкованої плати

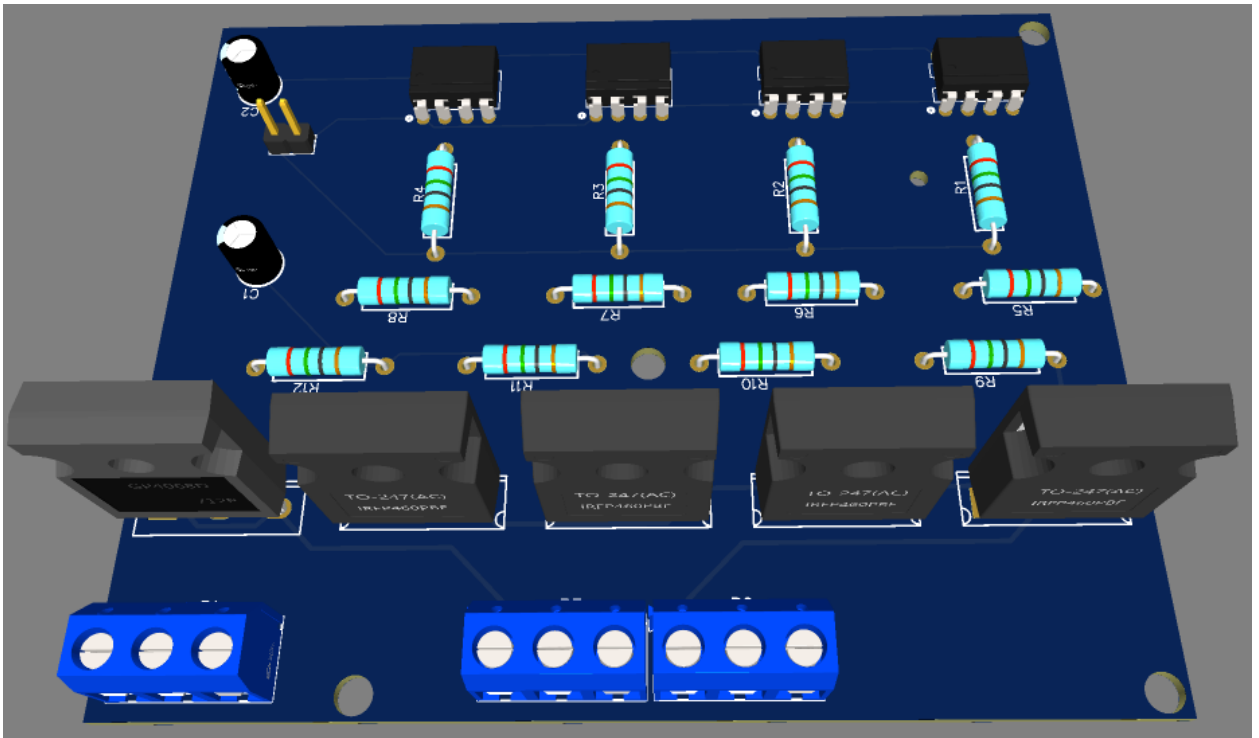


Рисунок 2.22 – 3D модель друкованої плати

2.5 Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було розроблено блок-схему електроерозійного верстата з ЧПУ, яка визначає основні функціональні частини верстата, їх взаємозв'язки та призначення.

Обрано електронні компоненти для побудови координатної системи верстата з ЧПУ.

Зпроектовано та змодельовано деякі елементи конструкції електроерозійного верстата з ЧПУ.

Розроблено конструкцію виконавчого механізму електроерозійного верстата – генератора імпульсів високої частоти, а саме:

- розроблено схему електричну принципова;
- проведено вибір електронних компонентів;
- зпроектовано та змодельовано друковану плату виконавчого механізму.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИМ ЧПУ ВЕРСТАТОМ

3.1 Розробка системи керування

На основі структурної блок-схеми (рис. 2.1) електроерозійного верстата з ЧПУ було розроблено структурну схему управління верстатом (рис. 3.1), яка складається з наступних елементів:

- плата управління;
- кроковий двигун;
- КГП;
- датчик струму.

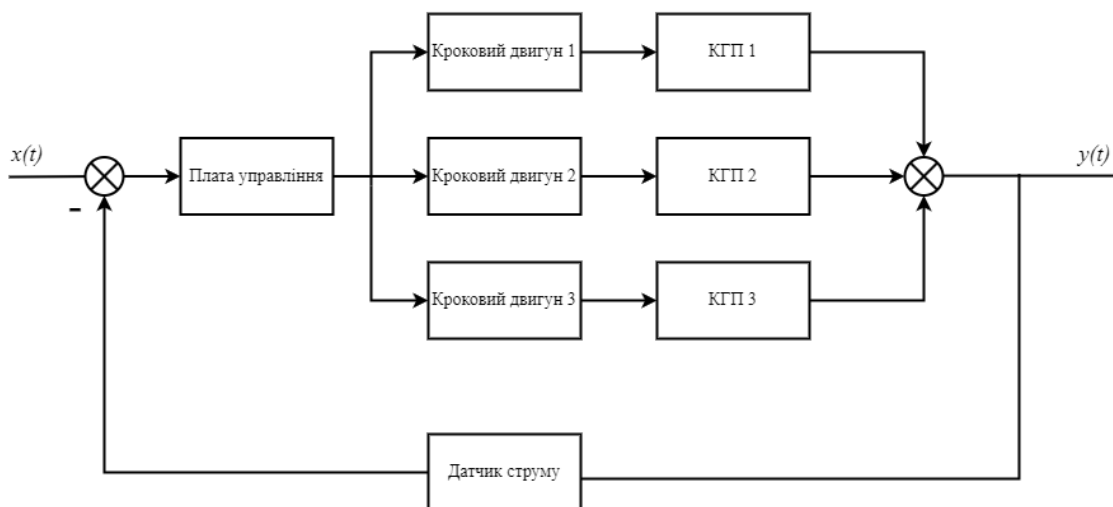


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування електроерозійного верстату з ЧПУ

Відповідно до розробленої схеми керування (рис. 3.1) складено структурну схему системи автоматичного керування (САК) з точки зору теорії автоматичного управління (ТАУ) (рис. 3.2).

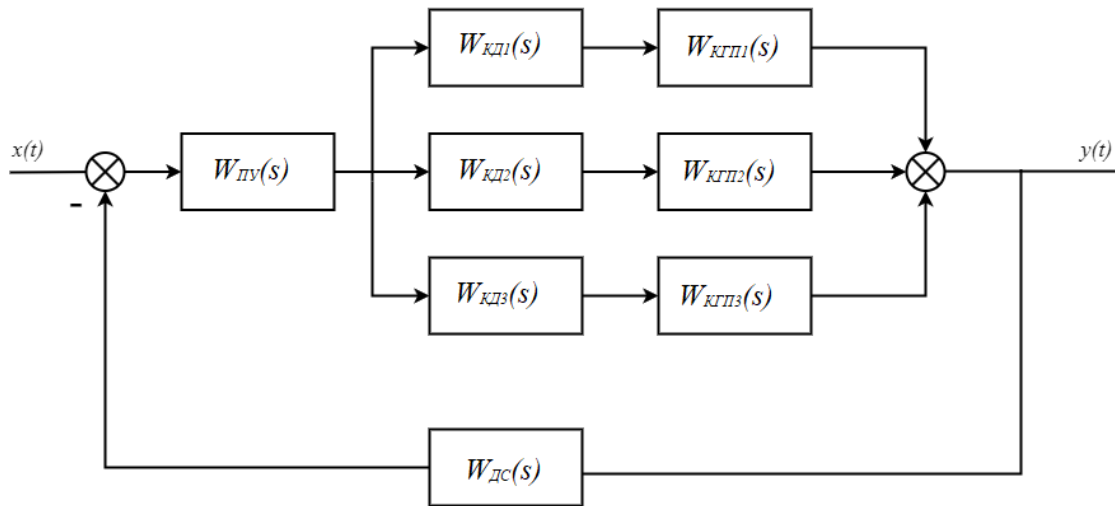


Рисунок 3.2 – Структурна схема САК електроерозійного верстату з ЧПУ

Згідно розробленої структурної схеми САК електроерозійного верстату з ЧПУ (рис. 3.2) розраховано передавальні функції розімкненої (3.1) та замкненої (3.2) систем.

$$W_p(s) = W_{\text{ПУ}} \cdot (W_{\text{КД1}} W_{\text{КГП1}} + W_{\text{КД2}} W_{\text{КГП2}} + W_{\text{КД3}} W_{\text{КГП3}}), \quad (3.1)$$

$$W_3(s) = \frac{W_{\text{ПУ}}(s) \cdot ((W_{\text{КД1}} W_{\text{КГП1}}) + (W_{\text{КД2}} W_{\text{КГП2}}) + (W_{\text{КД3}} W_{\text{КГП3}}))}{1 + W_{\text{ПУ}}(s) \cdot ((W_{\text{КД1}} W_{\text{КГП1}}) + (W_{\text{КД2}} W_{\text{КГП2}}) + (W_{\text{КД3}} W_{\text{КГП3}})) \cdot W_{\text{ДС}}}. \quad (3.2)$$

Розраховані передавальні функції кожної ланки елементів системи керування наведено нижче [25].

$$W_{\text{КД}(1,2,3)}(s) = \frac{2,41}{0,392s + 1}, \quad (3.3)$$

$$W_{\text{КГП}(1,2,3)}(s) = 0,04, \quad (3.4)$$

$$W_{\text{ДС}}(s) = \frac{0,4312}{0,03s^2 + s}. \quad (3.5)$$

Розраховано загальну передавальну функція розімкненої системи керування:

$$W_p(s) = \frac{77s + 3615}{196s + 500} \quad (3.6)$$

Розраховано загальну передавальну функція замкнутої системи керування:

$$W_3(s) = \frac{5775s^3 + 463625s^2 + 9037500}{14700s^3 + 527500s^2 + 1333006s + 3896970} \quad (3.7)$$

3.2 Визначення стійкості системи та показників якості

Наступним етап – аналіз стійкості розробленої системи управління та визначення показників її ефективності.

Проведено оцінку стійкості розімкнутої системи шляхом аналізу коренів характеристичного рівняння. З передавальної функції замкненої системи (3.7) сформульовано характеристичне рівняння:

$$14700 \cdot \lambda^3 + 527500 \cdot \lambda^2 + 1333006 \cdot \lambda + 3896970 = 0. \quad (3.8)$$

З даного виразу можна зробити висновок, що необхідна умова стійкості виконується, тому що всі коефіцієнти характеристичного рівняння мають однаковий знак (усі додатні). Але так як система третього порядку, необхідно знайти корені рівняння:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -33,4075 + 0,000 \cdot i \\ \lambda_2 = -1,2384 + 2,5301 \cdot i \\ \lambda_3 = -1,2384 - 2,5301 \cdot i. \end{cases} \quad (3.9)$$

На побудованому графіку розташування коренів характеристичного рівняння (рис. 3.3) відсутні додатні корені з чого можна зробити висновок, що досліджувана замкнена система стійка.

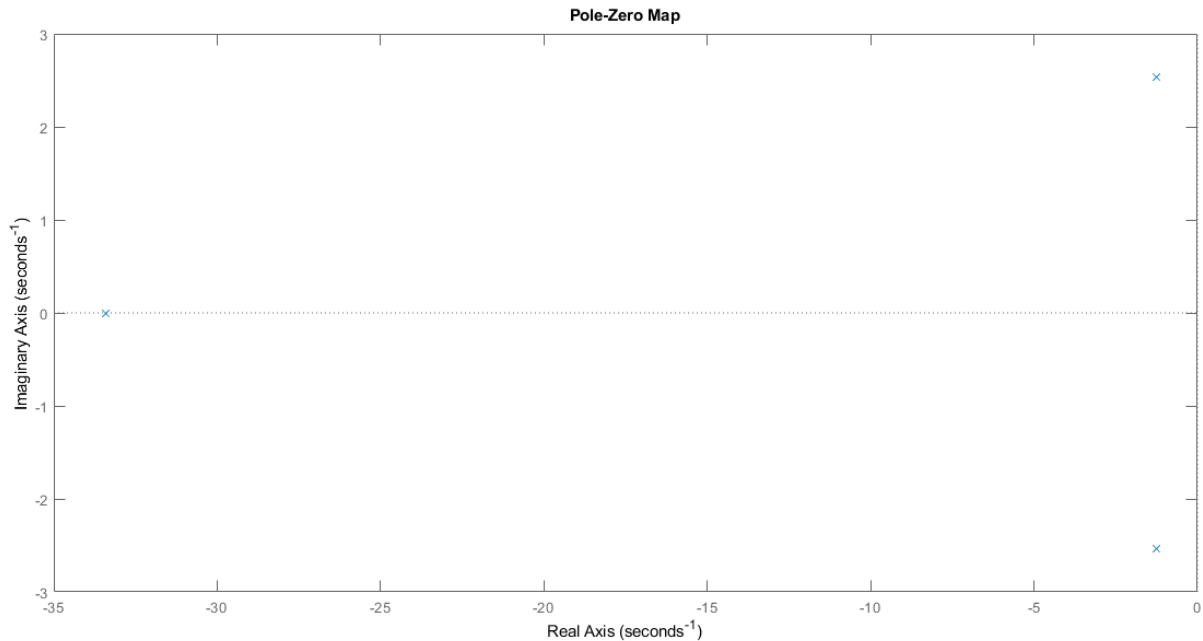


Рисунок 3.3 – Розташування коренів характеристичного рівняння

Проведено оцінку стійкості замкненої системи за критерієм Гурвіца. Для цього за допомогою передавальної функції замкненої системи (3.2) та характеристичним рівнянням (3.8) здійснено перевірку достатньої умови та побудовано головний визначник Гурвіца третього порядку:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_3 & 0 \\ \alpha_0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_3 \end{vmatrix}. \quad (3.10)$$

Критерій стійкості Гурвіца формулюється так: для того щоб система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб всі визначники Гурвіца мали знаки, однакові зі знаком першого коефіцієнта характеристичного рівняння α_0 , тобто при $\alpha_0 > 0$ були додатніми.

Складено матрицю для знаходження визначників Гурвіца (3.11):

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 527500 & 3896970 & 0 \\ 14700 & 1333006 & 0 \\ 0 & 527500 & 3896970 \end{vmatrix}. \quad (3.11)$$

Розрахунки визначників Гурвіца підтверджують, що система відповідає необхідним і достатнім умовам стійкості.

Виконано оцінку стійкості системи за критерієм Найквіста. Для цього побудовано годограф Найквіста (рис. 3.4).

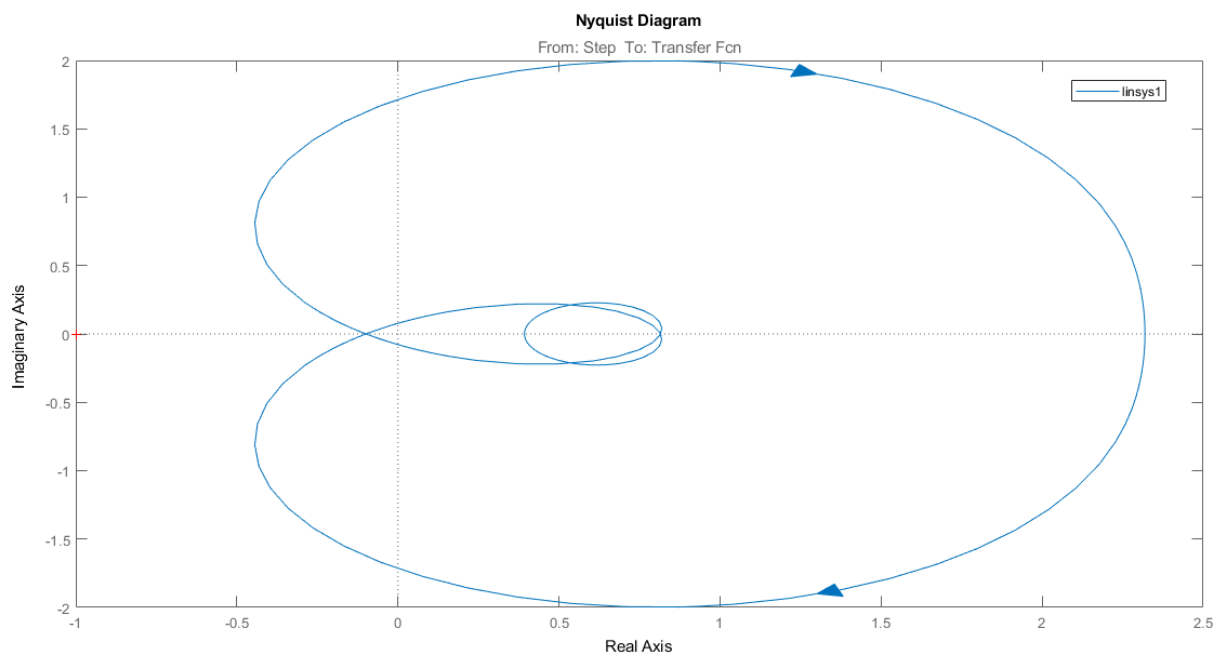


Рисунок 3.4 – Годограф Найквіста

Проведено оцінку показників якості розробленої системи керування електроерозійним верстатом з ЧПУ.

Визначено прямі показники якості системи. Побудовано графік перехідної характеристики системи керування електроерозійного верстату з ЧПУ (рис. 3.5 – 3.6).

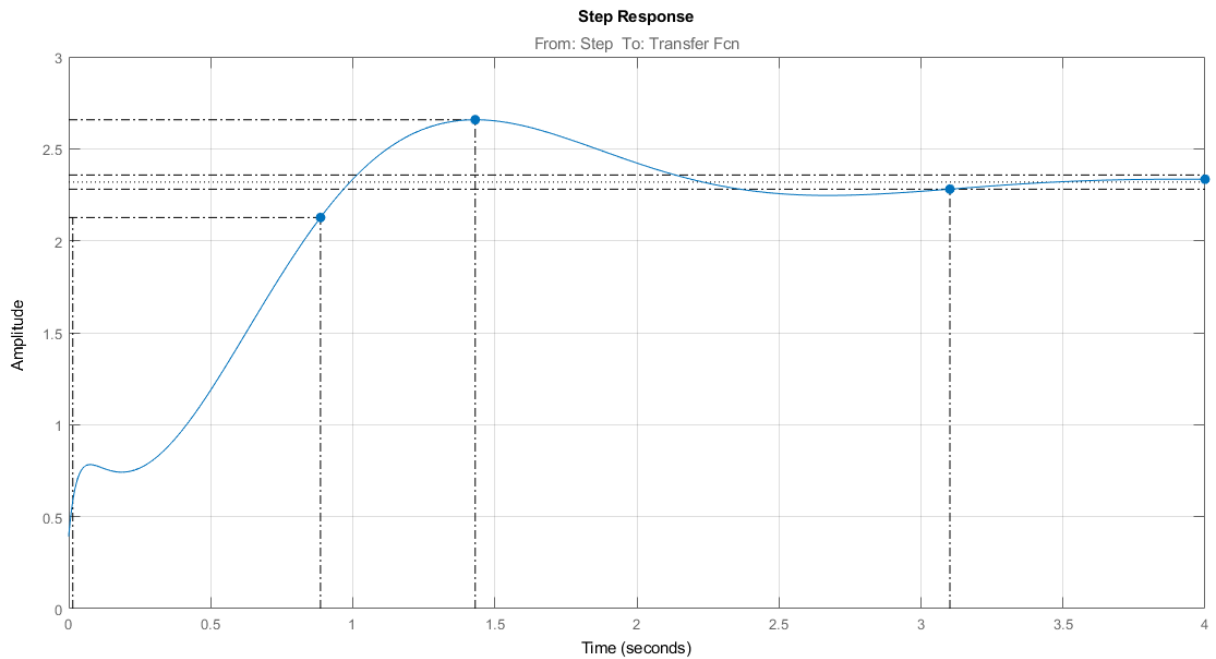


Рисунок 3.5 – Графік перехідної характеристики системи керування електроерозійного верстату з ЧПУ

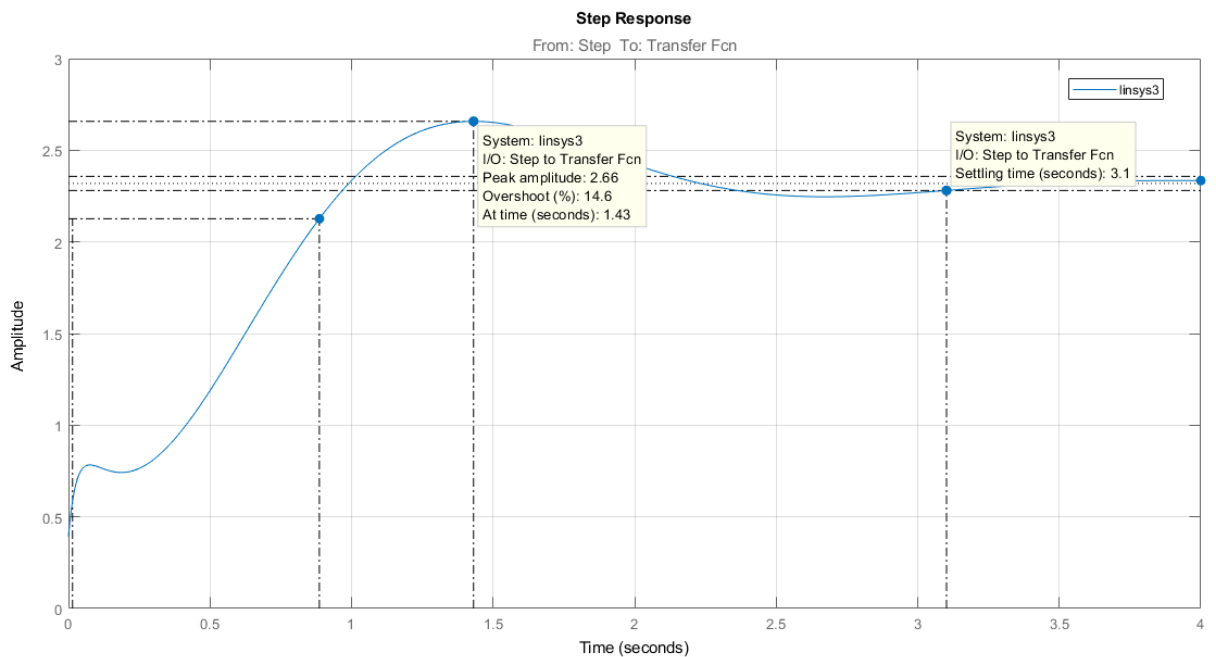


Рисунок 3.6 – Графік перехідної характеристики системи керування електроерозійного верстату з ЧПУ

Як видно з графіку перехідної характеристики системи керування (рис. 3.5 – 3.6) час регулювання системи керування дорівнює $t_p = 3,1$ с, а перерегулювання $\sigma = 14,6\%$.

Як правило перерегулювання не повинно перевищувати 30%. Виходячи з отриманих значень, система задовольняє умови.

Під час експлуатації електроерозійного верстату з ЧПУ різноманітні фактори (вібрації, рівність поверхні, температура, т.п.) можуть вплинути на обладнання, наприклад, крокові двигуни, які керують рухом осей верстату, можуть пропускати кроки, порушуючи точність позиціонування робочого органу. Ці фактори також можуть спричинити втрату стійкості системи, особливо, якщо система працює близько до межі стійкості. Для уникнення втрати стійкості системи необхідно забезпечити віддалення роботи системи керування від межі стійкості.

З цього можна зробити висновок, що визначення запасів стійкості системи управління для верстата з ЧПУ за значенням запасу за фазою та амплітудою є вкрай важливим.

Для визначення цих запасів побудовано ЛАЧХ та ЛФЧХ розробленої системи (рис. 3.7 – 3.8).

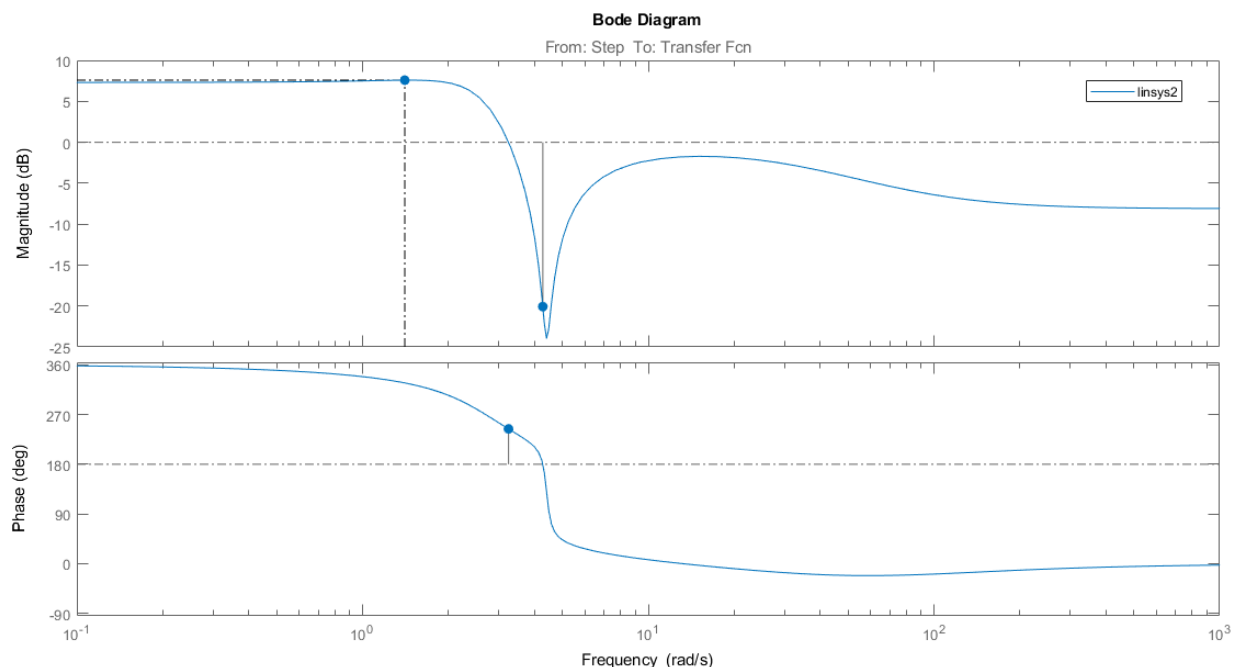


Рисунок 3.7 – ЛАЧХ та ЛФЧХ системи управління верстатом

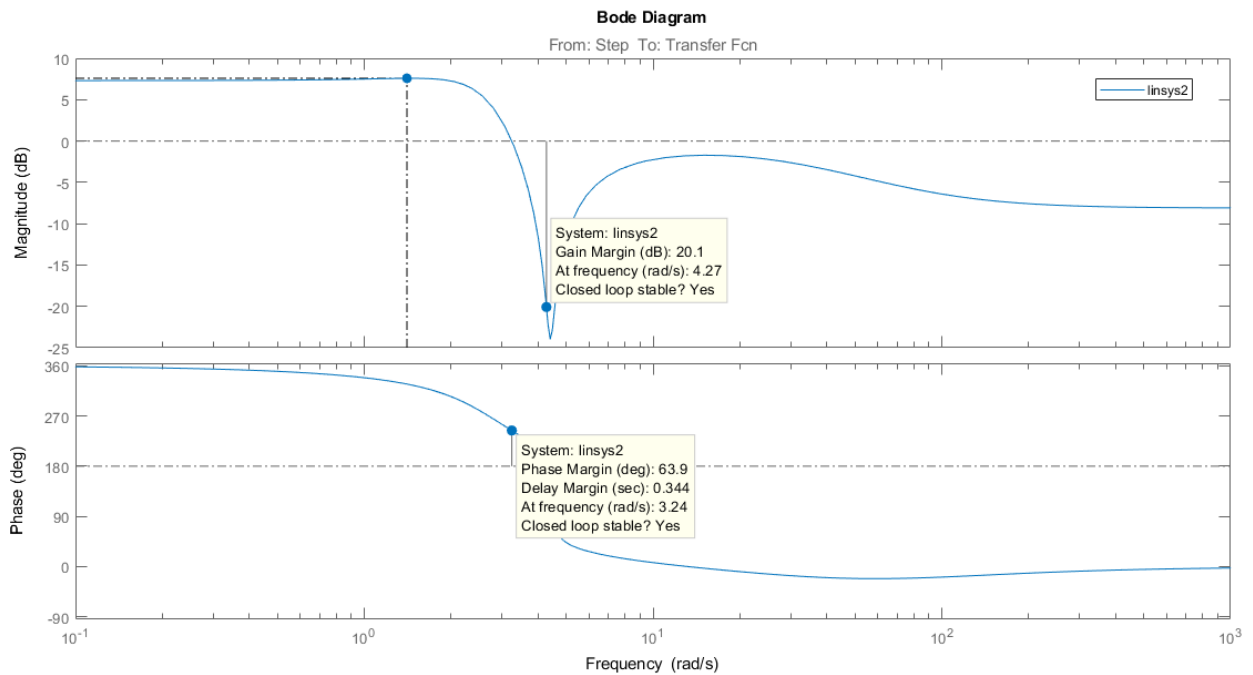


Рисунок 3.8 – ЛАЧХ та ЛФЧХ системи управління верстатом

Аналізуючи отриманий графік, можна визначити наступні показники стійкості:

- запас стійкості по амплітуді – $\Delta A = 20,1$ дБ;
- запас стійкості по фазі – $\Delta \varphi = 63,9^\circ$.

З огляду на отриманий графік можна зробити висновок, що значення запасу стійкості входять в діапазон від 6 дБ до 25 дБ. Також видно, що значення запасу за фазою знаходяться в межах від 30° до 600° , що свідчить про те, що розроблена система є нормально демпфованою.

На підставі проведеного дослідження стійкості системи управління електроерозійним верстатом з ЧПУ, аналізу показників якості та запасів стійкості можна зробити висновок, що обрані компоненти системи та її структура відповідають усім вимогам для таких систем.

3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було проведено розробку системи керування електроерозійним верстатом з ЧПУ.

Складено структурну схему системи керування електроерозійного верстату з ЧПУ.

Складено структурну схему системи автоматичного керування (САК) з точки зору теорії автоматичного управління.

Визначено та розраховано передавальні функції розімкненої та замкненої систем.

Проведено визначення стійкості системи автоматичного керування електроерозійним ЧПУ верстатом шляхом аналізу коренів характеристичного рівняння, за критеріями Гурвіца та Найквіста. Визначено, що система є стійкою за всіма розглянутими критеріями.

Проведено оцінку показників якості розробленої системи керування електроерозійним верстатом з ЧПУ. Час регулювання системи керування дорівнює 3,1 с, а перерегулювання становить 14,6%. Система задовольняє вимоги.

Визначено запаси стійкості системи управління для верстата з ЧПУ за фазою та амплітудою. Отримано такі показники:

- запас стійкості по амплітуді – $\Delta A = 20,1$ дБ;
- запас стійкості по фазі – $\Delta \varphi = 63,9^\circ$.

З огляду на ці результати можна сказати що система є нормально демпфованою та задовольняє основні вимоги до таких систем управління.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час ЕЕО в умовах високих температур, робочі рідини (РР) розкладаються, утворюючи гази, максимально допустима концентрація яких у повітрі не має перевищувати 0,3 мг/л.

У процесі використання РР з недостатньою кількістю матеріалу над оброблюваною поверхнею, може відбуватися викид токсичних пилових часток (свинець, кадмій, цинк, берилій), що спричиняє професійні захворювання. Важливо строго контролювати ефективність роботи як обладнання, так і системи вентиляції на виробництві.

Обов'язковою умовою є оснащення верстатів, виробничих та допоміжних приміщень системами вентиляції припливно-витяжного типу, включаючи верхні та місцеві приймачі. Спеціально обладнуються верстати, які використовують вуглецеві РР.

Концентрація шкідливих речовин у повітрі (гази, пари, пил, аерозолі) повинна відповідати стандартам, зазначеним у «Санітарних нормах проектування промислових підприємств», особливо для приміщень з незначним надлишком тепла та для робіт середньої тяжкості.

Конкретно, при середньому струмі 100 А, ваговий склад продуктів включає масляну аерозоль (65 мкг/год), сажу (130 мкг/год), окис вуглецю (40 мкг/год), вищі спирти (2,4 мкг/год), оксиди заліза (2,4 мкг/год), та бензопірен (514 мкг/год). Ці речовини слід видаляти за допомогою витяжки з швидкістю повітряного потоку 1,5 м/с.

Шлам, який утворюється під час чищення робочої рідини та обладнання, необхідно видаляти з робочої зони та здавати на переробку, зберігання його на місці заборонено.

Система освітлення на ділянці має бути комбінованою, включаючи як загальне, так і місцеве освітлення. Світильники місцевого освітлення рекомендується виконувати у вибухозахисному варіанті.

Колірне оформлення приміщень та обладнання слід виконувати в холодних тонах, відповідно до чинних стандартів, при цьому технологічне обладнання бажано фарбувати у сіро-сріблястий або світло-зелений колір.

У робочій зоні верстата під час його роботи відбувається виділення значної кількості тепла і пари РР. Недотримання правил експлуатації може спричинити займання РР, що може призвести до пожежі, а також скупчення легких пар РР може викликати вибух.

У конструкції верстата передбачені заходи для запобігання займанню РР. Для цього в баку верстата встановлюються охолоджувачі, які знижують температуру РР під час роботи.

Для додаткового захисту у робочій зоні верстата встановлений рівнемір, який автоматично вимкне верстат, якщо рівень РР опуститься нижче безпечного. Важливо підтримувати рівень РР над оброблюваною заготовкою в межах встановлених норм: для дротяних вирізних верстатів – від 10 мм до 20 мм; для копіювально-прошивальних верстатів з напругою до 36 В – від 50 мм до 80 мм; для всіх електроерозійних верстатів з напругою понад 36 В – від 80 мм до 120 мм.

Для мінімізації ризику займання робочих рідин (РР) на ділянках електроерозійної обробки (ЕЕО) рекомендуються наступні профілактичні заходи.

Відокремлення ділянок ЕЕО: ділянки ЕЕО мають бути фізично відокремлені від інших цехів або участків за допомогою капітальних вогнестійких перегородок.

Засоби пожежогасіння: ділянки мають бути обладнані засобами пожежогасіння відповідно до встановлених норм. Найефективнішими є вуглекислотні вогнегасники типу УП-1М та пінні типу ОХП-10. Біля кожного верстата повинно бути розміщено не менше двох вогнегасників.

Використання негорючих РР: при роботі з електроерозійними верстатами слід використовувати негорючі РР або РР з високими температурами займання.

Кваліфікація працівників: до роботи на електроерозійному верстаті допускаються тільки особи, які пройшли навчання з безпечного поводження з обладнанням, протипожежного захисту та надання першої допомоги при опіках. В приміщенні з верстатом повинно перебувати мінімум дві особи.

Розміщення верстатів: електроерозійні верстати не повинні встановлюватися близько до металообробного обладнання, щоб уникнути попадання стружки на струмопідводи та запобігти можливому короткому замиканню та займанню.

Управління ванною верстата: опускання та підйом ванни верстата слід виконувати лише при вимкненій напрузі на електродах.

Контроль температури РР: температура РР під час роботи не повинна перевищувати 50°C при роботі на гасі та 60°C при використанні індустриальної олії. У разі перевищення цих температур необхідно вимкнути верстат.

Закріплення електродів: не дозволяється починати роботу, якщо електроди погано закріплені. Це може спричинити іскріння в місцях їхнього підключення і створити ризик займання.

Одяг оператора: строго забороняється знаходитися біля верстата в промасленому одязі, оскільки це збільшує ризик займання.

Постійний нагляд за верстатом: оператор не має права залишати працюючий верстат без нагляду.

Закриття ємностей з горючою РР: всі відкриті ємності з горючою РР повинні бути оснащені знімними щільно прилеглими металевими кришками для обмеження доступу повітря.

Заборона на використання азбестових ковдр при гасінні: при гасінні пожежі не можна використовувати азбестові ковдри або подібні засоби, оскільки вони можуть збільшувати площу горіння і ускладнювати процес гасіння.

Інструкції та плакати з пожежної безпеки: приміщення, де розташоване електроерозійне обладнання, має бути обладнане відповідними інструкціями та плакатами про заходи пожежної безпеки та методи ефективної боротьби з загорянням.

Зберігання промасленої чи намоченої ганчірки та спецодягу: забороняється зберігати промаслену або намочену гасом ганчірку та спецодяг у місцях роботи з електроерозійним обладнанням, щоб уникнути ризику мимовільного займання.

Дотримання цих заходів забезпечує безпечну роботу з електроерозійними верстатами і знижує ризик пожеж та інших аварійних ситуацій.

ВИСНОВКИ

У рамках дослідження була успішно розроблена електромеханічна частина електроерозійного верстата з ЧПУ, що включає в себе конструкцію системи координатного переміщення, виконавчого механізму та системи керування, забезпечуючи високу точність та ефективність обробки металів.

Аналіз існуючих технологій та рішень у сфері електроерозійної обробки металів дозволив ідентифікувати ключові напрями для покращення, зокрема щодо точності, швидкості обробки, стабільності та енергоефективності верстата.

Реалізовані моделювання розроблених електромеханічних вузлів, результати яких підтвердили їх ефективність та надійність у роботі.

Виявлені обмеження і потенційні шляхи для подальшого вдосконалення роботи електроерозійного верстата з ЧПУ, зокрема у сферах оптимізації споживання енергії та мінімізації впливу зовнішніх факторів.

Рекомендується проведення додаткових досліджень з метою поліпшення стабільності та ефективності системи керування, а також розробка заходів для оптимізації роботи вузлів верстата з урахуванням зовнішніх факторів.

Загалом, результати дослідження відображають важливість інновацій та технічного прогресу у розробці електромеханічних вузлів електроерозійних верстатів з ЧПУ, що сприяє підвищенню ефективності, продуктивності, точності обробки та конкурентоспроможності у виробничому процесі.

На основі отриманих даних, розроблені технічні рішення та підходи можуть бути рекомендовані для застосування на виробничих підприємствах, що спеціалізуються на високоточній металообробці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. К.:Космонавтів 12, 2018. 320 с.
3. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К.: Держстандарт України, 2017. 29 с.
4. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 1. – 336с.
5. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – 408с.
6. 27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 2. – Харків: ХНУРЕ. 2023. – 166 с.
7. Основи технологій обробки поверхонь деталей машин: підручник / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський; за ред. В.А. Кириловича.

Житомир: Видавець О.О. Євенок, 2017. 266 с.

8. Електроерозійна обробка: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9888263/> (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

9. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. 238 с.

10. Електроерозійний копіювально-прошивний верстат Mitsubishi Electric EA12VA: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://deal.by/p172568192-elektroerozionnyj-kopirovalno-proshivnoj.html> (дата звернення 25.12.2023). Заголовок з екрану.

11. Дротяно-вирізний електроерозійний верстат Mitsubishi Electric MV1200R Connect: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://deal.by/p172568179-provolochno-vyreznoj-elektroerozionnyj.html> (дата звернення 25.12.2023). Заголовок з екрану.

12. Екстрактор електроерозійний портативний EDM-8С: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://cnsmagazine.ru/oborudovanie/elektroerozionnoe-oborudovanie-ru/ekstraktor-elektroerozionnyu-portativnyu-edm-8c/> (дата звернення 25.12.2023). Заголовок з екрану.

13. Зибенко О.О. КТ1. Розробка конструкції електроерозійного верстата. ПТ2. Розробка електричної частини: дипломна робота, пояснювальна записка/ Костенко С.В.; кер. роботи доц. КІТАМ Разумов-Фризюк Є.А.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніки. – Харків, 2022. – 62 с.: CD.

14. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. Кривий Ріг Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

15. Arduino Mega 2560 Rev3: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <http://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

16. RAMPS 1.6: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.6 (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

17. NEMA 17 Stepper motor: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

18. DRV8825: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://www.ti.com/product/DRV8825> (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

19. RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: https://reprap.org/wiki/RepRapDiscount_Full_Graphic_Smart_Controller (дата звернення 01.01.2024). Заголовок з екрану.

20. Кінцевий вимикач оптичний EndStop 3D-принтер: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://satellite.net/ua/p1487525509-kontsevoj-vyklyuchatel-opticheskij.html> (дата звернення 06.01.2024). Заголовок з екрану.

21. Веб орієнтоване середовище для розробки схем: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://easyeda.com/ru> (дата звернення 07.01.2024). Заголовок з екрану.

22. IRFP250NPbF: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irfp250n/> (дата звернення 07.01.2024). Заголовок з екрану.

23. FOD3180: 2 A Output Current, High Speed MOSFET Gate Driver Optocoupler: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://www.onsemi.com/products/interfaces/igbt-mosfet-gate-drivers-optocouplers/fod3180> (дата звернення 07.01.2024). Заголовок з екрану.

24. VS-60CPQ150-N3 PRODUCT INFORMATION: [Електрон. ресурс] // SearchGoogle. Електрон. текстові дані. Режим доступу: <https://www.vishay.com/product?docid=96461> (дата звернення 07.01.2024). Заголовок з екрану.

25. Малінін Є.Є. Автоматизація процесу фрезерування для верстатів з ЧПК: дипломна робота, пояснювальна записка/ Малінін Є.Є.; кер. роботи проф. каф. КІТАМ Євсєєв В.В.; ХНУРЕ, Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизації та мехатроніка. – Харків, 2020. – 87 с.: CD.