

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення автоматизованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КІТІВМ-20-1

Волошин Денис Євгенійович
(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'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2021р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
 Кафедра _____ КІТАМ _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
 Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ КІТПВМ, Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва _____

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____
(підпис)

« _____ » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Волошину Денису Євгенійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення автоматизованої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК _____

Затверджена наказом по університету від _____ 08.11.2021 № 1697Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 06.12.2021 _____

3. Вихідні дані до роботи _____ потужність шпинделя $P = 1,5$ кВт, крок двигуна NEMA 23 $p = 1,8^\circ$, ділення кроку $N = 1600$ ток обмотки, $I_0 = 3$ А опір обмотки $R_0 = 1,4$ Ом, Індуктивність $L = 5,5$ мГц, час регулювання не повинен перевищувати $t_p = 1,8$ с. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
 4.1 Вступ; 4.2 Дослідження сучасного стану системи керування фрезерними верстатами з ЧПК; 4.3 Розробка експериментального макету фрезерного верстату з ЧПК; 4.4 Синтез та оптимізація системи керування фрезерного верстата з ЧПК; 4.5 Висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt). – 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	Аналіз технічного завдання	08.11.21	виконано
2	Дослідження сучасного стану системи	10.11.21	виконано
	Керування фрезерними верстатами з ЧПК		
3	Розробка експериментального макету фрезерного верстату з ЧПК	15.11.21	виконано
4	Синтез та оптимізація системи керування фрезерного верстата з ЧПК	21.11.21	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	26.11.21	виконано
6	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 08.11.2021

Студент _____
(підпис)

Волошин Д.Є.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. каф. КІТАМ Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 9 табл., 45 рис., 1 дод., 31 джерело.

ФРЕЗЕРНИЙ ВЕРСТАТ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ, ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ, ЧПК.

Об'єкт дослідження – процес керування фрезерного верстату з ЧПК.

Предмет дослідження – моделі та методи автоматизованого керування фрезерним верстатом з ЧПК.

Методи дослідження – методи стійкості і якості перехідних процесів систем автоматичного керування, методи аналізу і синтезу систем керування об'єктами і процесами, методи синтезу систем автоматичного керування, методи оптимізації параметрів ПІД-регуляторів для об'єктів управління.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення точності при фрезеруванні та виготовленні деталей на фрезерному верстаті з ЧПК.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасний стан керування верстатами з ЧПК, досліджено синтез систем керування. Також проведено аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК.

На базі проведеного аналізу розроблено структурну схему фрезерного верстата з ЧПК за якої здійснено вибір елементів системи керування. Також проведено моделювання, збірку і налаштування макету з ЧПК.

Для розробленого макету фрезерного верстату з ЧПК проведено синтез системи керування, аналіз стійкості та показників якості. Які дозволили впевнитися у тому, що розроблена система відповідає усім вимогам. За допомоги розробленої системи здійснено оптимізацію параметрів керування, завдяки яким, досягнене підвищення точності виробів на макеті фрезерного верстату з ЧПК тим самим збільшив продуктивність верстату. Проведено експеримент в якому доведено ефективність отриманих результатів.

ABSTRACT

Explanatory note: 60 pp., 9 table, 45 fig., 1 appendix, 31 sources.

MILLING MACHINE, CONTROL SYSTEM, INCREASE OF ACCURACY, THEORY OF AUTOMATIC CONTROL, CNC.

The object of research is the process of controlling a CNC milling machine.

The subject of research – models and methods of automated control of a milling machine with CNC.

Research methods – methods of stability and quality of transients of automatic control systems, methods of analysis and synthesis of control systems of objects and processes, methods of synthesis of automatic control systems, methods of optimization of parameters of PID-regulators for control objects.

The purpose of the qualification work is to increase the accuracy in milling and manufacturing parts on a CNC milling machine.

In the qualification work the current state of control of CNC machines is analyzed, the synthesis of control systems is investigated. The analysis of modern CNC milling machines is also carried out.

On the basis of the conducted analysis the structural scheme of the milling machine with CNC on which the choice of elements of a control system is carried out is developed. Modeling, assembly and configuration of the CNC layout were also performed.

Synthesis of the control system, analysis of stability and quality indicators were carried out for the developed model of the milling machine with CNC. Which allowed to make sure that the developed system meets all requirements. With the help of the developed system the optimization of control parameters is carried out, thanks to which, the increase of accuracy of products on the model of the milling machine with CNC is reached thereby increased productivity of the machine. An experiment was performed in which the effectiveness of the obtained results was proved.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
1 Дослідження сучасного стану системи керування фрезерними верстатами з ЧПК.....	9
1.1 Аналіз методів керування верстатами з ЧПК.....	10
1.2 Дослідження методів синтезу системи керування.....	13
1.3 Аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК.....	15
1.4 Постановка задач досліджень.....	18
1.5 Висновки до 1 розділу.....	18
2 Розробка експериментального макету фрезерного верстату з ЧПК.....	19
2.1 Розробка структурної схеми фрезерного верстата з ЧПК.....	19
2.2 Підбір елементів системи керування фрезерного верстату з ЧПК...	24
2.3 Моделювання і збірка конструкції фрезерного верстата ЧПК.....	32
2.4 Налаштування макету фрезерного верстату з ЧПК.....	39
2.5 Висновки до 2 розділу.....	44
3 Синтез та оптимізація системи керування фрезерного верстата з ЧПК.....	46
3.1 Синтез системи керування фрезерним верстатом з ЧПК.....	46
3.2 Оптимізація системи керування фрезерного верстата з ЧПК.....	55
3.3 Проведення експерименту.....	57
3.4 Охорона праці.....	63
3.5 Висновки до 3 розділу.....	64
Висновки.....	66
Перелік джерел посилання.....	68
Додаток А Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АФЧХ – амплітудно-фазочастотна характеристика.

КД – кроковий двигун.

КГП – кульково-гвинтова передача.

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика.

ЛФЧХ – логарифмічна фазо-частотна характеристика.

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний.

САК – система автоматизованого керування.

ТАУ – теорія автоматичного управління.

ЧПК – числове програмне керування.

ВСТУП

На сьогоднішній день не можливо уявити конкурентоспроможне сучасне виробництво без застосування сучасних фрезерних верстатів з ЧПК. Для побудови та розвитку успішного бізнесу важлива наявність значних переваг перед конкурентами: наприклад, досягнення найвищої якості продукції та доступних цін за рахунок роботи фрезерного верстату з ЧПК. Але вартість професійних фрезерних верстатів дуже велика, а верстати на ступінь нижче не дають змогу виготовляти деталі з високою точністю.

Точність є однією з основних характеристик верстата, яка в кінцевому підсумку впливає на вироблену деталь. Якщо точність фрезерного верстату з ЧПК замала, то в результаті можуть з'являтися дефекти. Це безпосередньо вплине на виготовлену деталь, що позначиться в економічному плані підприємства. Це обумовлює актуальність науково-технічної задачі синтезу оптимальної системи управління обробки виробів на фрезерному верстаті з ЧПК, що дозволить підвищити точність та знизити витрати. Отже, можна дійти висновку, що підвищення точності фрезерного верстата з ЧПК дозволить знизити ризик у прояві дефектів на виробленій деталі, що суттєво зменшить витрати на матеріалі.

Об'єкт дослідження – процес керування фрезерного верстату з ЧПК.

Предмет дослідження – моделі та методи автоматизованого керування фрезерним верстатом з ЧПК.

Методи дослідження – методи стійкості і якості перехідних процесів систем автоматичного керування, методи аналізу і синтезу систем керування об'єктами і процесами, методи синтезу систем автоматичного керування, методи оптимізації параметрів ПД-регуляторів для об'єктів управління.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення точності при фрезеруванні та виготовленні деталей на фрезерному верстаті з ЧПК.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК;
- провести розробку структурної схеми фрезерного верстата з ЧПК;
- провести моделювання і збірку конструкції макету фрезерного верстата ЧПК;
- здійснити синтез системи керування фрезерного верстата з ЧПК;
- провести оптимізацію параметрів системи керування верстата з ЧПК;
- провести експериментальні дослідження на розробленому макеті фрезерного верстата з ЧПК.

Атестаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3].

1 ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНИМИ ВЕРСТАТАМИ З ЧПК

1.1 Аналіз методів керування верстатами з ЧПК

Розглянемо можливі методи керування верстатами з ЧПК:

- метод із прямим зв'язком;
- метод із зворотнім зв'язком;
- методи адитивних, інтелектуальних та робастних систем керування.

Метод із прямим зв'язком (рис. 1.1) працює наступним чином відбувається потік директивної інформації, яка направляється від керуючого апарату до об'єкту керування. Управління із прямим зв'язком дозволяє проводити керування із точним спостереженням усіх параметрів і умов.

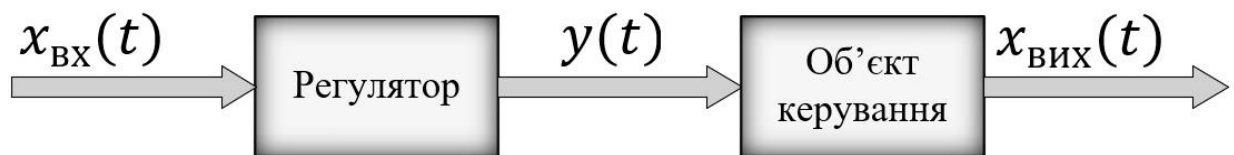


Рисунок 1.1 – Система керування верстату з ЧПК із прямим зв'язком

Даний принцип керування реалізується виключно лише на основі бажаного алгоритму поведінки керованого об'єкту і не включає в собі можливість появи зовнішнього впливу, які здатні викликати неконтрольовані відхилення у процесі функціонування об'єкту.

Система керування із зворотнім зв'язком (рис. 1.2) дозволяє забезпечити контроль вихідної величини. При цьому пристрій керування формує вплив на об'єкт керування в залежності від відхилення вхідної величини від заданої.

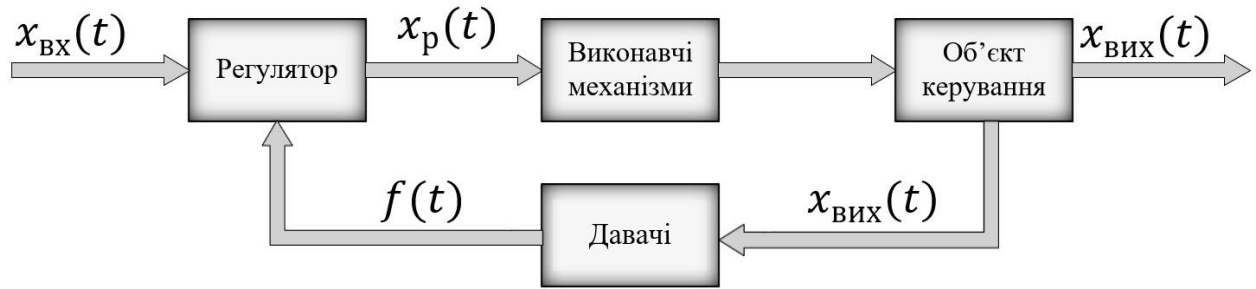


Рисунок 1.2 – Система керування із зворотнім зв'язком

Системи керування зі зворотним зв'язком функціонує наступним чином. Вибирається керуючий вплив, який визначає необхідний стан керованого об'єкта. Інформація про фактичний стан керованого об'єкта надходить по каналу зворотного зв'язку. Спеціальний орган порівнює ці стани, і при розбіжності необхідного і фактичного станів керованого об'єкта виробляються керуючий вплив, призначенням якого є коригування його поведінки підвищуючи збігу поточного і необхідної поведінки об'єкта.

Робастне керування – сукупність методів керування, метою яких є синтез такого регулятора, який забезпечував би хорошу якість керування, якщо об'єкт керування відрізняється від розрахункового або його математична модель невідома. Таким чином, робастність означає малу зміну виходу замкнутої системи управління при зміні параметрів об'єкту управління. Зазвичай робастні регулятори застосовуються для управління об'єктами з невідомою або неповною математичною моделлю, і що містять невизначеності [4-5].

Метою синтезу робастної системи є гарантія необхідної якості незалежно від похибок і зміни параметрів моделі. Робастна система управління володіє необхідною якістю незважаючи на істотну невизначеність характеристик об'єкта управління. Система повинна бути здатна протидіяти впливу цих факторів при виконанні завдань, заради яких вона проектувалася. Структура регулятора вибирається так, щоб реакція системи задовольняла певним критеріям якості [6].

Структурна модель робастного керування представлена на рисунку 1.3.

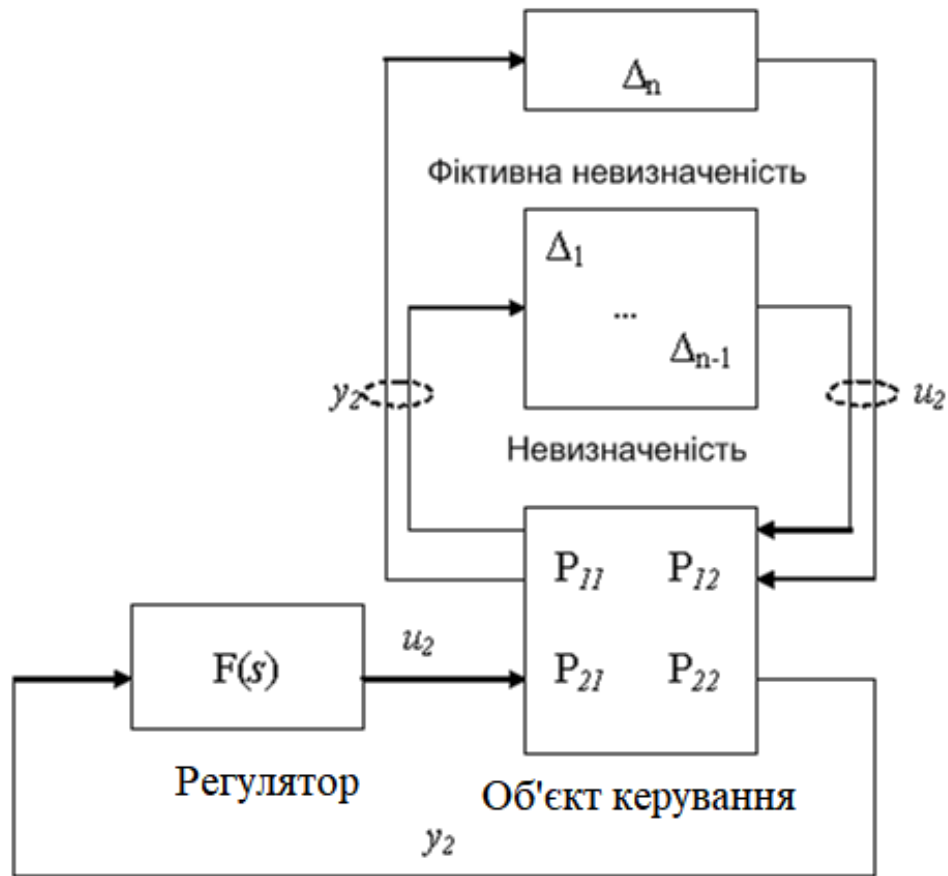


Рисунок 1.3 – Структурна модель робастного керування [7]

Інтелектуальна САК здатна відтворювати певні інтелектуальні дії людини, пов'язані з придбанням, аналізом, класифікацією знань в предметній галузі управління, а також оперують знаннями, нагромадженими людиною-оператором або самою системою в ході практичної діяльності по керуванню об'єктом. Інтелектуальність системи характеризується здатністю системи працювати з базою подій з метою виявлення знань, що дозволяють уточнити завдання та намітити шляхи її рішення [8].

На базі знань методів керування верстатами з ЧПК можна зробити висновок що найліпшою системою керування є інтелектуальна САК, але для першого кроку її створення є розробка системи керування зі зворотнім зв'язком.

1.2 Дослідження методів синтезу систем керування

Основний крок у створенні системи керування верстату з ЧПК – проведення аналізу та синтезу моделювання процесів його дій. У такий спосіб використовується аналіз складу компонентів системи, виявлення особливостей побудови об'єкта. Завдяки синтезу можливе узгодження характеристик певних частин і в повну систему. Для такої задачі наявні методи синтезу систем керування: аналітичний, графічний і численний.

Множину вимог майбутньої системи керування демонструють аналітичні методи синтезу, вони відображають вимоги на мову описання систем. Зокрема, розв'язують задачу синтезу самої системи керування. У формі простору стану об'єкта зображають множину кожного стану системи, також повинна бути задача параметричного синтезу, де елементи множини розходяться параметрами регулятора. Синтез полягає у розв'язанні систем рівнянь відносно коефіцієнтів регулятора. Після цього відбувається пошук перед передавальною функцією регуляторів та ланок корекції [9].

Завдяки дослідженню частотних характеристик можна провести графічні методи синтезу, аби розглянути модель на необхідні вимоги до визначених процесів моделювання системи керування. Використання графічних образів під час розрахунку систем керування на етапах побудови і структурного представлення моделей, отримання розв'язання та ілюстрація результатів є головною умовою їхньої «фізичності», міцного зв'язку процедур дослідження з параметрами об'єктів і вимог до поведінки систем.

Обчислення характеристик і показників якості певних варіантів роботи систем пов'язані з чисельними методами синтезу. Показники якості зіставляються з певними вимогами. Якщо умови задовольняють, то система керування готова до розробки. Пошукові методи синтезу дають можливість віднайти визначення параметрів, що доставляють мінімум показниками якості, або сконструювати поверхні рівного значення показників якості у просторі параметрів без повного перебору.

З точки зору теорії автоматичного управління (ТАУ) метою синтезу є формування закону керування, за якого можна досягти поставлених показників стійкості і якості системи. Закон управління – це залежність між відхиленням регулюючого органу і сигналом помилки. Об'єкт управління та виконавчі органи створюють незмінну частину системи, параметри якої є вихідною інформацією під час синтезу. Передавальну функцію незмінної частини позначимо як $W(s)$. Кінцева мета синтезу – визначення параметрів спеціальних коригувальних пристроїв, які, під час додавання до незмінної частини системи, забезпечать їй необхідні властивості.

Математичним апаратом дослідження системи автоматичного керування (САК) є диференціальні рівняння, які ілюструють рух системи і є рівняннями динаміки. З рівнянь динаміки, якщо покласти всі похідні рівними нулю, отримаємо рівняння статички, які відображають поведінку системи у сталому режимі [10].

Диференціальні рівняння САК і її елементів, побудовані відповідно до фізичних законів їхнього функціонування і факторами, від яких залежать змінні рівнянь, майже завжди є нелінійними. Математична модель є основою для аналізу властивостей системи і ступеня їх відповідності визначеним вимогам. У такий спосіб вихідна математична модель САК є нелінійною.

Для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь застосовується лінеаризація, тобто заміна вихідної нелінійної моделі лінійною, близькою за розв'язанням до вихідної моделі в визначеному діапазоні зміни початкових умов і параметрів. Лінеаризація проходить за методом малого відхилення, який заснований на розкладанні нелінійних функцій в ряд Тейлора [11].

Під час використання перетворення Лапласа деякої функції часу $x(t)$ ставиться в однозначну відповідність функція $X(s)$, де s -оператор Лапласа. Функція часу $x(t)$ називається оригіналом, а функція $X(s)$ її зображенням [12].

1.3 Аналіз сучасних фрезерних верстатів з ЧПК

На сьогоднішній день універсальним засобом для обробки поверхонь є фрезерні верстати з ЧПК. Фрезерні верстати з ЧПК дозволяють виготовити деталі зі складними криволінійними поверхнями. Вони можуть використовуватися як для серійного випуску деталей, так і для одиночних партій. Фрезерні верстати можна поділити на промислові, порталні середнього класу та настільні верстати.

Промислові фрезерні верстати з ЧПК (рис. 1.4) найбільші за розміром і найбільш дорогі.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд промислових фрезерних верстатів з ЧПК

[13-14]

Ціна промислових верстатів компенсується довгим напрацюванням на відмову, надійністю у важких умовах експлуатації. Саме промислові верстати з ЧПК забезпечені максимальною кількістю удосконалень для збільшення продуктивності і віддачі, таких як АТС (automatic tool changer) – система автоматичної зміни різального інструменту шпинделя (фрез), окремі стійки ЧПК з просунутим керуючим ПО, вакуумні столи, автоматична система подачі і фільтрації охолоджувальної рідини, захист виконавчих механізмів від відходів фрезерування і пилу. На промислових верстатах стоять дорогі і часто

дуже потужні шпинделі з малим радіальним биттям валу. Спектр оброблюваних матеріалів таких верстатів найрізноманітніший.

Наступний клас за промисловими верстатами порталні середнього рівня рисунок 1.5.

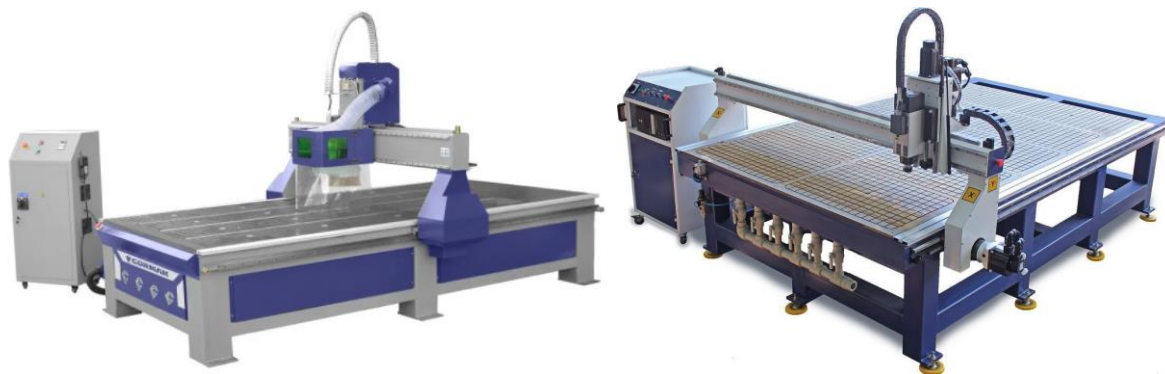


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд порталних фрезерних верстатів з ЧПК середнього рівня [15-16]

Порталні верстати середнього рівня стоять на пів ступеня нижче, але це не означає, що точність і повторюваність цих верстатів будуть однозначно гірше, ніж у промислових верстатів. Найчастіше вони зібрані з тих же компонентів по тим же самим принципам. Однак, дані верстати менші і легші промислових, і мають менше додаткового обладнання типу АТС. Управління верстату, як правило, від персонального комп'ютера безпосередньо через LPT, або із застосуванням спеціалізованих контролерів, що підключаються до комп'ютера через USB або Ethernet. Верстати даного типу популярні у малого бізнесу, індивідуальних підприємців. Покупка дорогого промислового верстата з ЧПК не окупиться, зробить бізнес неконкурентоспроможним, та й навантажити потужний агрегат часто просто не вдасться на його повну потужність. Унаслідок істотно меншого середнього пробігу за своє робоче життя, порталні фрезерні верстати середнього класу рідше комплектуються такими речами, як захист від пилу і стружки, систем автоматичного змащення. Менша маса верстатів також означає деяке зменшення спектру матеріалів, який доступний для обробки на таких верстатах.

Настільні фрезерні верстати з ЧПК (рис. 1.6) головною відмінністю яких

є розмір верстату.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд настільних фрезерних верстатів з ЧПК [17-18]

Робоче поле настільного верстата зазвичай менше 1 метра в довжину, що одночасно є особливістю верстату та його недоліком. Крім того, для його установки знадобиться окрема підставка або стіл. Комплектуючи таких верстатів можуть бути на рівні фрезерних верстатів з ЧПК середнього рівня або нижчі в залежності від поставленої задачі (точності, потужності, матеріалу що обробляється т. п.) і вартості верстату в цілому. Слід відзначити, що з точки зору вартості невеликі верстати значно доступніші, ніж їх габаритні аналоги і широко використовуються в якості навчального матеріалу або в невеликому бізнесі.

Проаналізувавши данні типи фрезерних верстатів з ЧПК було вирішено розробити верстат на базі портального фрезерного верстату з ЧПК середнього рівня, бо вартість комплектуючих промислових верстатів значно вища, потрібне спеціальне устаткування для його збірки і як було зазначено вище, точність і повторюваність портальних верстатів може не уступати професійним верстатам. А за рахунок розмірів робочого поля портальні верстати середнього класу дають змогу виготовити набагато більше деталей або обробити більшу площу деталі на відміну від настільних верстатів.

1.4 Постановка задач досліджень

Необхідно розробити макет фрезерного верстату з ЧПК портального типу, на базі макету розробити систему керування в програмі MATLAB провести аналітичні, графічні і чисельні методи синтезу завдяки ним визначити параметри коригувальних пристроїв які додано до частини системи тим самим удосконалити якість фрезерування.

Для досягнення наступних кроків необхідно вирішити такі завдання:

- розробка структурної схеми фрезерного верстата з ЧПК;
- моделювання і збірка конструкції макету фрезерного верстата ЧПК;
- синтез системи керування фрезерного верстату з ЧПК;
- оптимізація параметрів системи керування верстату з ЧПК;
- проведення експериментальних досліджень на розробленому макеті фрезерного верстату з ЧПК.

1.5 Висновки до першого розділу

Вході проведеного аналізу сучасних методів керування , методів синтезу системи керування та аналізу сучасних фрезерних верстатів з ЧПК було виявлено, що промислові фрезерні верстати з ЧПК хоч і мають високі характеристики на відміну від верстатів середнього рівня або настільних але мають дуже високу ціну і не є актуальними для мілкосерійного виробництва, а верстати з ЧПК середнього рівня мають відносні характеристики і в основному підходять для задач, які не потребують високої точності, що значно урізає можливості верстату.

2 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТУ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ З ЧПК

2.1 Розробка структурної схеми фрезерного верстата з ЧПК

При побудові сучасного фрезерного верстату з ЧПК не обійтися без структурної схеми в якій визначено основні функціональні частини виробу їх взаємозв'язки та призначення.

Опираючись на аналіз у першому розділі, було обрано порталну конструкцію фрезерного верстата з ЧПК. Визначивши тип конструкції верстату з ЧПК потрібно здійснити підбір елементів. В основному фрезерні верстати з ЧПК складаються з наступних основних компонентів:

- пристрій для введення даних;
- пристрій керування верстатом;
- механізми приводу;
- виконавчі механізми;
- система зворотного зв'язку (давачі).

Пристрій для введення даних є засобом введення програми обробки деталі в систему управління ЧПК. За допомогою комп'ютера і стандартного інтерфейсу послідовної передачі даних здійснюється введення початкових даних для обробки (виготовлення) деталі.

Пристрій (плата) керування верстатом – це блок управління верстатом, вона є серцем системи ЧПК. Вона використовується для виконання наступних функцій:

- читання закодованих інструкцій;
- розшифровка закодованих інструкцій;
- реалізація інтерполяцій (лінійних, кругових і спіральних) для генерації команд переміщення по осях;
- передача команд руху осі в схеми підсилювача для управління

механізмами осі;

- отримання сигналів зворотного зв'язку положення і швидкості для кожного приводу осі;

- реалізація допоміжних функцій управління, таких як аварійна зупинка верстату, зміна інструменту і т. д.

У якості приводів для верстатів з ЧПК в основному використовуються гібридні крокові двигуни. КД дають змогу робити переміщення інструменту по всій робочій зоні верстата з ЧПК. Інструмент є однією з основних частин верстата, завдяки ньому здійснюється головна операція, саме те для чого призначений ЧПК, обробка поверхні заготовки (виготовлення деталей).

Керувати КД набагато складніше ніж звичайним колекторним двигуном, потрібно в певній послідовності переключати напруги в обмотках з одночасним контролем струму. Тому для управління КД розроблені спеціальні пристрої – драйвери КД.

Драйвер КД дозволяє управляти обертанням ротора КД відповідно до сигналів управління і електронним чином ділити фізичний крок КД на більш дрібні дискретні.

Робота практично всіх верстатів заснована на використанні ріжучих інструментів. Досить великого поширення набуло поняття шпинделя. Шпиндель верстата встановлюється для фіксації інструментів. За рахунок застосування сучасних матеріалів і налагоджених технологій виробництва, шпинделі верстатів з ЧПК запросто справляються з тривалою, напруженою роботою при частотах обертання понад 20-30 тис. об/хв.

Шпиндель є асинхронним електродвигуном змінного струму, вал якого встановлюється в опорних підшипниках для компенсації осьового і радіального навантаження від руху ріжучого інструменту уздовж площини оброблюваної заготовки. Надлишки тепла, що виділяються електродвигуном при роботі, відводяться вбудованою повітряною або водяною системою охолодження шпинделя. А для гнучкого управління електродвигуном шпинделя служить спеціальний пристрій – частотний перетворювач

(інвертор).

Інвертор представляє собою спеціальний електричний пристрій-перетворювач для гнучкого управління електродвигуном змінного струму. За рахунок зміни частоти живлячої напруги, інвертор дозволяє змінювати швидкість обертання електродвигуна шпинделя в потрібних межах. Так частота змінного струму 50 Гц (для побутової або промислової напруги в 220 В / 380 В) може бути перетворена до значення 0-400 Гц і більше. Відповідно до цього і швидкість обертання шпинделя може змінюватися від 0 до номінального значення. Крім цього, інвертор повинен забезпечувати сталість електричних параметрів «на виході», незважаючи на швидкозмінний характер навантаження на шпиндель [19].

Щодо виконавчих механізмів більшість верстатів з ЧПК містить в собі кулько-гвинтову передачу або трапецеїдальний гвинт, так як вони є одним з його найбільш важливих компонентів. Якщо існує необхідність сконструювати верстат, який витримав би високі навантаження, був би надійним в роботі і виконував свої завдання з високою точністю, то краще вибрати саме кулько-гвинтову передачу. Тому у якості виконавчих механізмів будемо використовувати КГП.

КГП – це система перетворення обертальних переміщень в поступальні. такий метод переміщення високо затребуваний де необхідна надзвичайна точність, плавне позиціонування обладнання при роботі. Практично повна відсутність похибки, надійність конструкції і безшумність в роботі дає значну перевагу при виборі обладнання такого роду.

Виконавчий механізм КГП представлено гвинтом і гайкою, між якими, в спеціальних порожнинах різьблення знаходяться кульки. В конструкції гайки передбачені технологічні канали для рециркуляції кульок, для їх постійного, безперешкодного руху. Конструкція даного методу переміщення знижує коефіцієнт тертя до мінімуму, ККД при цьому зростає понад 90 %.

Система зворотного зв'язку також називається вимірювальною системою. Вона використовує давачі положення і швидкості для постійного

моніторингу стану, в якому знаходиться ріжучий інструмент в конкретний момент обробки. Головний блок управління використовує різницю між вихідними сигналами і сигналами зворотного зв'язку для генерації керуючих сигналів, щоб виправити помилки положення і швидкості. Оскільки фрезерний верстат з ЧПК буде зроблений із металевих виробів та при роботі шпинделя зайвий матеріал може потрапити на давач то у якості давачів будуть використовуватися індуктивні давачі наближення (положення). Принцип їх дії полягає в виявленні металевих об'єктів поблизу чутливого елемента. До інших матеріалів вони не чутливі. За допомогою високочастотного генератора в обмотці чутливого елемента наводиться електромагнітне поле.

При піднесенню до давача металевого предмета відбувається зміна параметрів цього поля, що надалі фіксується тригерною схемою. Вихід тригера керує ключовим елементом, який може комутувати невелике навантаження у вигляді реле і т. п. Також на більшості датчиків встановлено індикатор спрацювання у вигляді світлодіода. Такий підхід дозволяє оцінити справність давача і виконати його калібрування під час монтажу.

На базі конструкції та складу фрезерного верстату з ЧПК що привели вище будуємо структурну схему (рис. 2.1).

Принцип роботи структурної схеми наступний. За допомогою клавіатури вводимо початкові данні після чого ПК через порт передає команди (інструкції) на плату керування де відбувається весь процес обробки даних, готуються всі команди руху і відправляються у драйвери КД та інвертор, звідси драйвер контролює рух та швидкість КД, що призводить до руху КГП і відбувається рух осей верстату зі шпинделем, а на інверторі через плату керування задається частота обертів двигуна (включення і виключення шпинделя та подача водяного охолодження). Система зворотного зв'язку (давачі) фіксує дані про положення і швидкість руху осей і відправляє сигнал в плату керування верстатом. У платі керування сигнали зворотного зв'язку порівнюються з вихідними, якщо є помилки – він виправляє їх і відправляє в виконавчий механізм нові сигнали для коригування процесу.

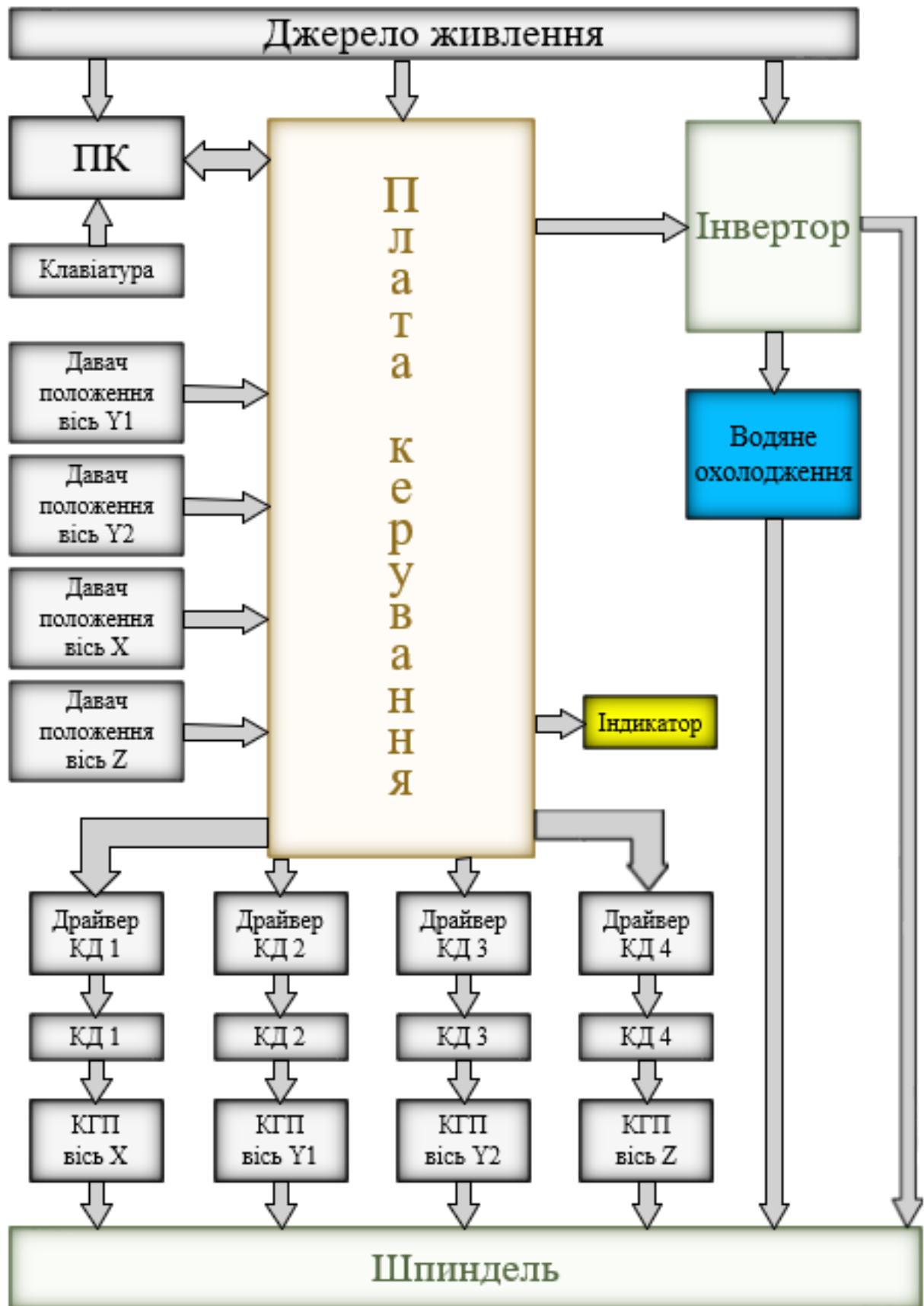


Рисунок 2.1 – Структурна схема фрезерного верстату з ЧПК [20]

Джерелом живлення є змінний струм 220 В що живить ПК, інвертор і через блок живлення постійного струму плату керування. Також на платі наявний індикатор що свідчить про нормальну роботу верстату.

Розроблена структурна схема фрезерного верстату з ЧПК дає змогу здійснити підбір вже конкретних елементів керування з певними характеристиками та розробити структуру системи керування верстатом з ЧПК.

2.2 Підбір елементів системи керування фрезерного верстату з ЧПК

Згідно з розробленою структурною схемою фрезерного верстата з ЧПК здійснимо підбір таких комплектуючих як:

- плата керування;
- кроковий двигун;
- драйвер крокового двигуна;
- кульково-гвинтова передача;
- шпиндель;
- насос (для водного охолодження);
- інвертор;
- давач положення;
- блок живлення.

Щоб обрати плату керування правильно треба враховувати, що фрезерний верстат з ЧПК, як було визначено з аналізу, портального типу, тому загальна кількість КД на осях складатиме 4 шт. так само і кількість давачів. Також повинна бути можливість підключення та контролю обертів шпинделя.

Враховуючи все вище сказане було обрано плату керування BSMCE04U-PP (рис. 2.2). Характеристики плати наведено в таблиці 2.1.

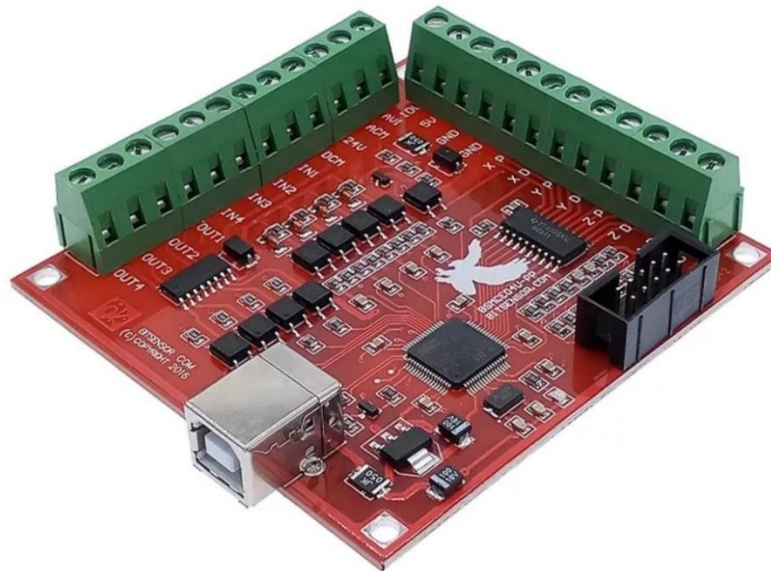


Рисунок 2.2 – Плата керування BSMCE04U-PP [21]

Таблиця 2.1 – Характеристики плати керування BSMCE04U-PP

№	Назва параметру	Характеристика
1	Мікроконтролер	STM32
2	Робоча напруга	5 В
3	Напруга живлення	12-24 В
4	Кількість підтримуючих осей	4
5	Максимальна частота крокового імпульсу	100 кГц
6	Інтерфейс	USB
7	Кількість портів реле	8
8	Розмір	81,5 мм × 77,5 мм

В якості КД будемо використовувати гібридний КД оскільки гібридні двигуни поєднують у собі кращі риси крокових двигунів зі змінним магнітним опором та двигунів з постійними магнітами (рис. 2.3). Ротор гібридного двигуна має зубці, розташовані в осьовому напрямку. Гібридні крокові двигуни забезпечують меншу величину кроку, більший момент та більшу швидкість. Типова кількість кроків на оборот для гібридних двигунів становить від 100 до 400 (кут кроку 3,6 – 0,9 градусів) [22].

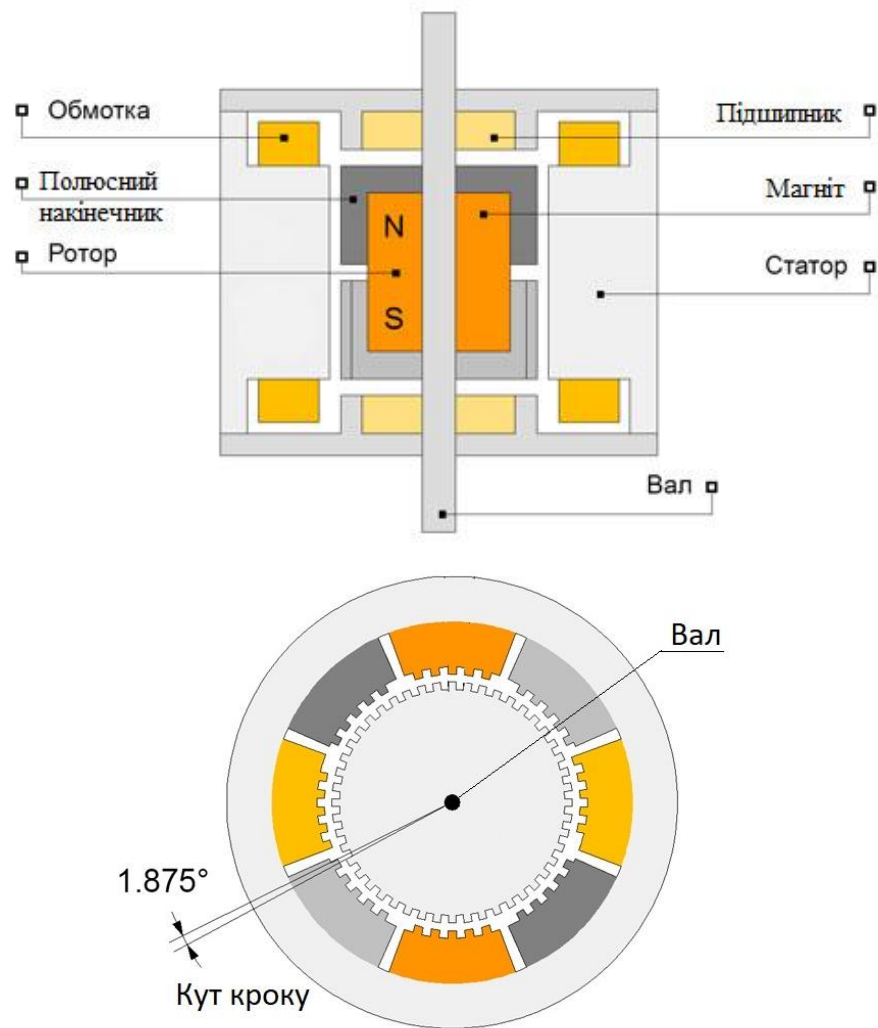


Рисунок 2.3 – Гібридний КД у розрізі [23]

Для того щоб зменшити дискретність переміщення ротора КД застосовується мікро-кроковий режим. Ділення кроку реалізується при незалежному керуванні струмом обмоток КД. Керуючи співвідношенням струмів в обмотках, можна зафіксувати ротор у проміжному положенні між кроками. Таким чином можна підвищити плавність обертання ротора і досягти високої точності позиціонування. У мікро-кроковому режимі можна отримати роздільну здатність 51200 крок/об.

Але щоб здійснити ділення кроку та взагалі керувати КД, використовуються спеціально розроблені пристрої, драйвери КД. Драйвер крокового двигуна підбирається згідно характеристик КД.

Отже обираємо часто використовувані у побудові габаритних верстатів

з ЧПК крокові двигуни NEMA 23 моделі 57HS1003004D8 (рис. 2.4) з наступними характеристиками які занесено до таблиці 2.2.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд КД NEMA 23 57HS1003004D8 [24]

Таблиця 2.2 – Характеристики КД NEMA 23 57HS1003004D8

№	Назва параметру	Характеристика
1	Кількість фаз	2
2	Вид обмотки	Біполярний (4-дротовий)
3	Крок	1,8°
4	Ток обмотки	3 А
5	Опір обмотки	1,4 ± 10% Ом
6	Індуктивність	5,5 ± 20% мГц
7	Крутний момент	25 кг·см
8	Момент утримання	2,5 Н·м
9	Максимальна робоча температура	80 °С
10	Діаметр валу	8 мм
11	Вага	1,6 кг
12	Розмір	57 мм × 57 мм × 100 мм

Опираючись на характеристики КД обираємо драйвер КД DM542 з

запасом току по фазі (рис. 2.5). Характеристики драйвера КД DM542 наведено в таблиці 2.3.

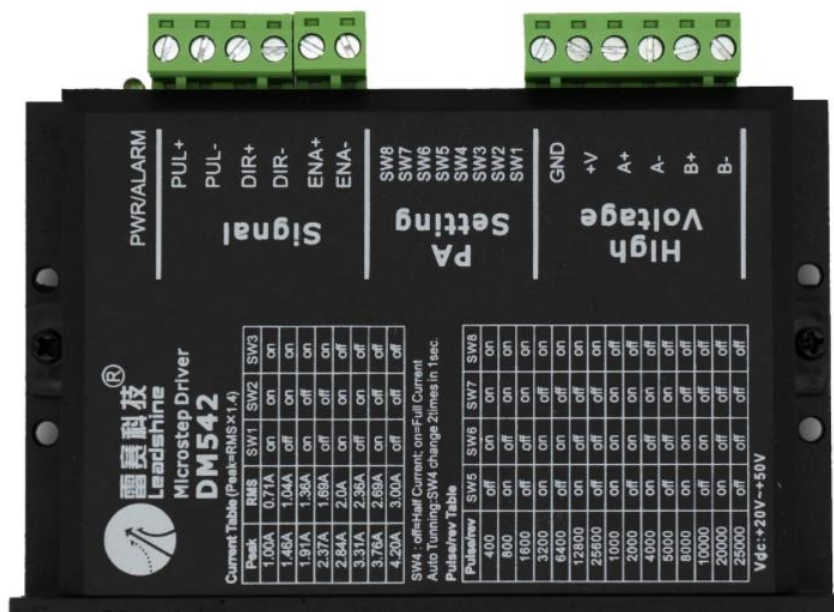


Рисунок 2.5 – Драйвер КД DM542 [25]

Таблиця 2.3 – Характеристики драйвера КД

№	Назва параметру	Характеристика
1	Підтримка режимів	PUL/DIR і CW/CCW
2	Мікрокрок	200-25600 імпульсів
3	Напруга живлення	20-50 В
4	Ток фази	1-4,2 А
5	Частота	До 200 кГц
6	Функція подавлення резонансу	так
7	Захист від перегріву/перенавантаження	так
8	Сумісність	TTL
9	Вага	280 г
10	Розмір	118 мм × 75 мм × 34 мм

Щоб обрати КГП (рис. 2.6) спочатку визначимо бажане робоче поле верстату, опираючись від потужності КД та типу конструкції ЧПК оптимальний та бажаний розмір робочого поля буде складати

1000 мм × 1000 мм тому слід обирати КГП довжиною більше одного метра. Характеристики КГП наведено в таблиці 2.4.



Рисунок 2.6 – Кулько-гвинтова передача [26]

Таблиця 2.4 – Характеристики КГП

№	Назва параметру	Характеристика
1	Номер моделі	1605
2	Клас точності	C7
3	Крок гвинта	5 мм
4	Діаметр гвинта	16 мм
5	Довжина гвинта	1165 мм
6	Тип гайки	SFU
7	Вага	2,75 кг

Основним інструментом роботи для фрезерного верстату з ЧПК є шпиндель. Для обробки не тільки дерева а й м'яких металів по типу алюмінію слід звернути увагу на потужність, швидкість обертів і цангу шпинделя. Найкращим варіантом шпинделя буде шпиндель з водяним охолодженням на відміну від повітряного охолодження, такі шпинделі краще охолоджуються, герметичні і саме головне малощумні. Таким чином було обрано шпиндель з водяним охолодження G-PENNY MACHINE (рис. 2.7). Характеристики

шпинделя G-PENNY MACHINE наведено в таблиці 2.5.



Рисунок 2.7 – Шпиндель G-PENNY MACHINE [27]

Таблиця 2.5 – Характеристики шпинделя G-PENNY MACHINE

№	Назва параметру	Характеристика
1	Напруга живлення	АС 220 В
2	Робоча швидкість обертів	0-24000 об./хв
3	Максимальний крутний момент	0,54 Н·м
4	Охолодження	Водяне
5	Потужність	1500 Вт
6	Максимальна частота обертів	400 Гц
7	Тип цанги	ER16
8	Кількість фаз	3
9	Тип підшипників	Герметичні радіально-упорні
10	Вага	5 кг
11	Розмір	80 мм × 260 мм

Для охолодження шпинделя обрано малопотужний (75 Вт) водяний насос з максимальним потоком 3200 л/год.

Як вже нам відомо шпиндель не може працювати напряму від розетки бо максимальна частота розетки 50 Гц, а потрібна частота для максимальних обертів шпинделя 400 Гц, тому існують інвертори. Потрібний інвертор

підбірано під потужність обраного шпинделя, модель інвертора HY01D523B (рис. 2.8) характеристики інвертора занесені в таблицю 2.6.



Рисунок 2.8 – Інвертор HY01D523B [28]

Таблиця 2.6 – Характеристики інвертора HY01D523B

№	Назва параметру	Характеристика
1	Вхідна напруга	АС 220 В
2	Вихідна напруга	АС 220 В
3	Вхідна частота	48-63 Гц
4	Вихідна частота	0-400 Гц
5	Вхідна фаза	1 або 3 фази
6	Вихідна фаза	3 фази
7	Розмір	170 мм × 125 мм × 163 мм

Для контролю положення інструменту фрезерного верстату з ЧПК в просторі або контролю границь робочого поля верстату застосовуємо індуктивні датчі положення LJ12A3-4-Z/VX (рис. 2.9). Характеристики датча наведено в таблиці 2.7.



Рисунок 2.9 – Давач положення LJ12A3-4-Z/BX [29]

Таблиця 2.7 – Характеристики давача LJ12A3-4-Z/BX

№	Назва параметру	Характеристика
1	Спрацювання на матеріал	Сталі, алюмінію, міді і т. д.
2	Індикатор спрацювання	Червоний світлодіод
3	Напруга живлення	6-36 В
4	Вихідний ток	300 мА
5	Відстань спрацювання	4 мм
6	Частота перетворення	500 Гц
7	Ступінь захисту	IP65
8	Діаметр циліндру	12 мм

Живлення КД та давачів положення здійснимо за допомогою імпульсного блоку живлення постійного струму з потужністю в 500 Вт та напругою 36 В.

2.3 Моделювання і збірка конструкції фрезерного верстата з ЧПК

На основі конструкції та комплектуючих фрезерного верстата з ЧПК змоделюємо майбутню конструкцію верстата. При моделюванні верстату слід пам'ятати, що точність позиціонування робочого інструмента залежить від великої кількості факторів, один з яких жорсткість і якість виконання станини

і порталу які надають безпосереднього впливу на точність верстата.

Моделювання конструкції з урахування всього, що було сказано вище здійснимо в програмі SOLIDWORK. Конструкція буде складатися з наступних основних компонентів які занесено до таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні комплектуючі фрезерного верстату з ЧПК

№	Назва	Артикул
1	Кроковий двигун	Nema 23 57HS1003004D8
2	Шпиндель	G-PENNY MACHINE
3	Лінійна направляюча	HGR15
4	Каретка	HGH15CA
5	Гвинт КГП	1605
6	Фланцева гайка	SFU1605
7	Опори	BK12/BF12
8	Муфта	XB25
9	Кронштейн	NEMA 2357
10	Алюмінієвий профіль	АД31 Т5
11	Алюмінієвий швелер	АД31 Т5
12	Алюмінієва полоса	АД31 Т5
13	Корпус гайки	dsg16

За допомоги технічної документації, де вказані розміри куплених комплектуючих та власних креслень деталей, моделюємо комплектуючі з таблиці 2.8. На рисунку 2.10 наведено всі змодельовані елементи верстату.



Рисунок 2.10 – Змодельовані комплектуючі фрезерного верстату з ЧПК

Після моделювання комплектуючих здійснюємо моделювання збірки фрезерного верстату з ЧПК (рис. 2.11-2.14). Габаритні розміри верстату 1388 мм × 1350 мм × 1320 мм, робоче поле складає 955 мм × 955 мм × 140 мм.

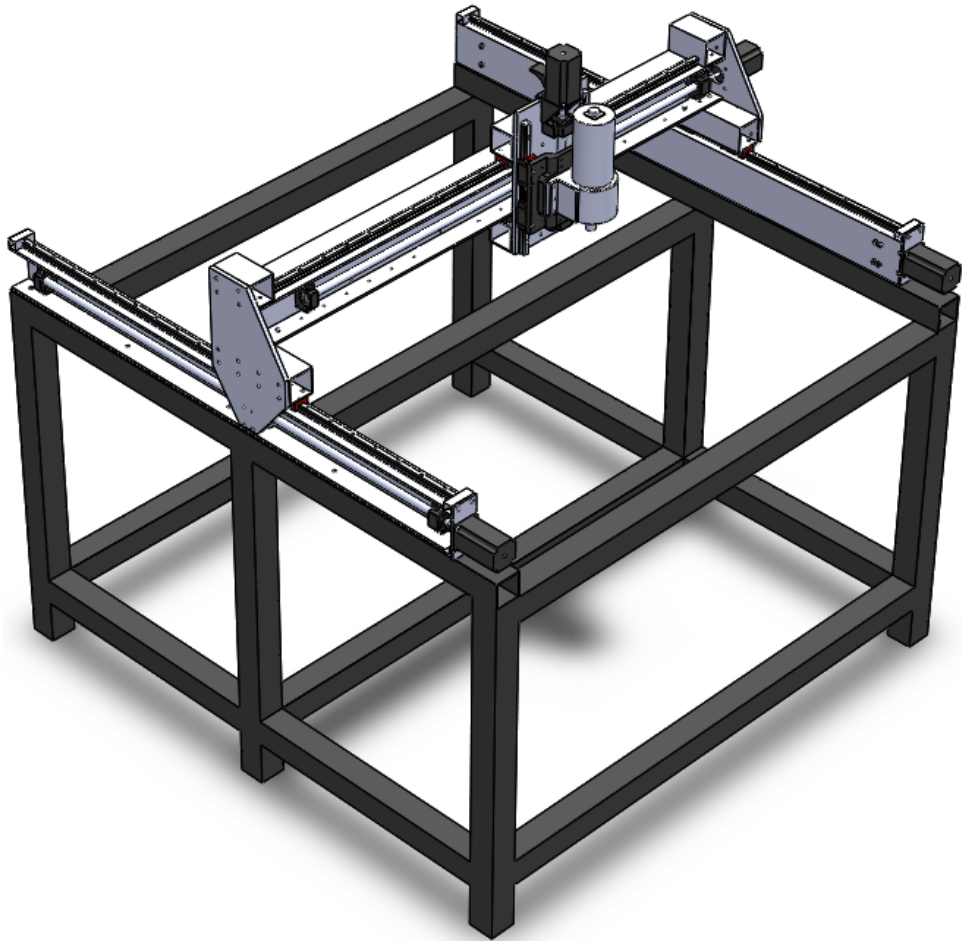


Рисунок 2.11 – Змодельована збірка фрезерного верстату з ЧПК, вид зверху

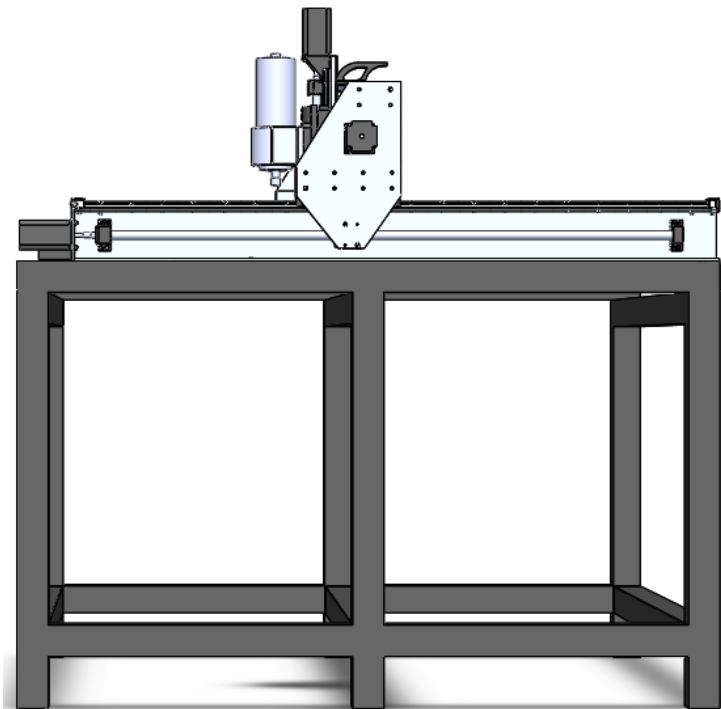


Рисунок 2.12 – Змодельована збірка фрезерного верстату з ЧПК, вид збоку

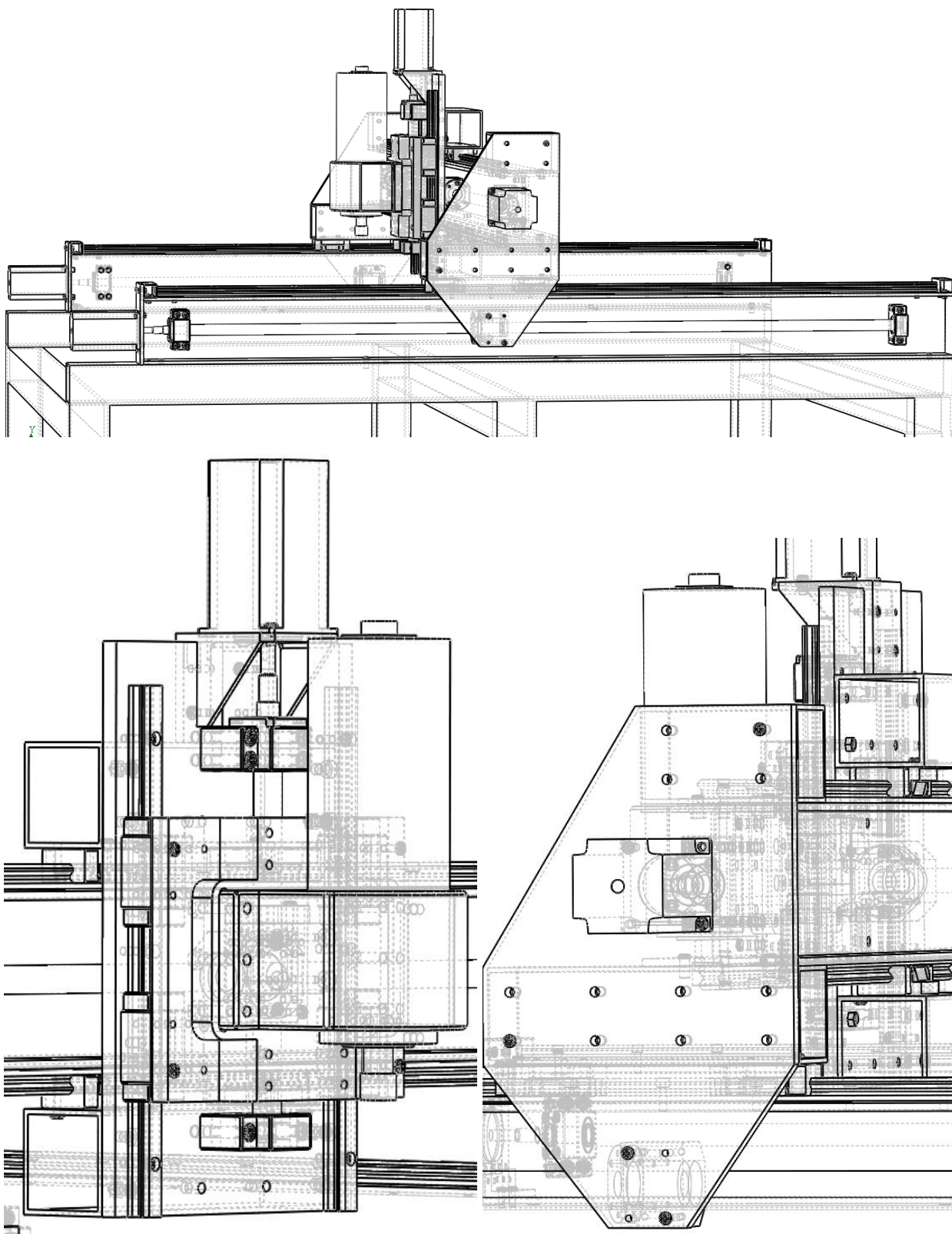


Рисунок 2.13 – Змодельована збірка фрезерного верстату з ЧПК в просвіті де видно складність зібраних вузлів

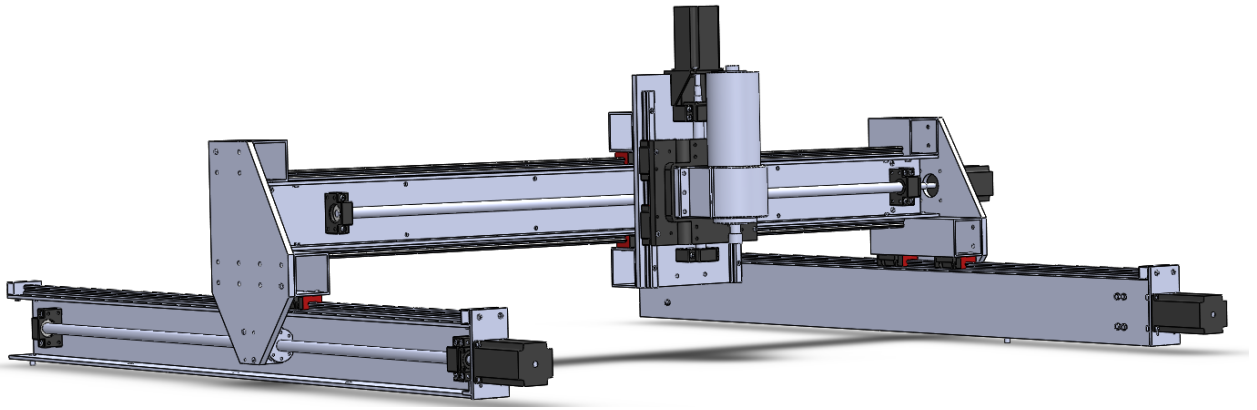


Рисунок 2.14 – Змодельована верхня частина збірки (без столу) фрезерного верстату з ЧПК

Фрезерний верстат з ЧПК був змодельований так щоб в любий момент можна було доповнити (вдосконалити) вже розроблену модель або розширити чи додати нове устаткування. Як видно з рисунків 2.11-2.12 у фрезерного верстата відсутня поверхня столу де буде закріплюватися оброблювана деталь тому, що верстат дороблюється у реальному часі, але вже в такому вигляді верстат може фрезерувати деталь.

За допомогою структурної схеми, комплектуючих та моделі фрезерного верстату з ЧПК здійснюємо збірку верстату (рис. 2.15-2.17).

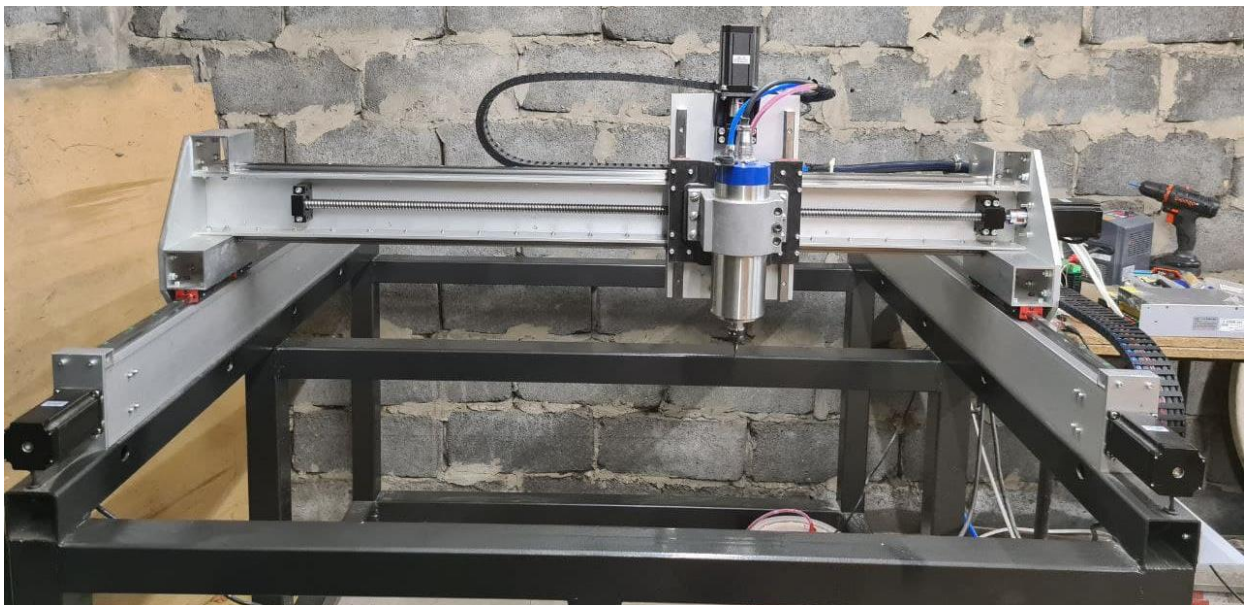


Рисунок 2.15 – Зібраний макет фрезерного верстату з ЧПК, вид спереду

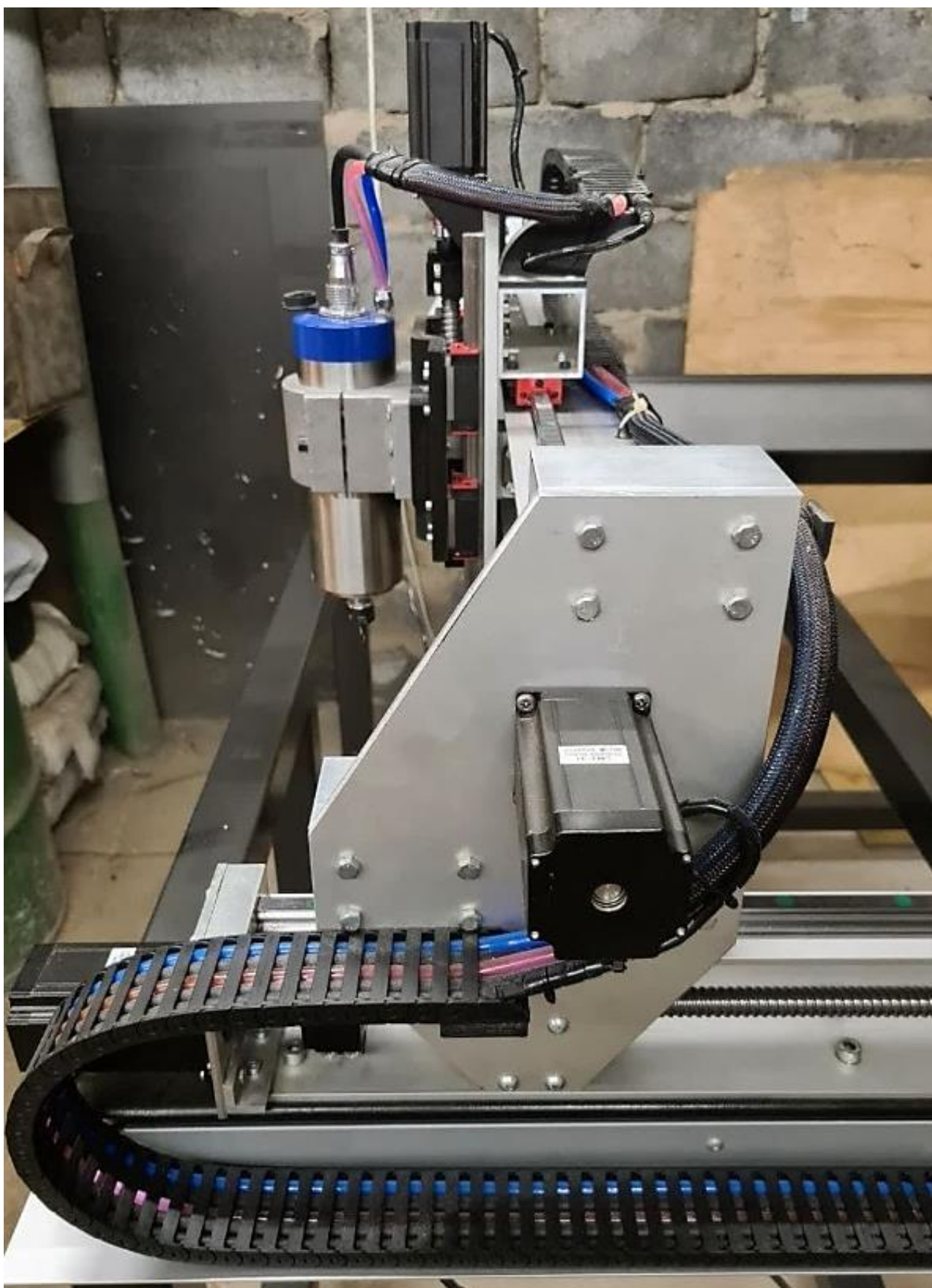


Рисунок 2.16 – Зібраний макет фрезерного верстату з ЧПК, вид збоку



Рисунок 2.17 – Зібрана ось Z макете фрезерного верстату з ЧПК

2.4 Налаштування макету фрезерного верстату з ЧПК

Після збірки макету фрезерного верстату з ЧПК з'єднуємо всі елементи електронної складової верстату за розробленої схеми (рис. 2.18).

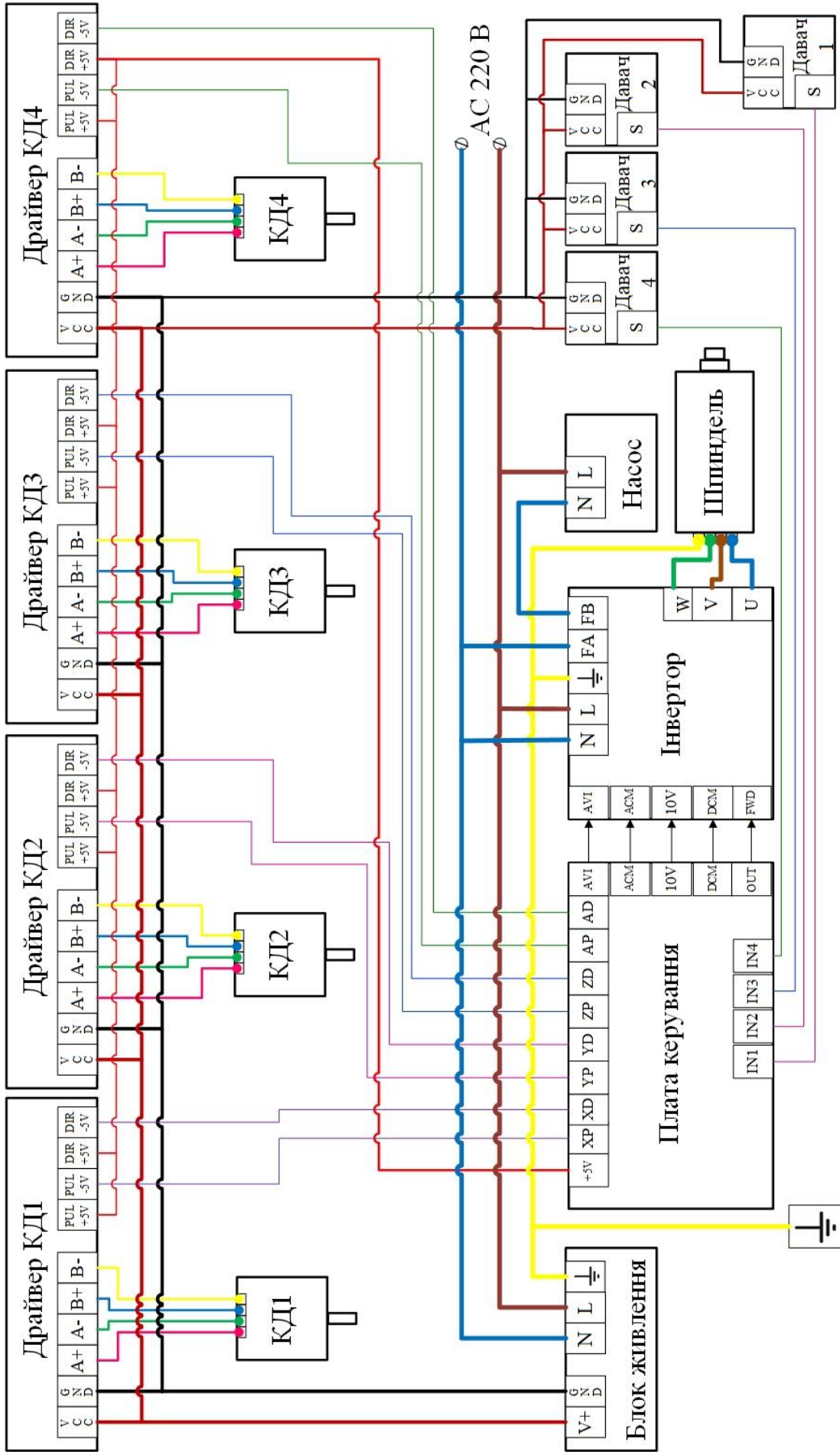


Рисунок 2.18 – Схема з'єднання електронних компонентів макету фрезерного верстату з ЧПК

Після підключення електронних компонентів спершу налаштуємо інвертор під роботу обраного шпинделя, для цього потрібно запрограмувати інвертор згідно характеристик шпинделя які було наведено в таблиці 2.5. Основні налаштування інвертора наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Основні налаштування інвертора

Код	Призначення параметру	параметр
PD005	Параметр, що відповідає за максимальну робочу частоту	400 Гц
PD003	Початкова частота, на яку виводиться двигун відразу після включення для інвертора без потенціометра	100 Гц
PD004	Номінальна частота шпинделя	400 Гц
PD008	Максимальна вихідна напруга формуюча інвертором	220 В
PD011	Нижня межа вихідної частоти, що формується інвертором	100 Гц
PD014	Час розгону від мінімальної частоти до максимальної	20 с
PD005	Час зупинки шпинделя	20 с
PD141	Номінальна напруга шпинделя	220 В
PD142	Номінальний ток шпинделя	7,5 А
PD143	Кількість полюсів шпинделя	2
PD144	Значення оборотів двигуна при 50 Гц	3000 об/хв

Тепер для правильної роботи макету фрезерного верстату з ЧПК зробимо налаштування вузлів у програмі Mach3. Щоб верстат з ЧПК на фізичному рівні розумів які органи керування присутні, призначимо піни та порти кроковим двигунам, шпинделю та давчачам. А також у разі якщо КД обертається не в правильному напрямку то у вкладці Dir LowActive ставимо позначку. Призначення портів і пінів наведено на рисунку 2.19-2.20.

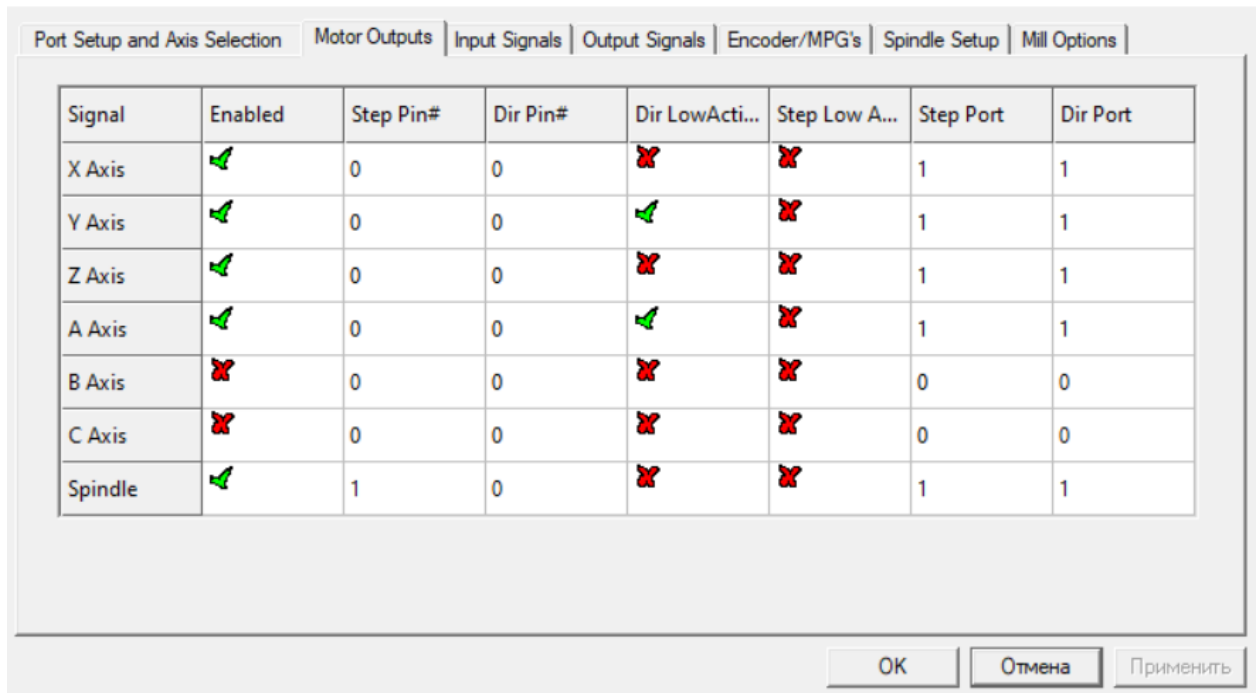


Рисунок 2.19 – Налаштування виходів КД та шпинделя

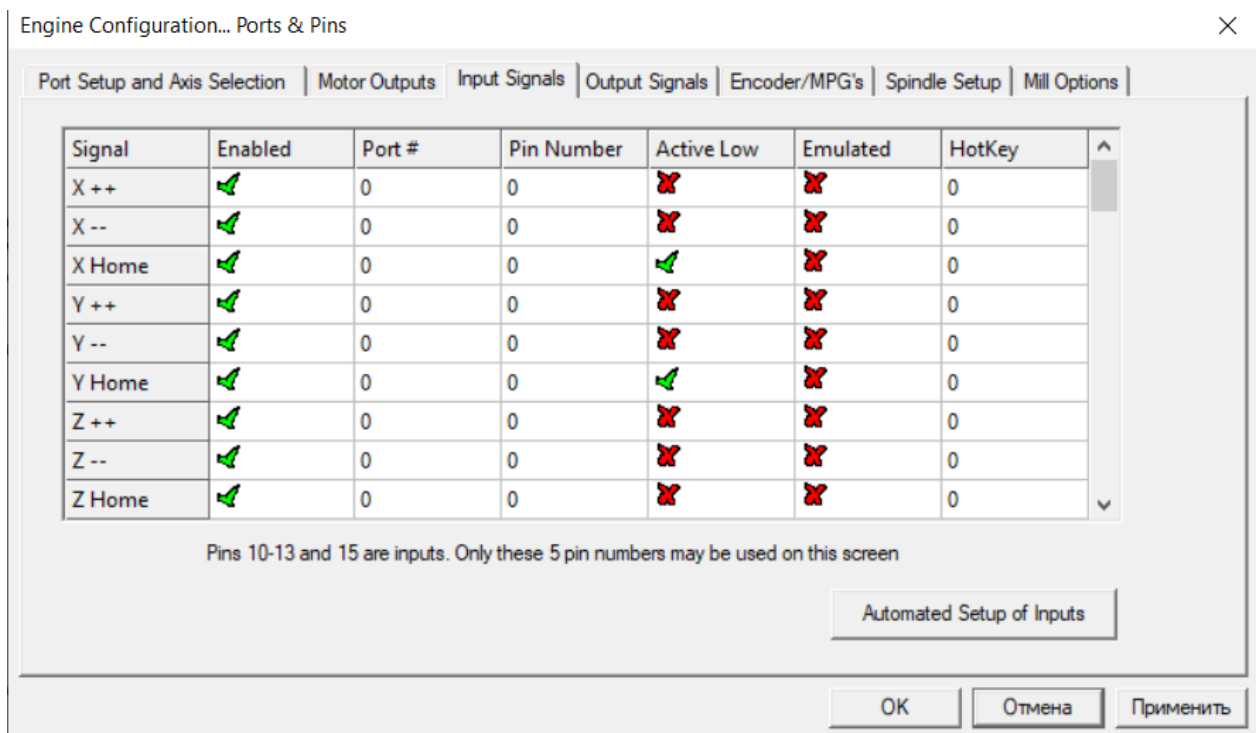


Рисунок 2.20 – Налаштування портів та пінів давачив

Як видно з рисунків 2.19-2.20 піни і порти записані як 0 це є особливістю плати керування, оскільки плата має USB порт а Mach3 призначена для роботи з портами LTP. То в даній програмі використовується плагін для роботи з

USB-портом де на програмному рівні під дану плату керування вже призначені правильні піни.

Оскільки фрезерний верстат портального типу то переміщення порталу відбувається за рахунок одночасного руху двох КД, топу у налаштуванні програми потрібно вказати підлеглу вісь в нашому випадку вісь А відчиняється осі Y. Налаштування підлеглої осі зображено на рисунку 2.21.

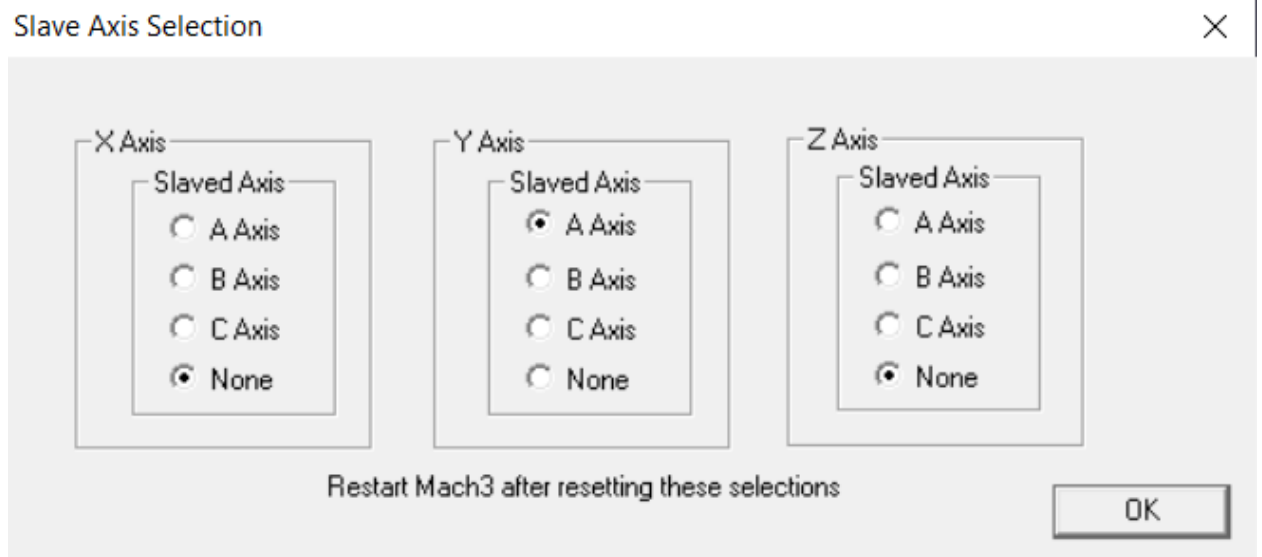


Рисунок 2.21 – Налаштування підлеглої осі А

Налаштуємо робоче поле верстату для повернення верстату в домашнє положення (рис. 2.21).

Axis	Reversed	Soft Max	Soft Min	Slow Zone	Home Off.	Home N...	Auto Zero	Speed %
X	✘	955	0	2.00	0.0000	✔	✔	20
Y	✘	955	0	2.00	0.0000	✔	✔	20
Z	✘	0	-140	2.00	0.0000	✘	✔	20
A	✘	955	0	2.00	0.0000	✔	✔	20
B	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20
C	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20

Рисунок 2.21 – Налаштування робочого поля

І головним налаштування фрезерного верстату з ЧПК є налаштування кроків КД, щоб верстат правильно здійснював переміщення інструменту по робочий зоні потрібно правильно вказати кількість кроків за один оберт двигуна. За допомогою драйвера КД обираємо оптимальне ділення кроку двигуна в 1600 кроків на оборот, із характеристик знаємо що крок КГП складає 5 кроків на оберт, отже ділимо 1600 на 5 і отримуємо 320 кроків на повний оберт двигуна. Налаштування кроків КД наведено на рисунку 2.22.

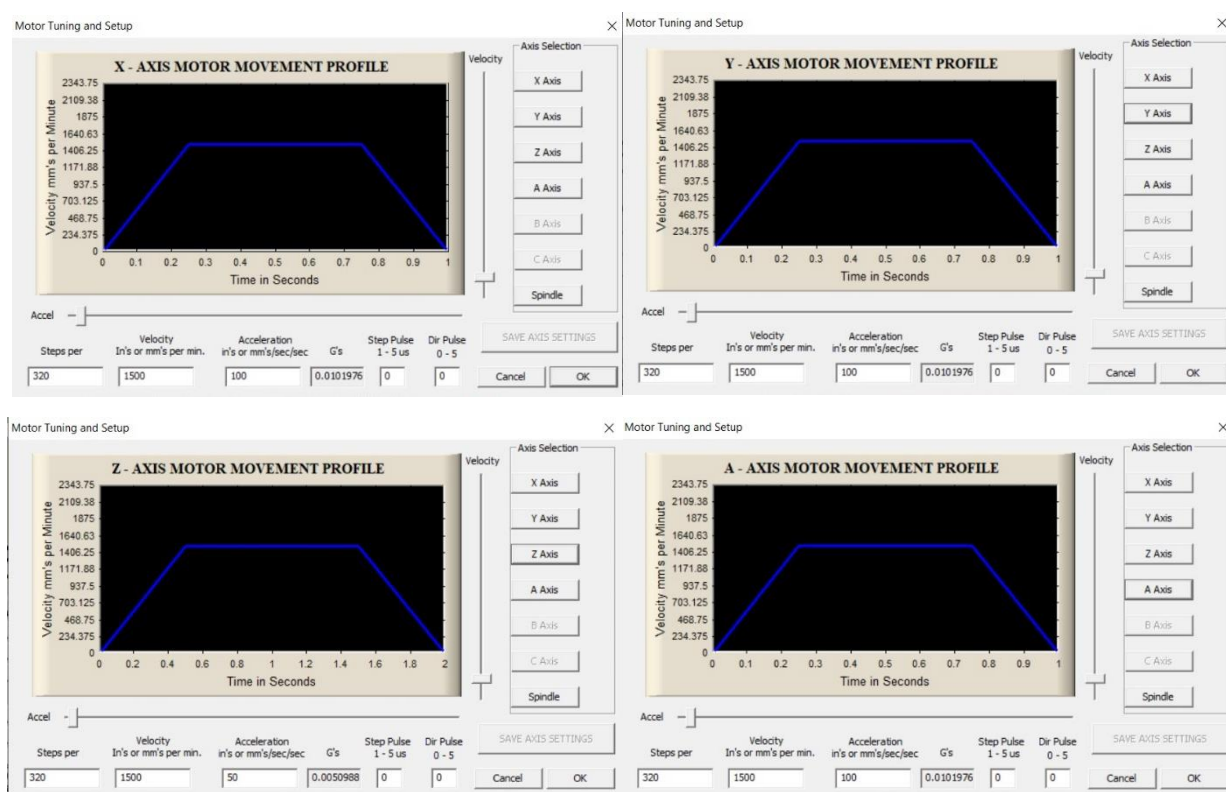


Рисунок 2.22 – Налаштування кроків КД для обертів осей

На цьому головні налаштування макету фрезерного верстату з ЧПК завершено.

2.5 Висновки до 2 розділу

В ході виконання другого розділу було розроблено структурну схему фрезерного верстату з ЧПК, на базі якої здійснено підбір комплектуючих та

елементів системи керування. На базі конструкції та комплектуючих фрезерного верстата з ЧПК в програмі SOLIDWORK побудовано 3D модель макету фрезерного верстату. За допомоги моделі, структури і придбаних комплектуючих побудовано макет фрезерного верстату з ЧПК. Здійснено з'єднання електронних компонентів верстату. Проведено налаштування інвертора та елементів системи керування у програмі Mach3. Далі потрібно на базі макету фрезерного верстату з ЧПК розробити систему керування в програмі MATLAB провести аналітичні, графічні і чисельні методи синтезу завдяки ним визначити параметри коригувальних пристроїв які додано до частини системи тим самим удосконалити якість фрезерування. Після чого перевірити удосконалену систему керування провівши експеримент.

Тому далі необхідно вирішити такі завдання:

- синтез системи керування фрезерного верстату з ЧПК;
- оптимізація параметрів системи керування верстату з ЧПК;
- проведення експериментальних досліджень на розробленому макеті фрезерного верстату з ЧПК.

3 СИНТЕЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

3.1 Синтез системи керування фрезерним верстатом з ЧПК

На базі структурної схеми фрезерного верстату з ЧПК та побудованого макету верстату було розроблено структурну схему системи керування фрезерним верстатом з ЧПК (рис. 3.1) до якої входять наступні елементи:

- плата керування;
- крокові двигуни;
- кульково-гвинтові передачі;
- шпиндель;
- давачи.

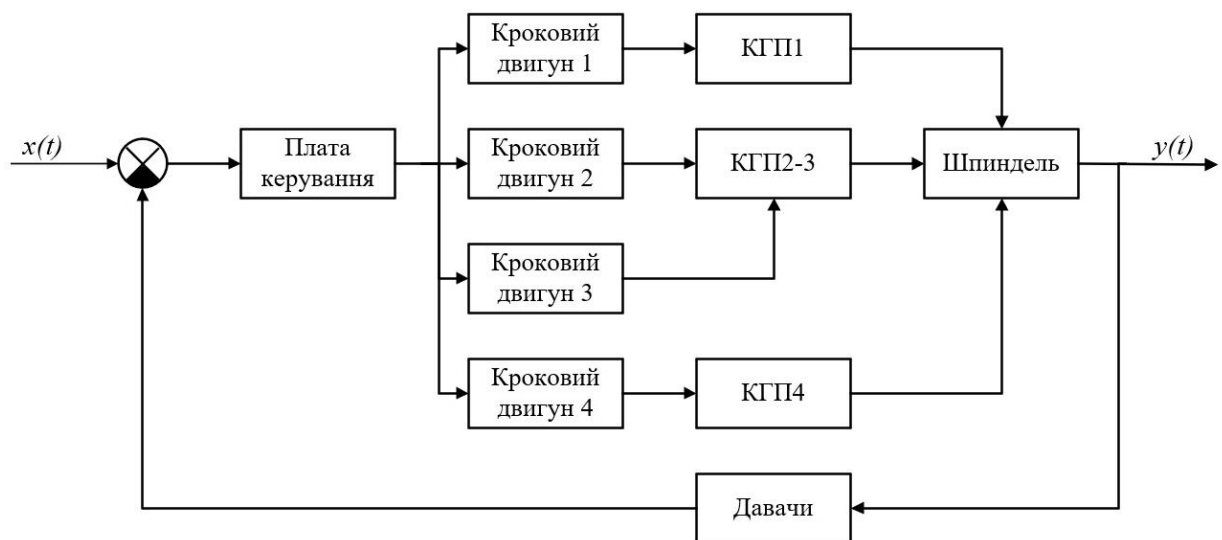


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування фрезерного верстату з
ЧПК

За допомоги розробленої структурної схеми системи керування фрезерного верстату з ЧПК складаємо структурну схему САК (рис. 3.2) з точки зору ТАУ.

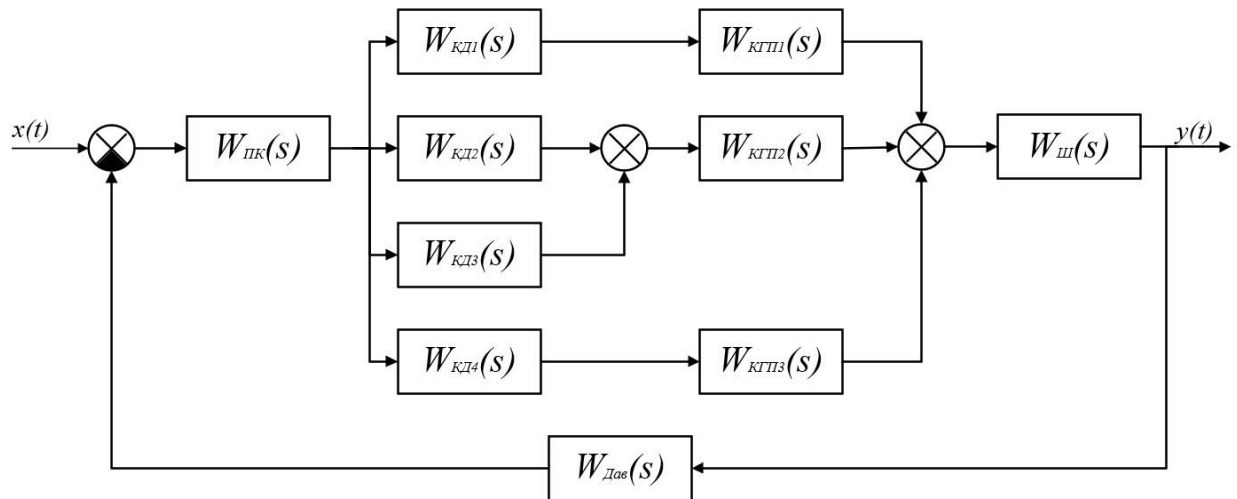


Рисунок 3.2 – Структурна схема САК макету фрезерного верстату з ЧПК

За даними ланками структурної схеми САК макету фрезерного верстату з ЧПК розрахуємо передавальні функції розімкненої та замкнутої системи наступним чином:

$$W_p(s) = W_{ПК}(s) \cdot \left((W_{КД2}(s) + W_{КД3}(s)) \cdot W_{КГП2}(s) + W_{КД1}(s) \cdot W_{КГП1}(s) + W_{КД4}(s) \cdot W_{КГП3}(s) \right) \cdot W_{Ш}(s) \cdot W_{Дав}(s). \quad (3.1)$$

$$W_3(s) = \frac{W_{ПК}(s) \cdot ((W_{КД2}(s) + W_{КД3}(s)) \cdot W_{КГП2}(s) + W_{КД1}(s) \cdot W_{КГП1}(s) + W_{КД4}(s) \cdot W_{КГП3}(s)) \cdot W_{Ш}(s)}{1 + W_{ПК}(s) \cdot ((W_{КД2}(s) + W_{КД3}(s)) \cdot W_{КГП2}(s) + W_{КД1}(s) \cdot W_{КГП1}(s) + W_{КД4}(s) \cdot W_{КГП3}(s)) \cdot W_{Ш}(s) \cdot W_{Дав}(s)}. \quad (3.2)$$

Розраховані передавальні функції кожної ланки елементів системи керування фрезерного верстату з ЧПК наведено нижче.

Передавальна функція першого КД:

$$W_{КД1} = \frac{1}{0,4s + 1}. \quad (3.3)$$

Передавальна функція другого КД:

$$W_{\text{КД2}} = \frac{1}{4,38s + 1}. \quad (3.4)$$

Передавальна функція третього КД:

$$W_{\text{КД3}} = \frac{12,62}{0,4698s + 1}. \quad (3.5)$$

Передавальна функція четвертого КД:

$$W_{\text{КД4}} = \frac{2,41}{0,392s + 1}. \quad (3.6)$$

Передавальна функція першої КГП:

$$W_{\text{КГП1}} = 0,02s + 1. \quad (3.7)$$

Передавальна функція другої КГП:

$$W_{\text{КГП2}} = 0,0325s + 1. \quad (3.8)$$

Передавальна функція третьої КГП:

$$W_{\text{КГП3}} = 0,0213s + 1. \quad (3.9)$$

Передавальна функція шпинделя:

$$W_{\text{ш}} = \frac{4,51s + 1}{0,000375s^2 + 0,01987s + 1}. \quad (3.10)$$

Передавальна функція давачив:

$$W_{\text{дав}} = \frac{0,4312}{0,03s^2 + s}. \quad (3.11)$$

Щоб розрахувати загальну передавальну функцію розімкненої системи керування фрезерного верстату з ЧПК $W_p(s)$, підставляємо до формули (3.1) передавальні функції ланок системи керування:

$$W_p(s) = \frac{1,054 \cdot s^5 + 0,06 \cdot s^4 + 177,5 \cdot s^3 + 217 \cdot s^2 + 149,5 \cdot s + 15,54}{3,63 \cdot 10^{-6} \cdot s^7 + 0,0003402 \cdot s^6 + 0,01848 \cdot s^5 + 0,0832 \cdot s^4 + 1,698 \cdot s^3 + 3,338 \cdot s^2 + s}. \quad (3.12)$$

Передавальна функція замкнутої системи керування фрезерним верстатом з ЧПК має наступний вигляд $W_3(s)$:

$$W_3(s) = \frac{1,054 \cdot s^5 + 0,06 \cdot s^4 + 177,5 \cdot s^3 + 217 \cdot s^2 + 149,5 \cdot s + 15,54}{3,63 \cdot 10^{-6} \cdot s^7 + 0,0003402 \cdot s^6 + 0,01848 \cdot s^5 + 0,1478 \cdot s^4 + 2,698 \cdot s^3 + 6,338 \cdot s^2 + 2,692 \cdot s + 0,26}. \quad (3.13)$$

Виконаємо оцінку розробленої системи на стійкість та визначимо показники якості системи керування. Тому спочатку проведемо оцінку стійкості розімкнутої системи за коренями характеристичного рівняння. Для цього беремо з формули (3.13) знаменник передаточної функції замкнутої системи та прирівнюємо його до нуля:

$$3,63 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^7 + 0,0003402 \cdot \lambda^6 + 0,01848 \cdot \lambda^5 + 0,1478 \cdot \lambda^4 + 2,698 \cdot \lambda^3 + 6,338 \cdot \lambda^2 + 2,692 \cdot \lambda + 0,26 = 0. \quad (3.14)$$

З характеристичного рівняння (3.14) можемо зробити висновок, що необхідна умова стійкості виконується бо всі коефіцієнти характеристичного рівняння одно знаку (додатні). Але оскільки система сьомого порядку треба знайти корні рівняння:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -43,8862 + 49,8218 \cdot i; \\ \lambda_2 = -43,8862 - 49,8218 \cdot i; \\ \lambda_3 = -1,6852 + 12,1702 \cdot i; \\ \lambda_4 = -1,6852 - 12,1702 \cdot i; \\ \lambda_5 = -2,0609; \\ \lambda_6 = -0,3925; \\ \lambda_7 = -0,1228. \end{cases} \quad (3.15)$$

На рисунку 3.3 зображено графік розташування на комплексній площині коренів характеристичного рівняння.

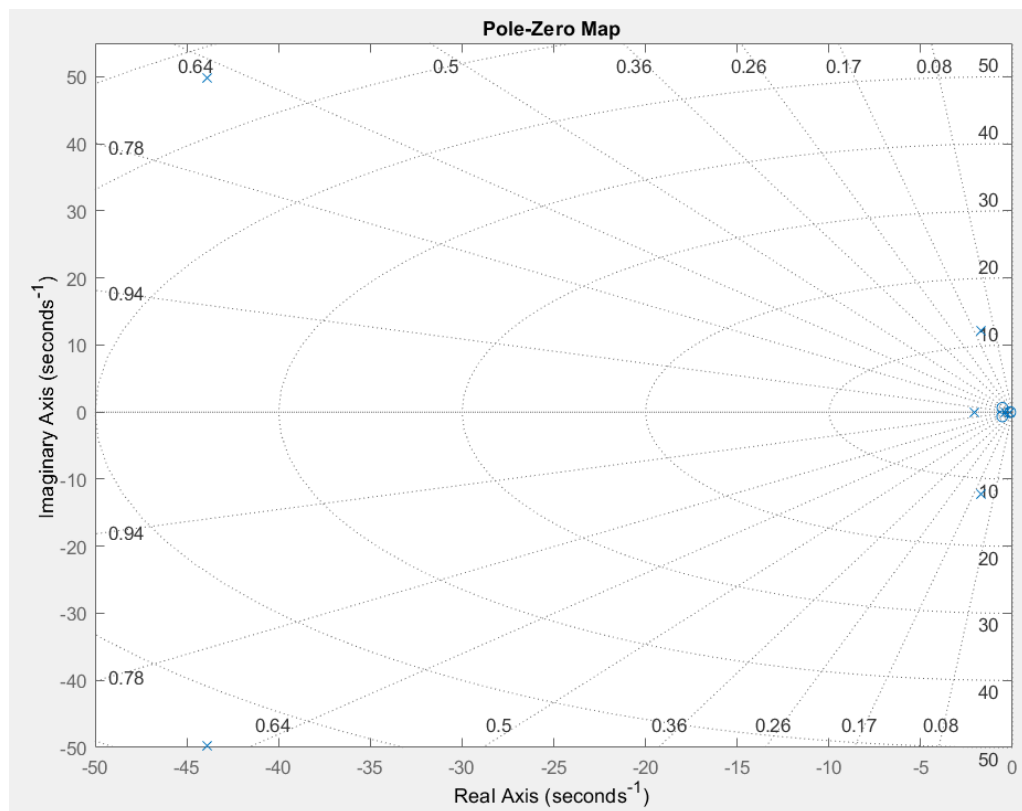


Рисунок 3.3 – Розташування коренів характеристичного рівняння

Як видно зі знайдених коренів (3.15) та графіку (3.1), немає жодного

додатного кореня (ліві корні) характеристичного рівняння, з чого робимо висновок, що замкнута система стійка.

Проведемо оцінку стійкості замкнутої системи за критерієм Гурвіца. За допомоги передавальної функції замкнутої системи $W_3(s)$ і складеним характеристичним рівнянням (3.14) здійснимо перевірку достатньої умови та побудуємо головний визначник Гурвіца який має сьомий порядок:

$$\Delta_7 = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_3 & \alpha_5 & \alpha_7 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_0 & \alpha_2 & \alpha_4 & \alpha_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_3 & \alpha_5 & \alpha_7 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_0 & \alpha_2 & \alpha_4 & \alpha_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_1 & \alpha_3 & \alpha_5 & \alpha_7 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_0 & \alpha_2 & \alpha_4 & \alpha_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & \alpha_3 & \alpha_5 & \alpha_7 \end{vmatrix}. \quad (3.16)$$

Достатня умова стійкості за критерієм Гурвіца говорить: щоб всі корні характеристичного рівняння замкнутої системи мали від'ємні реальні частини, достатньо, щоб при $\alpha_0 > 0$ всі n визначники Гурвіца були більшими за нуль.

За характеристичним рівнянням і матрицею (3.16) складемо матрицю для знаходження визначників Гурвіца:

$$\Delta_7 = \begin{vmatrix} 0,0003402 & 0,1478 & 6,338 & 0,26 & 0 & 0 & 0 \\ 3,63 \cdot 10^{-6} & 0,01848 & 2,698 & 2,692 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0003402 & 0,1478 & 6,338 & 0,26 & 0 & 0 \\ 0 & 3,63 \cdot 10^{-6} & 0,01848 & 2,698 & 2,692 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0003402 & 0,1478 & 6,338 & 0,26 & 0 \\ 0 & 0 & 3,63 \cdot 10^{-6} & 0,01848 & 2,698 & 2,692 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0003402 & 0,1478 & 6,338 & 0,26 \end{vmatrix}. \quad (3.17)$$

За проведеними розрахунками визначників Гурвіца, визначено що необхідна і достатня умови стійкості системи виконуються:

$$\alpha_0 > 0, \Delta_1 > 0, \Delta_2 > 0, \Delta_3 > 0, \Delta_4 > 0, \Delta_5 > 0, \Delta_6 > 0, \Delta_7 > 0.$$

Виконаємо оцінку стійкості замкнутої системи за критерієм Найквіста.

Для цього будемо годограф Найквіста (рис. 3.4-3.5).

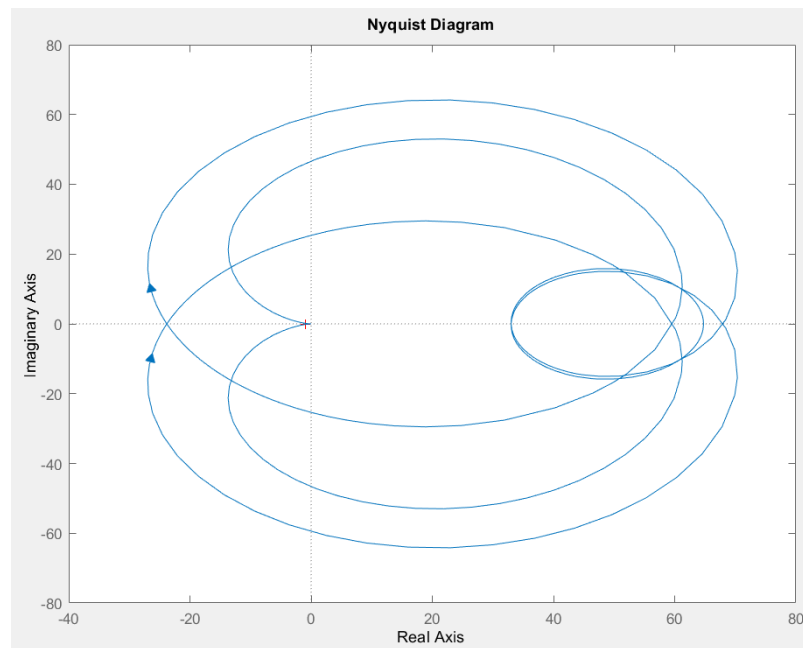


Рисунок 3.4 – Годограф Найквіста

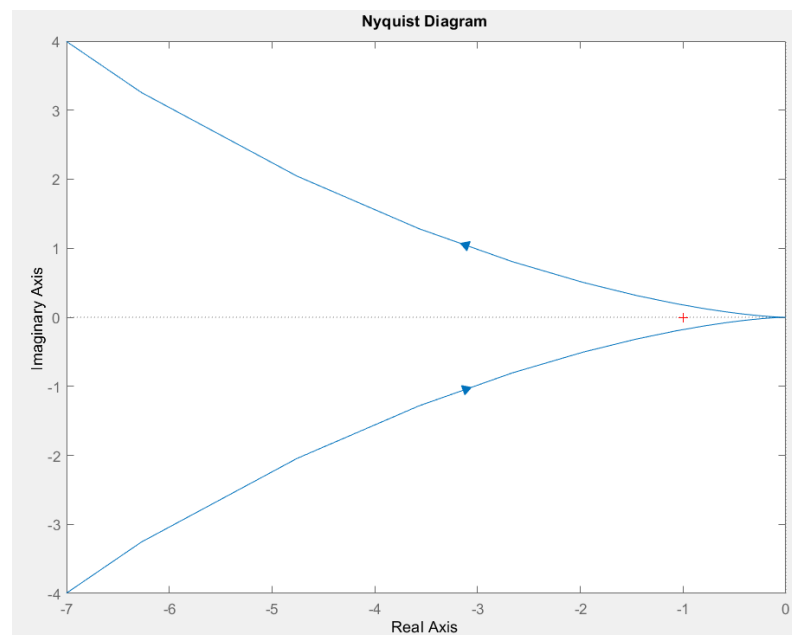


Рисунок 3.5 – Годограф Найквіста при наближенні

Виходячи з того, що характеристичне рівняння (3.14) розімкненої системи не має правих коренів, тобто $l = 0$ і як видно з рисунку 3.5 АФЧХ розімкненої системи не охоплює точку $(-1; j_0)$, з чого можна зробити висновок, що замкнута система є стійкою.

Тепер проведемо оцінку показників якості розробленої системи керування верстатом з ЧПК.

Визначимо прямі показники якості системи. Для цього побудуємо графік перехідної характеристики системи керування макету фрезерного верстату з ЧПК (рис. 3.6).

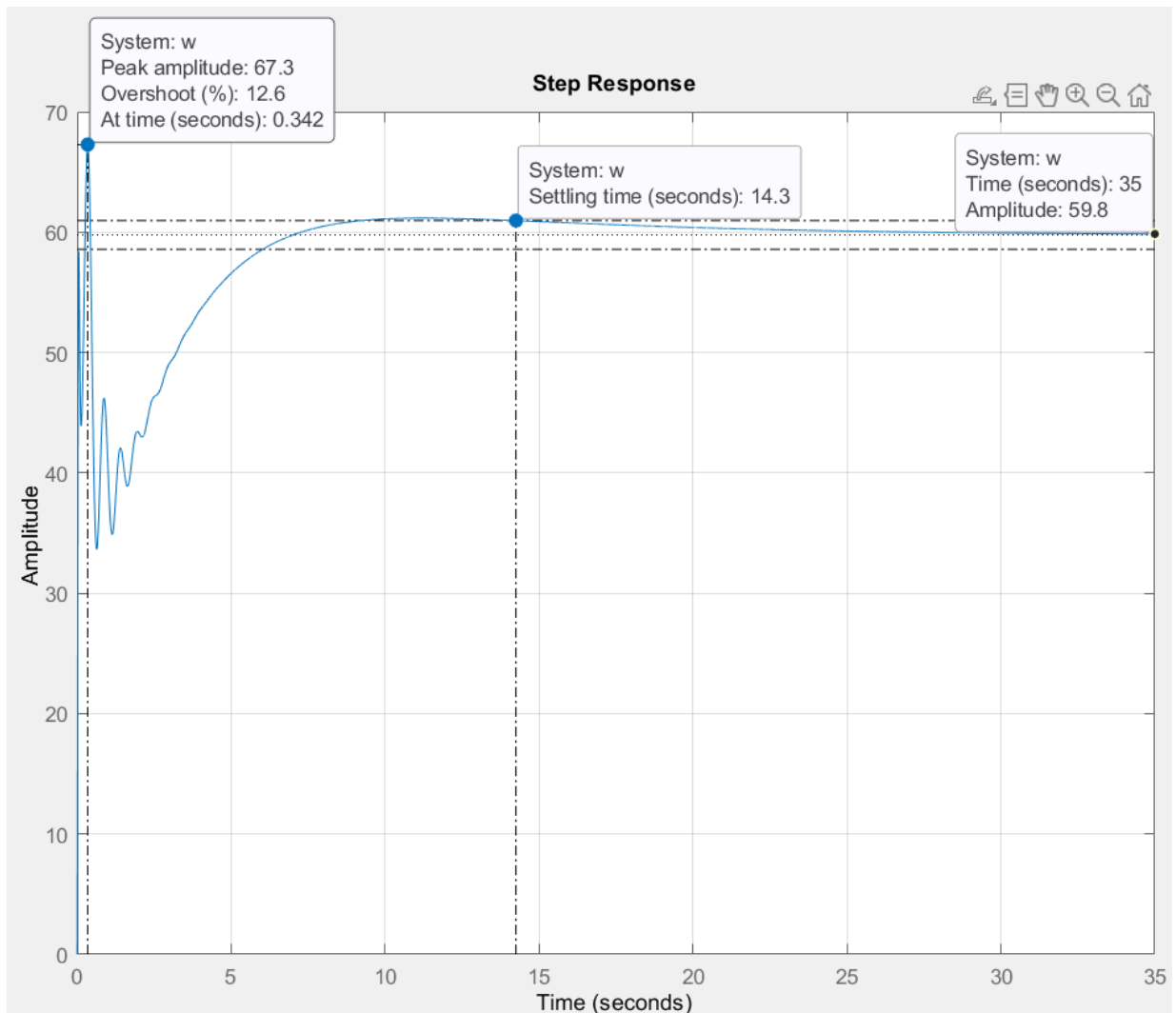


Рисунок 3.6 – Графік перехідної характеристики системи керування фрезерного верстату з ЧПК

Як видно з графіку перехідної характеристики системи керування (рис. 3.6) час регулювання системи керування дорівнює $t_p = 14,3$ с, а перерегулювання визначимо за наступною формулою:

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{\infty}}{h_{\infty}} \cdot 100 = \frac{67,3 - 59,8}{59,8} \cdot 100 = 12,6 \%$$

Отже перерегулювання дорівнює $\sigma = 12,6 \%$, як правило не повинно перевищувати 30% . Виходячи з отриманих значень, система задовольняє умови.

Визначимо запаси стійкості системи керування макету фрезерного верстату з ЧПК значення запасу за фазою та амплітудою. Оскільки в умовах експлуатації параметри системи керування верстатом з тих чи інших причин можуть змінюватися в певних межах (зношення, температурні коливання, тертя, кут нахилу поверхні і т.п.). Ці коливання параметрів можуть привести до втрати стійкості системи керування, якщо вона працює поблизу кордону стійкості. Звідси спроектована САК для ЧПК повинна працювати далеко від кордону стійкості.

Отже для визначення запасу стійкості будуюмо ЛАЧХ і ЛФЧХ (рис. 3.7). Звідси отримуємо запас стійкості по амплітуді $\Delta A = 15,2$ дБ, а запас стійкості по фазі $\Delta \varphi = 101^\circ$. Дані значення запасу потрапляють в межі від 6-20 дБ і значення запасу за фазою потрапляє в діапазон $30-600^\circ$ з чого робимо висновок що система керування нормально демпфована.

Виходячи з проведеного дослідження стійкості розробленої системи керування фрезерного верстату з ЧПК, показників якості та запасів стійкості можна зробити висновок, що обрані елементи системи та її структура задовільняють всім умовам таких систем. Далі необхідно приділити увагу оптимізації регулятора в системі керування.

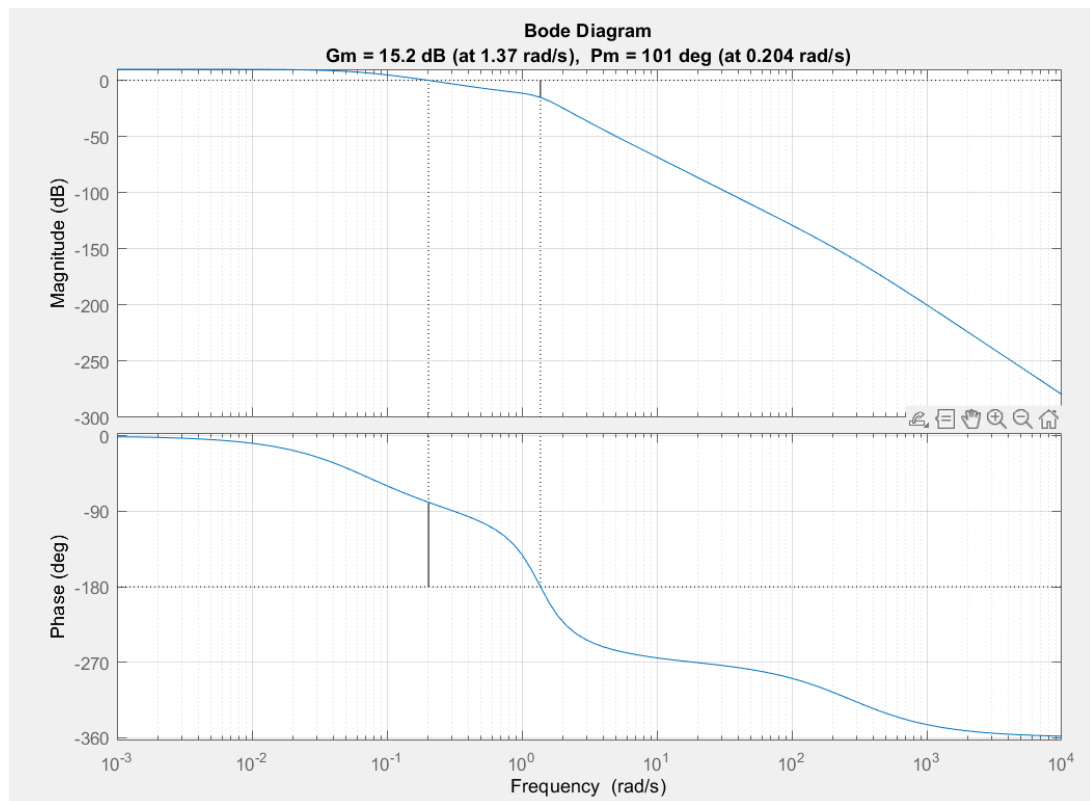


Рисунок 3.7 – ЛАЧХ та ЛФЧХ системи керування фрезерного верстата з ЧПК

3.2 Оптимізація системи керування фрезерного верстата з ЧПК

Як було визначено з прямих показників якості, а саме перехідної характеристики системи керування макету фрезерного верстату з ЧПК, система задовольняє умови. Це свідчить про працездатність системи, а якщо говорити про якість такого перехідного процесу системи з урахуванням достатньо довгого часу регулювання $t_p = 14,3$ та перерегулювання $\sigma = 12,6$ %, то такий перехідний процес напряму впливає на точність і швидкість системи. Чим більший час регулювання тим менша точність і менша швидкість системи, що в свою чергу впливає на реагування виконавчих механізмів, можливі затримки і помилки в роботі макету фрезерного верстату з ЧПК.

Отже щоб оптимізувати систему керування фрезерного верстату з ЧПК застосуємо ПІД-регулятор. ПІД-регулятор широко застосовуються в локальних системах керування промисловим обладнанням. Регулятор дозволяє швидко повертати регульований параметр в допустимий інтервал,

точно утримувати величину і швидко реагувати на впливи, що обурюють.

Здійснено моделювання системи керування фрезерного верстату з ЧПК із застосування ПІД-регулятора. Побудовану модель наведено на рисунку 3.8.

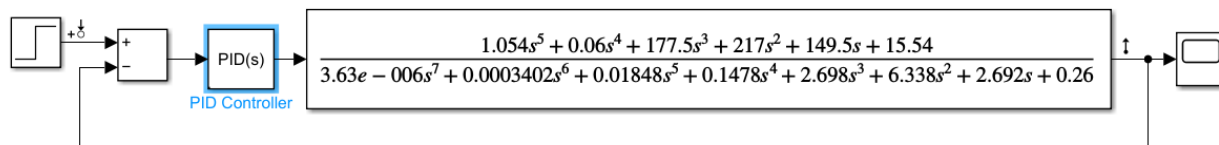


Рисунок 3.8 – Модель системи керування макету фрезерного верстату з ЧПК із застосуванням ПІД-регулятора

П-складова формується виходячи з різниці заданої величини параметра та його фактичного значення. Чим більше помилка, тим більше буде керуючий сигнал і тим швидше система наводитиме керовану величину до заданого значення.

І-складова буквально накопичує помилку, що дозволяє регулятору з часом повністю її усунути, привести систему до заданого значення з максимальною точністю.

Д-складова дозволяє компенсувати різкі зміни в системі, запобігти сильному перерегулюванню та зменшити різкі скачки.

Враховуючи все вище сказане було здійснено підбір оптимальних коефіцієнтів ПІД-регулятора:

- коефіцієнт пропорційної складової $K_p = 378$;
- коефіцієнт інтегральної складової $K_i = -0,01$;
- коефіцієнт диференціальної складової $K_d = 38,21$.

Результат моделювання системи керування макету фрезерного верстату з ЧПК із застосування ПІД-регулятора на основі підібраних коефіцієнтів наведено на рисунку 3.9.

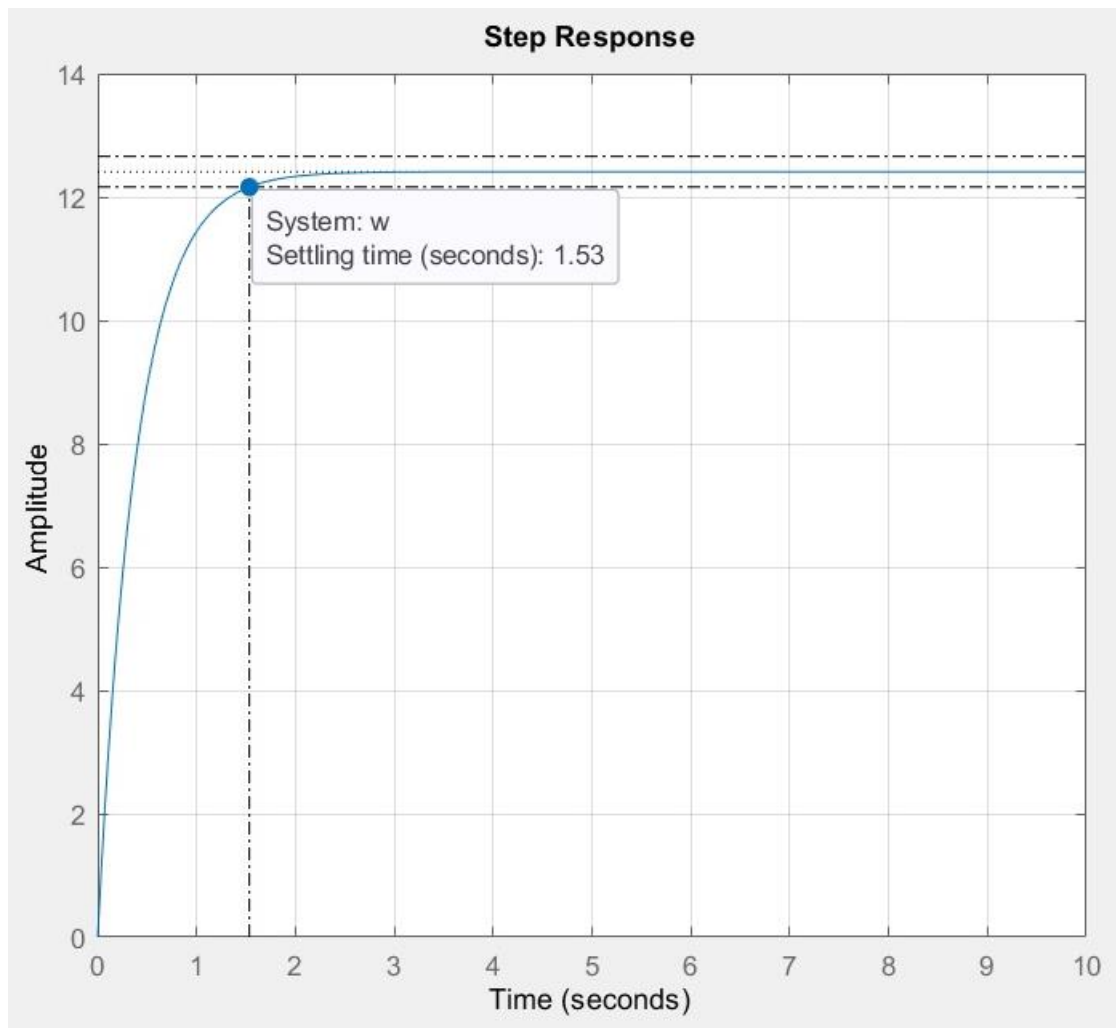


Рисунок 3.9 – Перехідний процес системи керування

Щоб оцінити отримані результати (їх коректність) дослідження розробленої системи керування треба провести експеримент на розробленому макеті фрезерного верстату з ЧПК.

3.3 Проведення експерименту

Проведення експерименту буде наступним: за однакових умов та заздалегідь змодельованих простих фігур певного розміру (рис. 3.10) виконаємо розкрій ДСП кінцевою фрезою діаметром 6 мм на макеті фрезерного верстату з ЧПК.

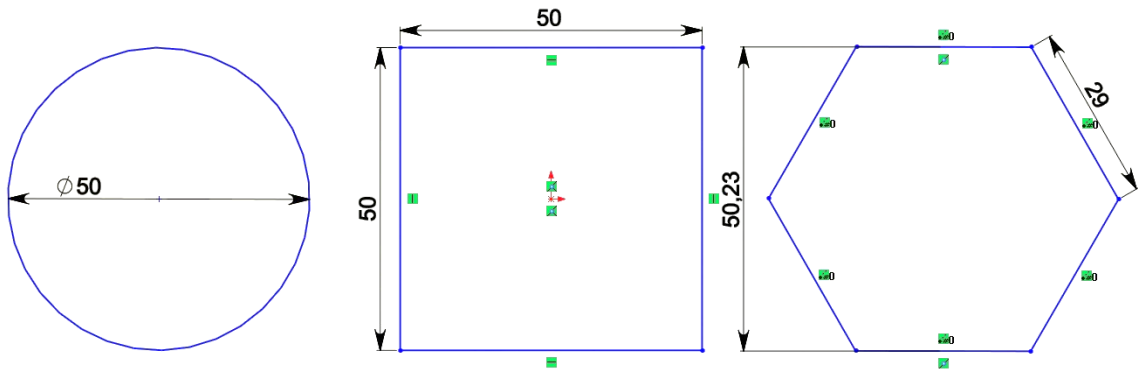


Рисунок 3.10 – Розміри простих фігур у мм для розкрию

Експеримент полягає у тому, щоб провести заміри виготовлених деталей без оптимізованої системи керування (під цифрою 1) і з оптимізованою системою керування (під цифрою 2). На базі розмірів деталей перевірити точність виготовлених деталей і зробити візуальну оцінку виробів після чого можна скласти висновок розробленої системи керування.

Виготовлені деталі на макеті фрезерного верстату з ЧПК наведено на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Виготовлені деталі на фрезерному верстаті з ЧПК

Спочатку виконаємо візуальний огляд деталей (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Наближений візуальний огляд фігур

З візуального огляду деталей (рис. 3.12) видно, що фігури під цифрою 1 мають сколи і криві лінії контуру на відміну від другого номеру де чіткі лінії і відсутні сколи, що вже говорить о задовільному результаті.

Тепер згідно рисунка 3.10 звіримо розміри деталей за допомогою електронного штангенциркуля з дозволом у 0,01 мм та точністю вимірювання в 0,01. На рисунку 3.13-3.14 зображено фактичні розміри фігур.



Рисунок 3.13 – Фактичні розміри фігур під цифрою 1



Рисунок 3.14 – Фактичні розміри фігур під цифрою 2

З рисунка 3.13 видно що похибка варується у межах від $-0,21$ мм до $-0,05$ мм така велика різниця у розмірах говорить що помилки у системі керування виникають випадково. А як видно з рисунку 3.14 шестикутник і квадрат повністю відповідають заданим розмірам, відповідно до цього щоб дізнатися помилку розкрию потрібен інструмент з більшою точністю вимірювання, що є відмінним результатом. Але коло вирізано з помилкою в $0,01$ мм, з чого робимо висновок що точність макету фрезерного верстату у межах $\pm 0,01$ мм і точність прямих ліній набагато ліпша ніж круглих бо навіть у першого кола найбільша помилка $-0,21$ мм.

Для остаточного тесту системи керування виконаємо гравіювання складного узору з мілкими деталями (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Гравіювання складного узору у вигляді клинового листка

Людському оку майже непомітна різниця між першим і другим гравіюванням і поверхня гравіювання здається безперечною, однак камера вже з рисунка 3.15 передає горизонтальні лінії проходження інструментом шпинделя, тому зробимо фото у десятикратному приближенні (рис. 3.16) та дослідимо фото більш детально.

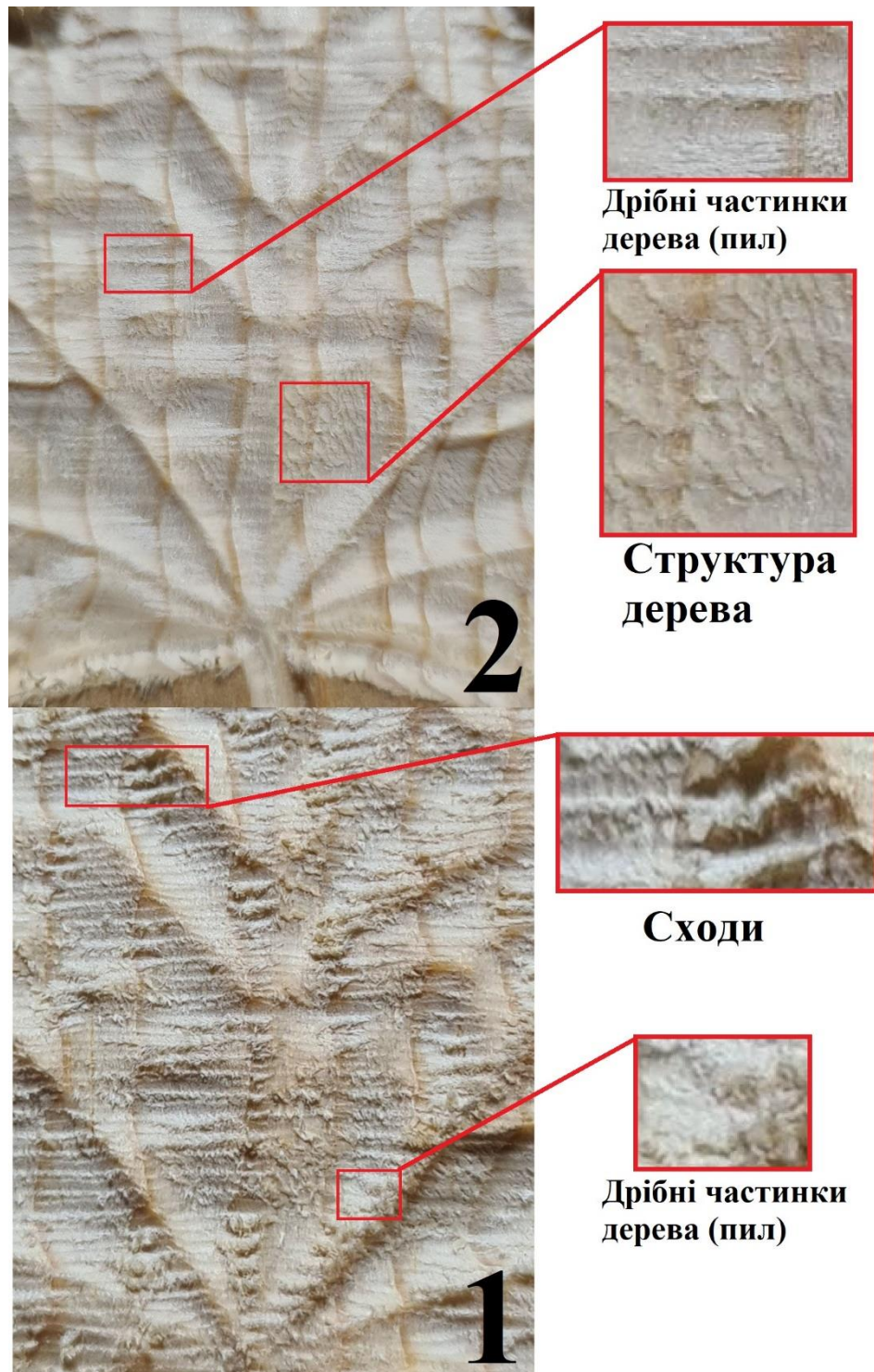


Рисунок 3.16 – Фото гравіювання в десятикратному збільшенні

При збільшенні фото стає зрозуміло, що якість розробленої оптимізованої системи керування у разі краща ніж не оптимізованої. Поверхня з другого фото більш гладка і не має дефекту у вигляді сходин, хоча присутні дрібні частинки дерева як і на першому фото, однак це поправимо і виправляється ручною обробкою або за допомоги компресора.

3.4 Охорона праці

Макет фрезерного верстата з ЧПК розміщено у приміщенні розміром 6 м × 4 м × 3 м без вікон. Для комфортної і безпечної роботи з верстатом з точки зору охорони праці потрібно застосовувати правильне штучне освітлення, тому здійснимо розрахунок освітлення методом коефіцієнта використання.

Таким чином основною величиною розрахування становитиме світловий потік який визначається за наступною формулою [31]:

$$F_{\text{роз}} = E_{\text{н}} \cdot S \cdot K3 \cdot \frac{z}{N} \cdot \eta \text{ лм}, \quad (3.18)$$

де $E_{\text{н}}$ – нормативна ступінь освітлення, у випадку приміщення без вікон приймаємо за 300 лк;

S – площа приміщення, м²;

$K3$ – коефіцієнт запилення приміщення, приймаємо 1,8;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення або мінімальної освітленості, для робіт I-III категорії складає 1,3;

N – кількість світильників;

η – коефіцієнт використання світлового потоку, %.

Спочатку розрахуємо кількість рядів світильників за формулою:

$$R = \frac{(A - x)}{L}, \quad (3.19)$$

$$R = \frac{(4 - 1)}{1,2} = 2,5,$$

де A – ширина приміщення, м;

x – відстань від краю приміщення до світильників, м;

L – відстань між лампами в рядах і між ними, м.

Кількість світильників на приміщення розраховується за наступною формулою:

$$N = R \cdot LR = 2,5 \cdot 3 = 7,5 \text{ шт.} \quad (3.20)$$

Кількість світильників приймаємо за ціле число $N = 8$ шт. Знаючи всі змінні розрахуємо світовий потік за формулою (3.18):

$$F_{\text{роз}} = \frac{300 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 1,8 \cdot 1,3 \cdot 0,55}{8} = 1158,3 \text{ лм.}$$

Таким чином щоб світовий потік одного світильника відповідав 1158,3 лм потужність світлодіодної лампи повинна бути в межах 12-15 Вт.

3.5 Висновки до 3 розділу

В ході виконання третього розділу було розроблено структурну схему системи керування фрезерним верстатом з ЧПК. На базі структурної схеми системи керування з точки зору ТАУ було створено структурну схему САК. За даними ланками структурної схеми САК макету розраховували передавальні функції розімкненої та замкнутої системи. Виконали оцінки розробленої системи на стійкість за характеристичним рівнянням, за критерієм Гурвіца і за критерієм Найквіста, необхідні і достатні умови стійкості системи виконуються.

Провели оцінку показників якості де визначили прямі показники побудувавши графік перехідного процесу. З графіку перехідної характеристики системи керування отримали час регулювання в $t_p = 14,3$ с і перерегулювання $\sigma = 12,6$ %, система задовольняє умови але потребує оптимізацію параметрів. Побудували ЛАЧХ і ЛФЧХ звідки отримали запас стійкості по амплітуді $\Delta A = 15,2$ дБ і запас стійкості по фазі $\Delta \varphi = 101^\circ$ які потрапляють в межі 6-20 дБ і 30-600° тобто система керування нормально демпфована. Виходячи з проведеного дослідження стійкості розробленої системи керування фрезерного верстатату з ЧПК, показників якості та запасів стійкості робимо висновок, що обрані елементи системи та її структура задовольняють всім умовам таких систем.

Провели оптимізацію системи керування фрезерного верстату з ЧПК. Здійснили моделювання системи керування із застосуванням ПІД-регулятора та підібрали оптимальні коефіцієнтів ПІД-регулятора:

- коефіцієнт пропорційної складової $K_p = 378$;
- коефіцієнт інтегральної складової $K_i = -0,01$;
- коефіцієнт диференціальної складової $K_d = 38,21$.

Результат моделювання системи керування показав хороший результат із отриманої перехідної характеристики час регулювання склав $t_p = 1,53$ с.

Провели експеримент шляхом вирізання деталей та гравіювання спочатку верстатом без оптимізованої системи керування і з оптимізованою системою керування, після чого зробили виміри виготовлених деталей. Було доведено ефективність розробленої системи керування із оптимізованою системою керування.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз сучасних методів керування, методів синтезу системи керування та аналізу сучасних фрезерних верстатів.

Грунтуючись на аналізі було обрано конструкцію та розроблено структурну схему фрезерного верстата з ЧПК, на основі структурної схеми здійснено підбір комплектуючих та елементів системи керування. На базі конструкції та комплектуючих верстата в програмі SOLIDWORK побудовано 3D-модель макету фрезерного верстата. Опираючись на моделі, структури і придбані комплектуючі побудовано макет фрезерного верстата з ЧПК. Здійснено з'єднання електронних компонентів і налаштування верстата.

Здійснено синтез системи керування фрезерного верстата з ЧПК. Було розроблено структурну схему системи керування верстата з ЧПК. На основі структурної схеми системи керування з точки зору теорії автоматичного керування було створено структурну схему САК. Виконали оцінки розробленої системи на стійкість за алгебраїчними та частотними критеріями необхідні і достатні умови стійкості системи виконуються.

Проведено оцінку показників якості, де визначено час регулювання $t_p = 14,3$ с і перерегулювання $\sigma = 12,6$, час регулювання достатньо довгий. Отримали запас стійкості по амплітуді $\Delta A = 15,2$ дБ і запас стійкості по фазі $\Delta \varphi = 101^\circ$, які потрапляють у межі 6-20 дБ і $30-600^\circ$, тобто система керування нормально демпфована. Виходячи з проведеного дослідження стійкості розробленої системи керування фрезерного верстату з ЧПК, показників якості та запасів стійкості робимо висновок, що обрані елементи системи та її структура задовольняють всі умови таких систем.

Проведено оптимізацію системи керування фрезерного верстата з ЧПК. Здійснили моделювання системи керування із застосуванням ПІД-регулятора та підібрали оптимальні коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Результат моделювання системи керування показав хороший результат із отриманої перехідної характеристики час регулювання склав $t_p = 1,53$ с.

Проведено експеримент шляхом вирізання деталей та гравіювання за однакових умов верстатом без оптимізованої системи керування і з оптимізованою системою керування, після чого зробили виміри виготовлених деталей та провели порівняльний аналіз. Було доведено ефективність розробленої системи керування із оптимізованою системою керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП “УкрНДНЦ”, 2016. – 30 с.
2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу : https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf
3. Невлюдов І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, Г.В. Пономарьова. – К. : пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 245 с.
4. Робастные системы управления [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://radio.bobrodobro.ru/31045> – 09.11.2021 р. – Загол. з екрану.
5. Робастне керування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://howlingpixel.com/i-uk/Робастне_керування. – 10.11.2021 р. – Загол. з екрану.
6. Поляк, Б.Т. Робастная устойчивость и управление [Текст] // Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков / Молодежный научно-технический вестник. Электронный журнал. Т2. – Москва: Наука, 2002. – 303 с.
7. Робастне керування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://howlingpixel.com/i-uk/Робастне_керування – 10.11.2021 р. – Загол. з екрану.
- 8 Yevsieiev Vladyslav, Nataliia Demska. (2021). Analysis of Methods of Control of CNC Machines in Cyber-Physical Production Systems. In The II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 1), September 17, 2021. Athens, Hellenic Republic: European Scientific Platform. P:102-104
DOI:10.36074/scientia-17.09.2021

ISBN: 978-1-68524-915-1

9. Методы синтеза систем управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://studfiles.net/preview/922909/page:6/> – 11.11.2021 р. – Загол. з екрану.

10. Аналіз лінійних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://um.co.ua/7/7-12/7-126441.html> – 11.11.2021 р. – Загол. з екрану.

11. Юревич, Е.И. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. / Е.И. Юркевич. – 4-е изд. – СПб.: ВHV, 2016. – 560 с.

12. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – 4-е изд. – СПб.: Профессия, 2004. – 752 с.

13. Фрезерный обрабатывающий центр Bernardo VMC 625 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prom.ua/p1118409309-vmc-625-siemens.html> – 12.11.2021 р. – Загол. з екрану.

14. 3-осевой обрабатывающий центр с ЧПУ Cormak MILL 500 ECOLINE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kma-ukraine.com.ua/p1435740545-osevoj-brabatyvayuschij-tsentr.html> – 13.11.2021 р. – Загол. з екрану.

15. Фрезерный станок с ЧПУ CORMAK CNC C1530 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kma-ukraine.com.ua/p1130454268-frezernyj-standok-chpu.html> – 13.11.2021 р. – Загол. з екрану.

16. Фрезерный станок по дереву с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stankiexpert.ru/stanki/tokarnye/frezernyj-standok-po-derevu-s-chpu.html> – 13.11.2021 р. – Загол. з екрану.

17. Настольный фрезерный станок с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://met-all.org/oborudovanie/stanki-frezernye/nastolnyj-frezernyj-standok-s-chpu-po-metallu.html> – 13.11.2021 р. – Загол. з екрану.

18. Гравировальный станок ЧПУ CNC 3018 PRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fdelivery.com.ua/p1157862690-chpu-standok-frezernyj.html?source=merchant_center&gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WgS9n1_tr4_4T3OSbhzIuE1qu2iDrhAfmJ0YjBN4sBqPb_6FjaBjEaAoZKEALw

_wcB – 15.11.2021 р. – Загол. з екрану.

19. Вибір частотного перетворювача (інвертора) для високооборотного шпинделя фрезерного верстата з ЧПУ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/vibir-chastotnogo-peretvorjuvacha-invertora-dlja.php> – 13.11.2021 р. – Загол. з екрану.

20. Волошин Д.Є., Євсєєв В.В. Розробка структурної схеми фрезерного верстата з ЧПК / Д.Є. Волошин, В.В. Євсєєв // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].- Харків: [електронний друк], 2021. – с. 78 – 80.

21. 4-х осевой USB контроллер управления станком ЧПУ BSMCE04U-PP Mach3 RnRMotion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.drive2.ru/b/551980676740546644/> – 16.11.2021 р. – Загол. з екрану.

22. Электромашинные устройства автоматки. Ч. 2: линейные исполнительные двигатели: учеб. пособ. / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. – М.: Высш.шк., 1986. – 335 с.

23. Шаговый двигатель [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/stepper/>. – 16.11.2021 р. – Загол. з екрану.

24. Шаговый двигатель Nema 23 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ast3d.com.ua/product/shagovyj-dvigatel-nema-23-112-mm> – 17.11.2021 р. – Загол. з екрану.

25. Драйверы шагового двигателя [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cnc.prom.ua/g1022837-drajvery-shagovogo-dvigatelya?gclid=Cj0KCQiAkZKNBhDiARIsAPsk0WgbcmbHMZbT3eqodvTyT Tj5Z430rn6NmS_uzXxuFa4jq6i6B8ugrwaAli8EALw_wcB – 18.11.2021 р. – Загол. з екрану.

26. Кулько-гвинтова передача [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://avtovsamare.ru/uk/kak-sobrat-shvp-s-dvumya-gaikami-blog-slesarya-remontnika-i-mehnika-po-naladke/> – 22.11.2021 р. – Загол. з екрану.

27. G-PENNY двигател ь шпинделя с водяным охлаждением [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://aliexpress.ru/item/32889069499.html> – 22.11.2021 р. – Загол. з екрану.

28. Инвертор (VFD) HY01D523B [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.all.biz/invertor-vfd-hy01d523b-15kw-7a-220-250v-g21419163> – 23.11.2021 р. – Загол. з екрану.

29. Индуктивный датчик приближения LJ12A3-4-Z-BX NPN NO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod1426-induktivnii-datchik-priblizeniya-lj12a3-4-zbx> – 24.11.2021 р. – Загол. з екрану.

30. Волошин Д.Є. Підвищення точності фрезерного верстата з ЧПК на етапі розробки // Матеріали 25-ого Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті», 20-22 квітня 2021 р. – Х: ХНУРЕ, 2021 р. – с. 53-54.

31. Охрана труда расчет освещения по методу коэффициента использования [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ksosvet.ru/blog/cvetotekhnicheskij-raschet-po-metodu-koehfficienta-ispolzovaniya-primer> – 26.11.2021 р. – Загол. з екрану.