

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри
_____ Олександр САЛЕНКО
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ _____ ” _____ 2025 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Конструювання та дизайн машин»
зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему Створення і дослідження настільного фрезерного верстата
портального компонування

Виконав студент

II курсу, групи МК-41мп

Кобець Іван Русланович

(прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор, Кузнєцов Ю.М.

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з розділу _____

(посада, науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

РЕЦЕНЗЕНТ:

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ - 2025

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ **Олександр САЛЕНКО**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 202 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

_____ **Кобцю Івану Руслановичу**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Створення і дослідження настільного фрезерного верстату порталного компонування

науковий керівник дисертації _____ **проф. Кузнєцов Ю.М**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від **“06” листопада 2025 року № 4844-с**

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Процеси і явища при обробці деталей на настільному фрезерному верстаті

4. Предмет дослідження (Вихідні дані) малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування мод. НФПФ3-01

Робоча зона верстату не більше 350x350x200 мм

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Розділ 1. Особливості створення малогабаритних верстатів і аналіз раніше виконаних досліджень; Розділ 2. Об'єкт досліджень – малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування; Розділ 3. Теоретичні дослідження створеного верстата; Розділ 4. Розробка рекомендацій для впровадження результатів досліджень

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____

1. Малогабаритне обладнання з ЧПК; 2. Малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування до модернізації; 3. Загальний вигляд настільного фрезерного верстата порталного компонування після модернізації; 4. 3Д-вигляд настільного фрезерного верстата порталного компонування після модернізації; 5. Загальна схема підключення елементів системи керування; 6. Результати моделювання пружно-напруженого стану несучої системи верстата; 7. Приклад налагодження верстата на обробку деталі; 8. Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка; 9. Робочі креслення оригінальних деталей верстата.

7.Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання отримав

9. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Уточнення завдання	Серпень 2025	виконано
2	Збір інформації по настільних верстатах	Вересень 2025	виконано
3	Пошук верстатів аналогів	Вересень 2025	виконано
4	Розробка конструкції верстата	Вересень 2025	виконано
5	Виконання необхідних розрахунків	Жовтень 2025	виконано
6	Теоретичні дослідження верстата	Жовтень 2025	виконано
7	Розробка схеми підключення системи керування	Листопад 2025	виконано
8	Розробка керуючої програми для обробки тестової деталі	Листопад 2025	виконано
9	Розробка конструкторської документації	Листопад 2025	виконано
10	Розрахунок собівартості проекту	Грудень 2025	виконано
11	Оформлення пояснювальної записки	Грудень 2025	виконано

Студент

Іван КОБЕЦЬ

Науковий керівник дисертації

Юрій КУЗНЕЦОВ

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка магістерської дисертації на тему «Створення і дослідження настільного фрезерного верстата порталного компонування» викладена на 99 аркушах формату А4 та містить 46 ілюстрацій. У роботі використано 40 літературних джерела та веб-ресурси.

Графічна частина дисертації складається з 9 аркушів формату А1, серед яких: «Патентні дослідження "Малогабаритне обладнання з ЧПК"»; «Загальний вигляд настільного фрезерного верстата до модернізації»; «Удосконалений настільний фрезерний верстат порталного компонування»; «3D-модель верстата після модернізації»; «Загальна схема підключення елементів системи керування»; «Результати моделювання пружно-напруженого стану несучої системи верстата»; «Приклад налагодження верстата на обробку деталі»; «Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка»; «Робочі креслення оригінальних деталей верстата».

Магістерська дисертація присвячена створенню, удосконаленню та дослідженню настільного фрезерного верстата з комп'ютерним керуванням. У роботі виконано аналіз сучасних конструкцій малогабаритних верстатів, проведено пошук комплектуючих, обґрунтовано вибір приводів та системи керування на базі контролера FluidNC. Розроблено удосконалену конструкцію верстата на основі алюмінієвого профілю V-slot з двома робочими столами та можливістю встановлення чотирьох координат. Проведено розрахунок режимів фрезерування, вибір гвинтових передач, моделювання пружно-напруженого стану та порівняння різних компоновок станини (кубічної та U-подібної). Наведено приклад створення САМ-програми та налагодження верстата на обробку деталі через Wi-Fi інтерфейс контролера.

Ключові слова: настільний фрезерний верстат, порталне компонування, кульково-гвинтова передача, крокові двигуни, система керування FluidNC, пружно-напружений стан, модернізація, САМ-програма.

ANNOTATION

The explanatory note of the master's thesis on the topic "Creation and research of a desktop milling machine of a portal layout" is presented on 99 sheets of A4 format and contains 46 illustrations. The work uses 40 literary sources and web resources.

The graphic part of the thesis consists of 9 sheets of A1 format, including: "Patent research "Small-sized CNC equipment""; "General view of the desktop milling machine before modernization"; "Improved desktop milling machine of a portal layout"; "3D model of the machine after modernization"; "General diagram of connecting the elements of the control system"; "Results of modeling the elastic-stressed state of the bed"; "Example of setting up the machine for processing a part"; "Cost estimate of manufacturing an improved sample"; "Working drawings of the original machine parts".

The master's thesis is devoted to the creation, improvement and research of a desktop milling machine with computer control. The work analyzes modern designs of small-sized machines, searches for components, justifies the choice of drives and a control system based on the FluidNC controller. An improved design of the machine is developed based on an aluminum V-slot profile with two work tables and the ability to set four coordinates. The milling modes are calculated, helical gears are selected, the elastic-stressed state is simulated and various bed layouts (cubic and U-shaped) are compared. An example of creating a CAM program and setting up the machine for processing parts via the controller's Wi-Fi interface is given.

Keywords: desktop milling machine, portal layout, ball screw drive, stepper motors, FluidNC control system, elastic-stressed state, modernization, CAM program.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	10
1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування і його серцевини-верстатобудування	10
1.2. Виробники малогабаритних верстатів і їх продукція	14
1.3. Аналіз відомих схем і конструкцій малогабаритних свердлильно-фрезерних верстатів	20
1.4. Агрегатно-модульний принцип побудови малогабаритних фрезерних верстатів з ЧПК	25
1.5. Аналіз раніше проведених досліджень по малогабаритним верстатам ..	28
1.6. Мета і задачі магістерської дисертації.....	34
2. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	36
2.1. Напрямки удосконалення настільного фрезерного верстата порталного компонування і пошук комплектуючих.....	36
2.2. Конструктивні особливості і технічна характеристика удосконаленого настільного фрезерного верстата порталного компонування.....	41
2.3. Вибір та налаштування системи керування.....	47
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	56
3.1. Розрахунок режимів фрезерування	56
3.2. Вибір приводу головного руху.....	59
3.3. Вибір приводів координатних переміщень	61
4. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	65
4.1. Побудова розрахункової схеми пружно-напруженого стану несучої системи верстата	65
4.2. Моделювання пружно-напруженого стану верстата	68
4.3. Результати моделювання	74
4.4. Приклад налагодження верстата на обробку деталі	78
5. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	87
5.1. Постановка лабораторної роботи «Настільний фрезерний верстат з комп'ютерним керуванням»	87
5.2. Охорона праці при роботі на настільному верстаті	89
5.3. Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка верстата	90
5.4. Розробка рекомендацій по подальшому удосконаленню верстата	93

	7
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
ДОДАТОК А. Технічне завдання.....	102
ДОДАТОК Б. Патентні дослідження «Малогабаритне обладнання з ЧПК»	106
ДОДАТОК В. Малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування до модернізації	107
ДОДАТОК Г. Специфікація малогабаритного фрезерного верстата порталного компонування до модернізації	108
ДОДАТОК Д. Загальний вигляд настільного фрезерного верстата порталного компонування після модернізації.....	110
ДОДАТОК Е. Специфікація настільного фрезерного верстата порталного компонування після модернізації.....	111
ДОДАТОК Ж. 3D-вигляд модернізованого верстата.....	113
ДОДАТОК И. Загальна схема підключення елементів системи керування	114
ДОДАТОК К. Результати моделювання пружно-напруженого стану несучої системи верстата	115
ДОДАТОК Л. Приклад налагодження верстата на обробку деталі	116
ДОДАТОК М. Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка	117
ДОДАТОК Н. Робочі креслення оригінальних деталей верстата	118
ДОДАТОК П. Опублікована стаття в «Journal of the Technical University of Gabrovo»	119
ДОДАТОК Р. Акт передачі до впровадження	125
ДОДАТОК С. Акт приймання	126

ВСТУП

Сучасна промисловість характеризується інтенсивним розвитком цифрових технологій, автоматизації та розповсюдженням високоточного обладнання малої потужності, здатного виконувати операції, які раніше були доступні лише для великогабаритних металорізальних верстатів. Перехід до концепцій “Індустрія 4.0” та “Індустрія 5.0” сприяє широкому використанню гнучких виробничих систем, персональних верстатів з ЧПК та компактних мехатронних комплексів, що дозволяють виконувати швидке прототипування, інженерні дослідження та навчальні роботи.

Особливе місце в цьому середовищі займають малогабаритні фрезерні верстати настільного типу. Вони поєднують доступність, універсальність і достатню точність, що робить їх затребуваними у малого бізнесу, навчальних лабораторіях, конструкторських бюро та в умовах індивідуального виробництва. Водночас більшість представлених на ринку моделей мають обмежену жорсткість, недостатню стабільність геометрії або складність модернізації, що створює потребу у розробці більш технологічних та конструктивно продуманих рішень.

Створення власного настільного фрезерного верстата портального компонування дозволяє дослідити та оптимізувати конструкцію з урахуванням реальних експлуатаційних вимог, забезпечити модульність та можливість встановлення різних робочих органів, а також провести наукове дослідження взаємозв'язку жорсткості станини, точності позиціонування та кінематичних характеристик механізмів подачі.

У рамках даної роботи виконано комплекс досліджень, що включає:

- аналіз сучасного стану малої верстатобудівної техніки;
- розробку конструкції удосконаленого портального настільного верстата;
- обґрунтування вибору приводів та елементів системи керування;
- розрахунок режимів різання та силових навантажень;
- моделювання пружно-напруженого стану несучої структури;

- дослідження впливу компоновки станини на точність та жорсткість;
- розробку САМ-процесу та приклад налагодження верстата;
- організаційно-економічну оцінку проекту.

Метою магістерської роботи є створення та дослідження настільного фрезерного верстата портального компонування з підвищеними показниками жорсткості та точності при збереженні компактності та доступності конструкції.

Відповідно до поставленої мети сформовано комплекс задач, що охоплює вибір конструктивних рішень, проведення інженерних розрахунків, експериментальне моделювання та розробку рекомендацій щодо подальшого удосконалення створеного зразка.

1. ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Світові тенденції і перспективи розвитку сучасного машинобудування і його серцевини-верстатобудування

Верстатобудування – одна з ключових галузей машинобудування, що відіграє провідну роль у розвитку промисловості та формуванні економічної потужності держав. У сучасних умовах глобальної конкуренції, стрімкого технологічного прогресу та цифрової трансформації виробництва підприємства верстатобудівного сектору стикаються як із новими викликами, так і з унікальними можливостями для зростання.

Рівень розвитку промисловості та її структура визначають технологічний потенціал країни, ефективність виробництва, стабільність економіки та її незалежність [16]. Формування промисловості є результатом еволюції економічних систем, що відбувалася через послідовність промислових революцій, кожна з яких спричинила глибокі технологічні та соціально-економічні зміни [16].

Перша промислова революція, відома як «індустріальна», розпочалася наприкінці XVIII століття у Великобританії та була зумовлена механізацією текстильного виробництва. Її основою стало впровадження парових двигунів, які забезпечили нове джерело енергії для верстатів і дали змогу суттєво підвищити продуктивність. Винахід парового двигуна, розвиток чавунного виробництва та механізація праці стали рушійними силами індустріальних змін того часу [16].

Друга промислова революція, або «технологічна», охопила другу половину XIX – початок XX століття. Вона ґрунтувалася на впровадженні нових методів виплавки сталі (зокрема, бесемерівського процесу), розвитку електрифікації та застосуванні електричних приводів у машинобудуванні. Важливою віхою цього періоду стало впровадження потокових ліній, започаткованих Генрі Фордом, розбудова залізничних комунікацій та інтенсивний розвиток хімічної промисловості [16].

Третя промислова революція, або «інформаційна», розпочалася у 1970-х роках. Її сутність полягала у широкому використанні комп'ютерних технологій у виробництві, появі верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК) та автоматизації виробничих процесів. Саме тоді було створено сучасні системи логістики, управління підприємствами та контролю якості, що заклали основу для сучасної автоматизації [16].

Сьогодні машинобудівна галузь перебуває на етапі четвертої промислової революції — «Індустрії 4.0», яка характеризується інтеграцією цифрових технологій, штучного інтелекту, інтернету речей, великих даних та автономних роботизованих систем у всі етапи виробництва. Такий підхід забезпечує повну цифровізацію процесів, підвищує їх гнучкість і дозволяє ефективно використовувати ресурси. Водночас уже формується новий етап — «Індустрія 5.0», що спрямований на гармонійне співіснування людини та розумних машин.

Використання штучного інтелекту й машинного навчання у верстатобудуванні дозволяє оптимізувати процеси виробництва — від планування й проєктування до контролю якості. Такі системи здатні прогнозувати поломки, проводити самодіагностику, знижувати витрати та скорочувати час простоїв. Завдяки підключенню верстатів до мережі Інтернет стало можливим дистанційний моніторинг та керування їхньою роботою, що підвищує ефективність і надійність експлуатації.

Серед основних напрямів розвитку машинобудування виділяють [21]:

- підвищення продуктивності обробки;
- покращення якості виготовлюваної продукції;
- зменшення споживання енергетичних і сировинних ресурсів;
- скорочення фізичної участі людини у виробництві;
- інтелектуалізацію праці;
- розширення технологічних можливостей обладнання.

Для досягнення цих цілей необхідно [28]:

- оптимізувати існуючі виробничі потужності;
- впроваджувати сучасні цифрові технології та автоматизацію процесів;
- прискорювати розвиток інновацій у верстатобудуванні;
- підвищувати рівень кваліфікації кадрів;
- розширювати наукові дослідження щодо створення нових технологій.

Верстатобудування є однією з базових галузей машинобудування, що забезпечує технологічну основу розвитку всієї промисловості. Від рівня її розвитку залежить продуктивність виробництва, точність і якість виготовлення деталей, а також конкурентоспроможність промислової продукції на світовому ринку. Сучасні тенденції у верстатобудуванні визначаються переходом до інтелектуальних, енергоефективних і цифрово інтегрованих систем, що відображає загальний вектор розвитку світової промисловості в умовах четвертої промислової революції.

У світовій економіці верстатобудівна галузь демонструє стабільну позитивну динаміку. За даними аналітичних агентств, обсяг світового ринку верстатів у 2024 році оцінюється приблизно у 97 млрд доларів США, а до 2034 року прогнозується його зростання до понад 190 млрд доларів із середньорічним темпом приросту близько 7–8%. Основними рушійними факторами є підвищення вимог до автоматизації, розвиток концепції “Індустрія 4.0”, впровадження високоточних систем керування, сенсорних технологій і кіберфізичних виробничих систем.

Сучасне машинобудування характеризується переходом від класичної парадигми масового виробництва до гнучкого інтелектуального виробництва, заснованого на використанні цифрових технологій, систем штучного інтелекту, хмарних сервісів, великих даних (Big Data) та інтернету речей (IoT). Такі технології дозволяють не лише підвищити ефективність процесів, але й забезпечити їхню адаптивність і прогнозованість. Верстати нового покоління здатні до самодіагностики, віддаленого моніторингу та інтеграції в мережеві

виробничі комплекси, що суттєво знижує час простою та витрати на технічне обслуговування.

Водночас одним із провідних напрямів розвитку є цифровізація процесів проєктування. Завдяки системам CAD/CAM/CAE створюються цифрові двійники верстатів та технологічних процесів, що дає змогу ще на етапі проєктування оцінити ефективність конструкційних рішень, оптимізувати кінематику, вибір матеріалів та систем приводу. Цей підхід формує нову культуру інженерного мислення, орієнтовану на скорочення життєвого циклу виробу від ідеї до серійного виробництва.

Особливе місце у сучасних трендах займає гібридизація технологій – поєднання традиційних методів обробки (фрезерування, шліфування) з адитивними процесами, лазерною або плазмовою обробкою. Такі системи дозволяють виконувати комбіновані технологічні операції на одному робочому центрі, що підвищує універсальність і продуктивність обладнання.

Важливою тенденцією є мініатюризація та модульність верстатів. Зростає попит на компактні настільні системи, що поєднують достатню жорсткість, точність і низьке енергоспоживання. Такі верстати застосовуються в навчальних закладах, лабораторіях, малих інжинірингових компаніях та дослідних центрах. Вони виконують роль платформи для впровадження і тестування нових рішень у сфері привідних систем, систем керування і цифрової інтеграції.

Окрім технічних аспектів, значну роль відіграють питання ресурсоефективності та екологічності. Виробники зосереджуються на зниженні споживання енергії, оптимізації мастильно-охолоджувальних систем, використанні перероблюваних матеріалів і повторному використанні ЗОР. Цей напрям відповідає концепції «зеленого виробництва» і формує основу для сталого розвитку верстатобудування.

Географічно основні центри зростання галузі зміщуються в регіон Азії та Тихоокеанського басейну, зокрема до Китаю, Японії, Південної Кореї та Індії, які забезпечують понад 60 % світового виробництва верстатів. Водночас країни Європи та Північної Америки концентруються на розробці

високотехнологічних, наукоємних рішень і програмного забезпечення для систем керування.

Серед ключових перспектив розвитку машинобудування і верстатобудування можна виокремити:

- підвищення точності, динаміки та продуктивності процесів обробки;
- повну інтеграцію машин у цифрові виробничі екосистеми;
- створення самонавчальних систем керування із застосуванням алгоритмів машинного навчання;
- розвиток сервісної моделі «Machine-as-a-Service», що передбачає оплату за фактичне використання обладнання;
- впровадження адаптивних систем охолодження, енергозбереження та віброкомпенсації.

Таким чином, розвиток верстатобудування в умовах Індустрії 4.0 визначає конкурентоспроможність промисловості, забезпечуючи перехід до високотехнологічного, гнучкого й інтелектуального виробництва.

1.2. Виробники малогабаритних верстатів і їх продукція

На сучасному ринку інструментів і обладнання для малого та середнього виробництва існує багато виробників, що спеціалізуються на малогабаритних верстатах. Це обладнання відзначається високою мобільністю, компактністю та зручністю в експлуатації. Однак, небагато виробників розробляють настільні фрезерні верстати, в яких передбачена багатофункціональність, що полягає у можливості швидко і просто замінити мотор-шпиндель на друкуючу головку 3D-принтера або лазерну головку для порізки листового матеріалу чи гравіювання.

На ринку малогабаритних верстатів з ЧПК можна зустріти такі компанії як ПП «АНДІС-ТЕХНО», CNC Machines, Raptor CNC, AST3D. Зупинимось детальніше на кожному виробнику і розглянемо продукцію, яку вони пропонують.

Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК "SMART Light" (рис. 1.1) від SmartCNC оснащений сенсорним екраном і автономним контролером (може працювати без підключення до ПК) та відмінно підійде для роботи з усіма видами дерева та м'яких металів.

Верстат забезпечує повністю автономну роботу та не потребує постійного підключення до персонального комп'ютера. Керування здійснюється через сучасний контролер із вбудованим кольоровим сенсорним дисплеєм, що дозволяє виконувати всі базові операції безпосередньо на обладнанні. Додатково передбачено бездротовий інтерфейс Wi-Fi, завдяки якому користувач може завантажувати керуючі програми, контролювати процес обробки та виконувати налаштування зі смартфона або ПК через зручний веб-інтерфейс.

Механічна частина верстата виконана на базі професійних рейкових напрямних типу HGR15 та кульково-гвинтових передач 1605/10, що забезпечує високу точність позиціонування на рівні 0,06 мм та значний ресурс роботи. У конструкції свідомо не використано дешевих трапецеїдальних гвинтів, оскільки вони не здатні забезпечити необхідних технічних характеристик.

Верстат легко транспортується та постачається в напівзібраному вигляді, що суттєво знижує вартість доставки. Його остаточна збірка займає не більше 30 хвилин і не потребує спеціальної підготовки. Конструкція передбачає можливість подальшої модернізації, зокрема встановлення більш потужного шпинделя або додаткової поворотної осі, що робить обладнання перспективним для довготривалого використання та розвитку [33].

Запропоноване обладнання (ЧПК станок для дерева та металу) дозволяє виконувати широкий спектр продукції за індивідуальним замовленням або у малосерійному виробництві. Це оптимально для малого приватного бізнесу.



Рисунок 1.1 – Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК "SMART Light" [33].

Компанія **CNC MACHINES** – виробник обладнання з числовим програмним управлінням, що реалізує свою продукцію на ринку України. З 2015 року виробляють і продають верстати по території України [23].

Верстати з ЧПК, які представлені в інтернет-магазині, відмінно підходять для точної обробки різних матеріалів – починаючи від фанери, і закінчуючи різними пластиками, алюмінієм, композитами. Точність ЧПК верстатів, що пропонує даний виробник, дозволяє обробляти найвибагливіші до точності об'єкти

В асортименті представлені як малогабаритні настільні верстати, такі, що ідеально підходять для обробки невеликих деталей і вимагають мінімального простору, так і великі верстати, які призначені для роботи з великими чи складними об'єктами.

Розглянемо верстат з ЧПК «Сокіл 3040» [23] (рис. 1.2), який пропонує компанія CNC MACHINES. Це 3-х координатний фрезерний верстат із ЧПУ. Призначений для опрацювання 2D і 3D моделей, а також тіл обертання (зі встановленим модулем 4-ї осі).

Ця модель вирізняється високою точністю і підвищеною швидкістю обробки, завдяки жорсткій станині з алюмінієвих сплавів. Безколекторний мотор-шпиндель 1.5 кВт, з рідинним охолодженням дає змогу виконувати завдання без перерв, 24 години на добу.



Рисунок 1.2 – "Сокіл 3040" від CNC MACHINES [23]

Дана модель верстата дозволяє виконувати такі операції, як розкрій листових матеріалів, вибірка, фрезерування пазів, гравірування, фрезерування 3d-рельєфів, свердління, лазерне гравіювання (опціонально), фрезерування тіл обертання (опціонально).

Технічні характеристики:

Робоче поле: 300×400×100 мм;

Точність позиціонування: 0,05 мм;

Тип двигунів: кроковий NEMA 23;

Потужність шпинделя: 1500 Вт;

Оберти шпинделя: 6000-24000 об/хв;

Типорозмір цанги: ER11;

Максимальний діаметр хвостовика фрези : 8 мм;

Оброблювані матеріали акрил, дВП, дерево, дСП, шкіра, мдф, м'які метали, ПВХ, сталь нержавіюча, текстоліт, фанера.

Snapmaker – технологічна компанія, яка розробляє, виробляє та продає настільні багатофункціональні 3D-принтери. Він присвячений створенню преміум-якісних і зручних настільних машин для виготовлення, надаючи творчість кожному та даючи можливість користувачам створювати найкраще [9].

Однією з найпопулярніших моделей верстатів даного виробника є SNAPMAKER ARTISAN MODULAR 3D PRINTER (рис. 1.3)



Рисунок 1.3 – SNAPMAKER ARTISAN MODULAR 3D PRINTER [9].

Особливістю даного верстата є його модульність. Ця модель ідеально підходить для домашньої майстерні, оскільки виконує функції 3D-принтера, лазерного гравера і фрезерного верстата, при цьому займає небагато робочого простору, що підходить для дрібносерійного або одиничного виробництва.

Виробник постачає з даним верстатом друкуючу головку, лазерну головку і мотор-шпиндель власного виробництва.

Технічні характеристики при різьбленні та різанні з ЧПУ

Робоча зона (Ш × Г): 400 мм × 400 мм

Потужність: 200 Вт

Макс. Швидкість шпинделя: 18 000 об/хв

Макс. Швидкість роботи :50 мм/с (бук); 33 мм/с (акрил)

Максимальний крок вниз: 2 мм (бук); 1 мм (акрил)

Діаметр хвостовика: 0,5 мм - 6,35 мм

Підтримувані матеріали (ідеально): листяна деревина (бук, горіх), хвойна деревина, HDF, MDF, фанера, нефрит, вуглецеве волокно, акрил, епоксидна смола, інструментальна дошка, друкована плата

Підтримувані матеріали (підтримувані): алюміній, латунь, мідь.

Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., широко відома як **Creality**, є лідером у виробництві споживчих 3D-принтерів на світовому ринку. З моменту заснування у 2014 році компанія взяла на себе місію "проповідника 3D-друку", прагнучи популяризувати, вдосконалювати та впроваджувати цю технологію в усьому світі [4].

Найновіший апарат Creality CP-01 (рис. 1.4) зі змінними головками для 3D-друку, лазерного гравіювання та фрезерування. Кожен модуль має універсальний роз'єм і легко замінюється, тому зміна конфігурації машини для регулярного перемикання між різними функціями не є великою проблемою. У разі втрати електроживлення у CP-01 є захист, він продовжить роботу, де зупинився.



Рисунок 1.4 – Creality CP-01 [4]

Технічні характеристики:

3D ДРУК:

Технологія - FDM;

Робоча зона - 200 мм x 200 мм x 200 мм;

Максимальний крок по осі Z - 0,1 мм;

Швидкість друку - 10-80 мм/с;

Температура столу ≤ 100 C;

Товщина шару - 0,1-0,4 мм;

Матеріал - \varnothing 1,75 мм, PLA, ABS, TPU, PVA;

Діаметр сопла - 0,4 мм; 0,6 мм, 0,8 мм, 1,0 мм, 1,2 мм;

ФРЕЗЕРУВАННЯ:

Оброблювані матеріали - дерево, друковані плати, пластик;

Швидкість шпинделя не більше 4800 об / хв;

Діапазон затиску свердлильного патрона - 0-4 мм;

ЛАЗЕРНЕ ГРАВІЮВАННЯ:

Оброблювані матеріали - дерево, папір, пластик и др.

Потужність лазера менше 0,5 Вт.

1.3. Аналіз відомих схем і конструкцій малогабаритних свердлильно-фрезерних верстатів

Малогабаритні свердлильно-фрезерні верстати є окремим класом універсальних верстатів, призначених для обробки невеликих деталей із різних матеріалів у лабораторних, навчальних або дослідницьких умовах. Їх характерними ознаками є компактність, невелика маса, простота в обслуговуванні та можливість використання недорогих вузлів і систем керування.

Основними компонентами таких верстатів є:

- несуча рама (станина), що забезпечує жорсткість і точність взаємного розташування вузлів;

- портал або колонна частина, на якій розміщуються напрямні осей X, Y, Z;
- шпindelний вузол, який здійснює головний рух різання;
- приводи подач, що забезпечують переміщення інструмента або столу;
- система керування (ЧПК), що формує керуючі сигнали для координатних приводів і шпинделя.

Для підвищення жорсткості та зменшення габаритів сучасні настільні верстати все частіше будуються за принципами просторових каркасних конструкцій, що дозволяють рівномірно розподіляти навантаження між елементами рами.

Відповідно до класифікації, запропонованої проф. Кузнєцовим Ю.М. [20], несучі системи верстатів можуть бути поділені на каркасні (багатогранні) та оболонкові.



Рисунок 1.4 – Класифікація несучих систем верстатів [20]

Каркасні системи будуються за принципом багатогранних тіл (тетраедр, куб, октаедр, ікосаедр тощо) або їхніх пірамідальних та призмових похідних.

Оболонкові системи формуються на основі конічних, циліндричних чи сферичних поверхонь (наприклад, стійки з коробчастим перерізом, станини типу «U» або «C»).

Для малогабаритних настільних фрезерних верстатів найбільш поширеними є каркасні кубічні та пірамідальні компоновки.

Кубічна структура, що належить до призматичних форм, характеризується простотою виготовлення, симетричністю й достатньою жорсткістю при малих габаритах.

Як показують дослідження проф. Кузнецова Ю.М. та інших авторів [20], жорсткість конструкції визначається не стільки масою, скільки формою і силовою структурою рами.

Кубічна схема має раціональне співвідношення простоти виготовлення до жорсткості, а всі силові контури у ній утворюють замкнуті прямокутні або квадратні петлі, що дозволяє легко забезпечити паралельність осей і мінімізувати деформації при невеликих навантаженнях.

Свердлильно-фрезерні верстати є невід'ємною частиною сучасного обладнання в різних галузях промисловості, будівництва та ремонту. Важливим аспектом їх функціонування є їх розміри та конструкція, які можуть бути малогабаритними або мобільними, що дозволяє забезпечити високу маневреність і зручність у роботі.

На сьогоднішній день можна зустріти настільні фрезерні верстати з наступними схемами компоновання:

Вертикальна компоновка (рис. 1.5). У цій схемі верстат має вертикальну колонку, на якій розташований шпиндель зі свердлом або фрезою. Такі верстати обладнані рухомим хрестовим столом з Т-подібними пазами для установки і закріплення заготовки, лещат або іншого пристосування.

Ця схема забезпечує компактність, стабільність і точність обробки. Вертикальні верстати добре підходять для свердління отворів або фрезерування на вертикальних поверхнях. Робоча зона може бути обмеженою, що робить його менш підходящим для обробки великих деталей.



Рисунок 1.5 – Фрезерний верстат JET JMD-X1L [32]

Портальна компоновка. Це тип конструкції верстатів, де шпиндель рухається вздовж порталу (рами), що підтримує горизонтальний рух вздовж осей X та Y.

Ця схема дозволяє забезпечити великий робочий простір і високу точність обробки великих деталей. Верстати такого типу можуть бути з рухомим порталом (рис 1.6) або з рухомим столом (рис. 1.7). Кожен з цих варіантів має свої особливості та застосування в обробці матеріалів.



Рисунок 1.6 – CNC Router of the High-Z T-Series [3]

У верстаті з рухомим порталом робочий інструмент (наприклад, фреза або інший різальний інструмент) рухається вздовж горизонтальних напрямків на порталній конструкції, яка підтримує його рух.

Портал має великі розміри і дозволяє обробляти великі деталі або великі робочі області.

У верстатах з рухомим столом робочий інструмент розташований на жорсткому порталі, а робочий стіл, на якому розташовані оброблювані деталі, рухається вздовж горизонтальних напрямків.

Рухомий стіл дозволяє легко позиціонувати та обробляти деталі, а портал забезпечує стабільну підтримку робочого інструмента.

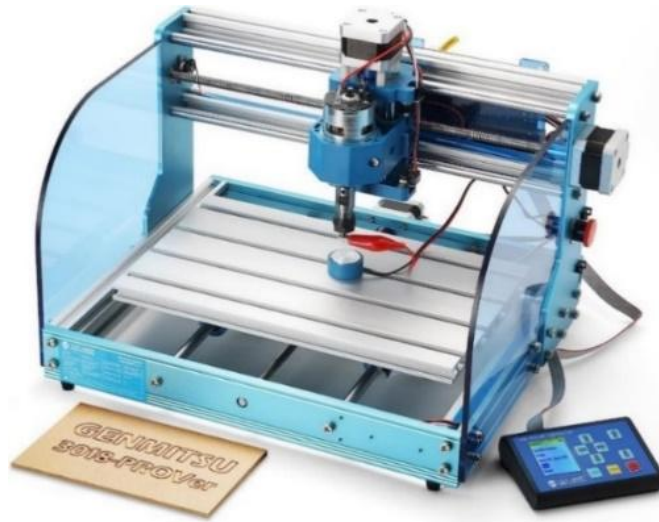


Рисунок 1.7 – SainSmart Genmitsu 3018-PROVer [1]

Малогабаритні свердлильно-фрезерні верстати відзначаються мобільністю, оскільки їх легко переміщувати, роблячи їх ідеальними для невеликих майстерень або гаражів. Вони також вражають універсальністю, здатністю виконувати різноманітні види обробки, включаючи свердління, фрезерування, різання та інші операції, та при цьому вони компактні, що робить їх ідеальними для обмежених просторів.

Їхня конструкція і мобільність залежать від конкретних потреб та завдань. Розглянуті схеми та особливості дозволяють вибрати найбільш підходящий верстат для конкретної ситуації.

1.4. Агрегатно-модульний принцип побудови малогабаритних фрезерних верстатів з ЧПК

Агрегатно-модульний принцип побудови малогабаритних фрезерних верстатів з системами числового програмного керування (ЧПК) є важливим напрямком у сучасному верстатобудуванні. Цей підхід передбачає розділення верстата на окремі функціональні модулі та агрегати, що дозволяє підвищити ефективність, зручність обслуговування та масштабованість таких систем.

Для створення малогабаритного фрезерного верстату, застосування агрегатно-модульного принципу може бути дуже корисним, оскільки цей підхід дозволяє створити ефективне обладнання, що відповідає конкретним потребам користувача та може бути легко модифіковано та покращено з відносно малою собівартістю.

Агрегатно-модульний принцип передбачає використання повторюваних модулів і агрегатів для створення різних конфігурацій верстату, в залежності від конкретних потреб і завдань. Цей підхід дозволяє досягти великої гнучкості і адаптивності виробництва, полегшуючи модифікацію, удосконалення та обслуговування обладнання.

Агрегативання - це метод компонування технологічного обладнання (незалежно від його технологічного і функціонального призначення) з ряду уніфікованих самодіючих вузлів різних типорозмірів, що мають розмірну чи функціональну взаємозамінність [12].

Модулем називають повторюваний уніфікований вузол, що виконує самостійну функцію в різного роду технічних системах. На відміну від агрегативання модульний принцип передбачає застосування в одній і тій же технічній системі кількох повторюваних вузлів або частин, у даному випадку названих модулями [12].

При побудові технологічного обладнання за принципом агрегативання дотримуються двох основних положень [12]:

1. Обладнання повинне створюватися з окремих самостійних вузлів, що мають однозначне функціональне призначення, при цьому вони повинні бути автономними як енергетично, так і конструктивно. При цьому агрегатні вузли використовують елементи його несучої системи: станини, стойки та кронштейни.

2. Уніфіковані вузли не повинні виконувати функції суміжних вузлів, що значно підвищує гнучкість компоновальних рішень технологічного обладнання як системи.

За цим принципом побудований об'єкт модернізації – малогабаритний фрезерний верстат порталного компоновання НФПФЗ-01 (рис. 1.8) [30].

Верстат складається з різних модулів, які спільно працюють для досягнення його функціональності і ефективності. Робочий стіл служить платформою для розташування на ньому заготовки, пристосування та кріплення інших вузлів верстата.

Модулі лінійного переміщення, що складаються з кульково-гвинтових передач, пружної муфти, крокового двигуна та направляючого вала. Цей модуль забезпечує рух вздовж осей X, Y та Z для точного позиціонування і руху інструменту.

Мотор-шпиндель відповідає за головний рух верстата – обертання інструменту. Контролер – невід'ємна частина будь-якого верстата з ЧПК, що забезпечує взаємодію верстату з комп'ютерною системою керування, яка управляє операціями верстату. Використання модульного принципу проектування малогабаритного обладнання має свої важливі переваги. Модульний підхід дозволяє створювати компактні технічні рішення, які ідеально відповідають конкретним вимогам, при цьому уникати зайвих функцій та забезпечувати максимальну функціональність при обмежених габаритах.

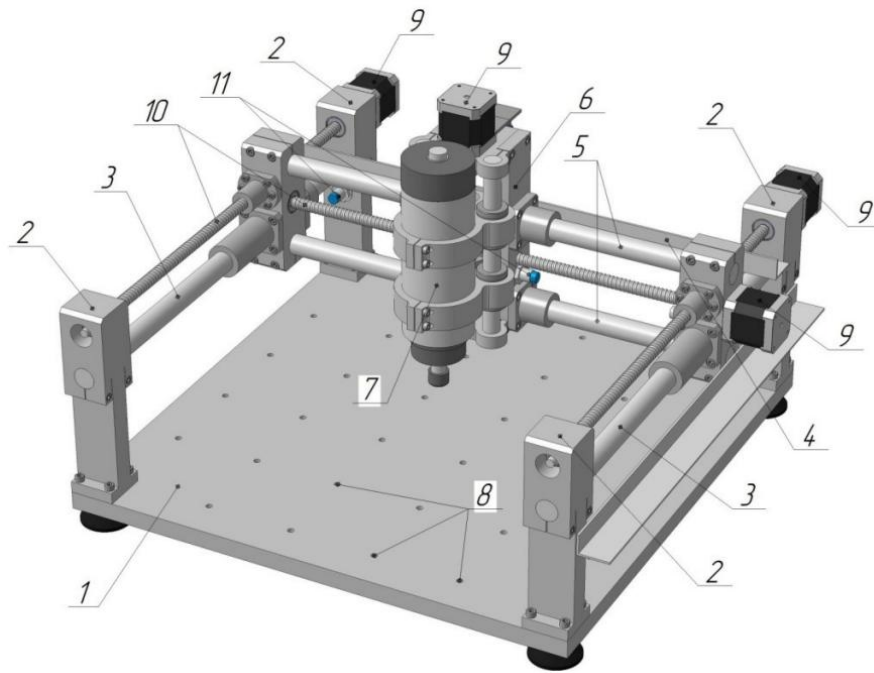


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд верстату НФПФ3-01 [30].

Однією з ключових переваг є можливість швидкого і легкого збирання та модифікації малогабаритного обладнання, таким чином скорочуючи час і витрати на розробку. Модульний підхід сприяє використанню вже створених та перевічених модулів, що підвищує надійність та знижує ризик неполадок.

Зменшення різноманітності конструкцій модулів і компонентів сприяє покращенню умов обслуговування та ремонту малогабаритного обладнання. Модульний підхід дає можливість створювати високоефективне обладнання, спеціально призначене для обмежених місць та ресурсів, забезпечуючи раціональне використання простору та матеріалу. Такий підхід відкриває нові можливості для розвитку та покращення малогабаритного обладнання, допомагаючи оптимізувати його функціональність та надійність.

Таким чином, можна виділити основні положення, що характеризують модульний принцип проектування і виготовлення технологічного обладнання [12]:

- модуль це конструктивно і функціонально закінчена одиниця, що є складовою частиною загальної системи технологічного обладнання;

- модулі характеризуються найменшим можливим числом зв'язків для приєднання до них нових модулів (приєднувальні елементи повинні бути уніфікованими);

- обмежена номенклатура модулів повинна забезпечувати безліч різних компонок технологічного обладнання шляхом різноманіття сполучень і положень модулів;

- модульний принцип проектування технологічного обладнання найбільше повно відповідає вимогам вирішення конкретної технологічної задачі (створене на модульному принципі технологічне обладнання не має надлишкових функцій, і тому воно повинно бути економічніше технологічного обладнання з універсальними можливостями);

- скорочується час і трудомісткість проектування технологічного обладнання, оскільки модульний принцип дозволяє більш повно використовувати виконані раніше розробки;

- збільшується надійність роботи технологічного обладнання за рахунок відпрацьованості модулів і найбільшої відповідності даної конструкції модулів виконуваний задачі;

- зменшення різноманітності конструкцій модулів і складових їхніх елементів поліпшує умови експлуатації і ремонтоздатності;

-модульне проектування дозволяє створювати нове високопродуктивне технологічне обладнання для найкращої обробки заготовок, а не підганяти процес під можливості вже наявного обладнання; модульний принцип дає реальну можливість замінити застарілі форми і методи проектування нових конструкцій технологічного обладнання та його систем.

1.5. Аналіз раніше проведених досліджень по малогабаритним верстатам

Проблематика створення малогабаритних фрезерних верстатів, зокрема настільних систем, привертає значну увагу науковців і конструкторів у зв'язку з

постійною потребою у компактному, високоточному та універсальному обладнанні для навчальних, дослідницьких і виробничих цілей. Малогабаритні верстати дають змогу реалізувати повноцінні процеси механічної обробки в умовах обмеженого простору та при мінімальних енергетичних витратах.

Одним із провідних напрямів сучасних досліджень у цій галузі є оптимізація конструкцій настільних фрезерних верстатів за критеріями жорсткості, точності, вібраційної стабільності та простоти виготовлення. Особливу увагу приділяють питанням компонування несучих систем, вибору типу кінематики, а також розробці модульних конструкцій, що дозволяють уніфікувати окремі вузли та зменшити вартість виготовлення.

Вагомий внесок у розвиток цього напрямку зроблено в науковій школі кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "КПІ імені Ігоря Сікорського", зокрема в дослідженнях Степаненка Олександра Олександровича [29], який у своїй дисертаційній роботі системно розглянув проблематику проектування малогабаритних фрезерних верстатів.

У дослідженнях Степаненка О.О. запропоновано застосування системно-морфологічного багаторівневого синтезу як методологічної основи для проектування конструкцій верстатів. Такий підхід дозволяє формувати множину раціональних конструктивних рішень на основі формалізованого аналізу параметрів і взаємозв'язків між компонентами верстата. У роботі визначено принципи побудови каркасних і оболонкових несучих систем, які забезпечують оптимальне співвідношення маси, жорсткості та віброакустичних характеристик.

Особливу увагу дослідник приділив застосуванню модульного принципу побудови (МПС), який передбачає уніфікацію елементів лінійних і поворотних модулів, що дозволяє створювати різні типи верстатів на основі одних і тих самих базових компонентів. Це відкриває можливість швидкої реконфігурації обладнання під різні технологічні завдання без повного перепроектування.

У межах реалізації концепції каркасних компонок розроблено нову конструкцію модуля лінійного переміщення, який має підвищену жорсткість і точність позиціонування при мінімальній масі рухомих частин (рис. 1.9).

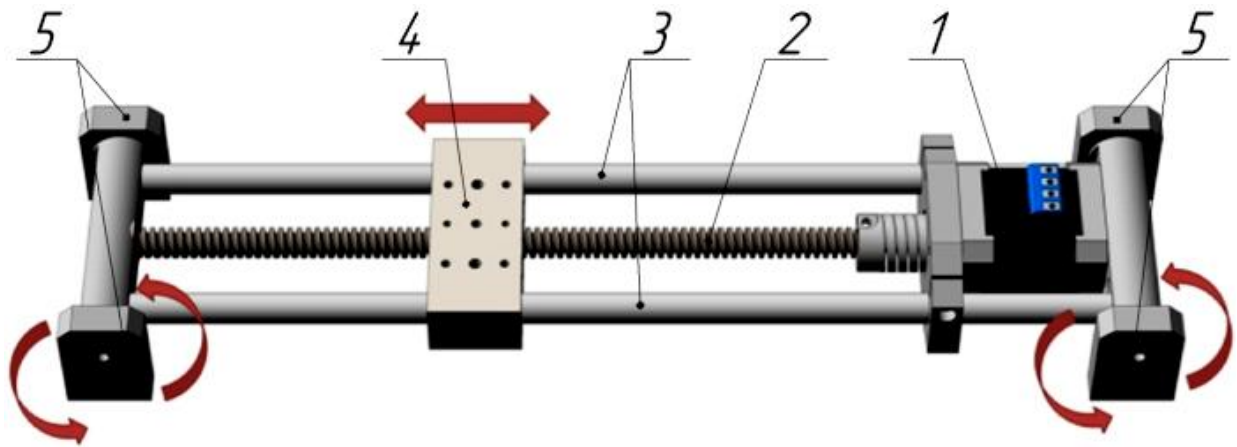


Рисунок 1.9 – Модуль лінійного переміщення [29]

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження точності такого модуля, за результатами яких встановлено залежність похибки позиціонування робочого органу від частоти обертання двигуна (рис. 1.10). Отримані дані дали змогу визначити оптимальні параметри приводу та підвищити точність системи при високих швидкостях подачі.

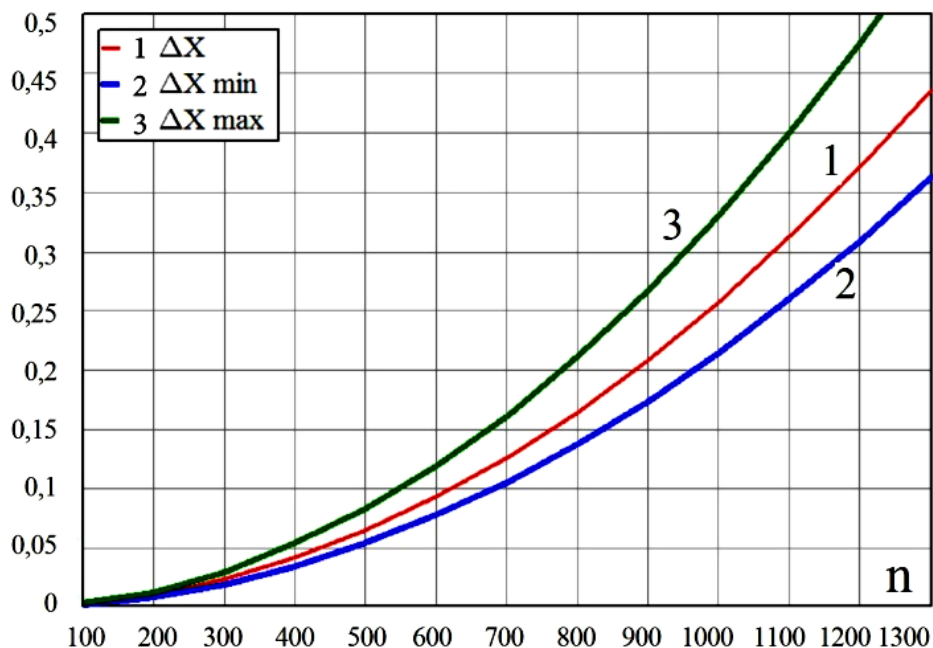


Рисунок 1.10 - Залежність похибки позиціонування (ΔX) від частоти обертів двигуна (n) [29]

На основі виконаного морфологічного синтезу Степаненком О.О. було сформовано низку нових компоновок малогабаритних фрезерних верстатів, серед яких виділяються такі типи: хрестові столи, порталні схеми, біглайд- і триглайд-механізми з паралельною кінематикою, пірамідальні тетраглайди, а також консольні та комбіновані компоновки (рис. 1.11). Усі запропоновані варіанти були реалізовані у вигляді діючих макетів і експериментальних установок з комп'ютерним керуванням, що підтвердило ефективність розроблених підходів.

У ході досліджень також було розроблено критерії вибору раціональних компоновок малогабаритних верстатів за групами параметрів: технологічні можливості, конструктивна простота, точність, масо-габаритні показники, жорсткість і вартість. На основі багатокритеріальної оцінки визначено, що найбільш перспективними для настільних систем є порталні конструкції з модульною побудовою та застосуванням композитних або алюмінієвих каркасів.

Окрім праць Степаненка О.О., значний внесок у розвиток малогабаритного верстатобудування зроблено іншими вітчизняними та зарубіжними дослідниками, які зосередили увагу на вдосконаленні конструкцій, підвищенні точності позиціонування та впровадженні сучасних систем числового програмного керування.

В Україні питаннями створення компактних верстатів із ЧПК окрім КПІ ім. Ігоря Сікорського займаються фахівці Харківського національного технічного університету «ХПІ» та Національного університету «Львівська політехніка». Їхні дослідження спрямовані на підвищення жорсткості порталних систем, оптимізацію вузлів подачі на основі кульково-гвинтових передач, а також розробку інтелектуальних систем контролю переміщень із використанням датчиків положення та мікропроцесорних контролерів [18, 14]. У наукових публікаціях [10] розглянуто можливість використання адитивних технологій для виготовлення елементів корпусів малогабаритних верстатів, що дозволяє зменшити масу конструкції та спростити виготовлення дрібносерійних моделей.

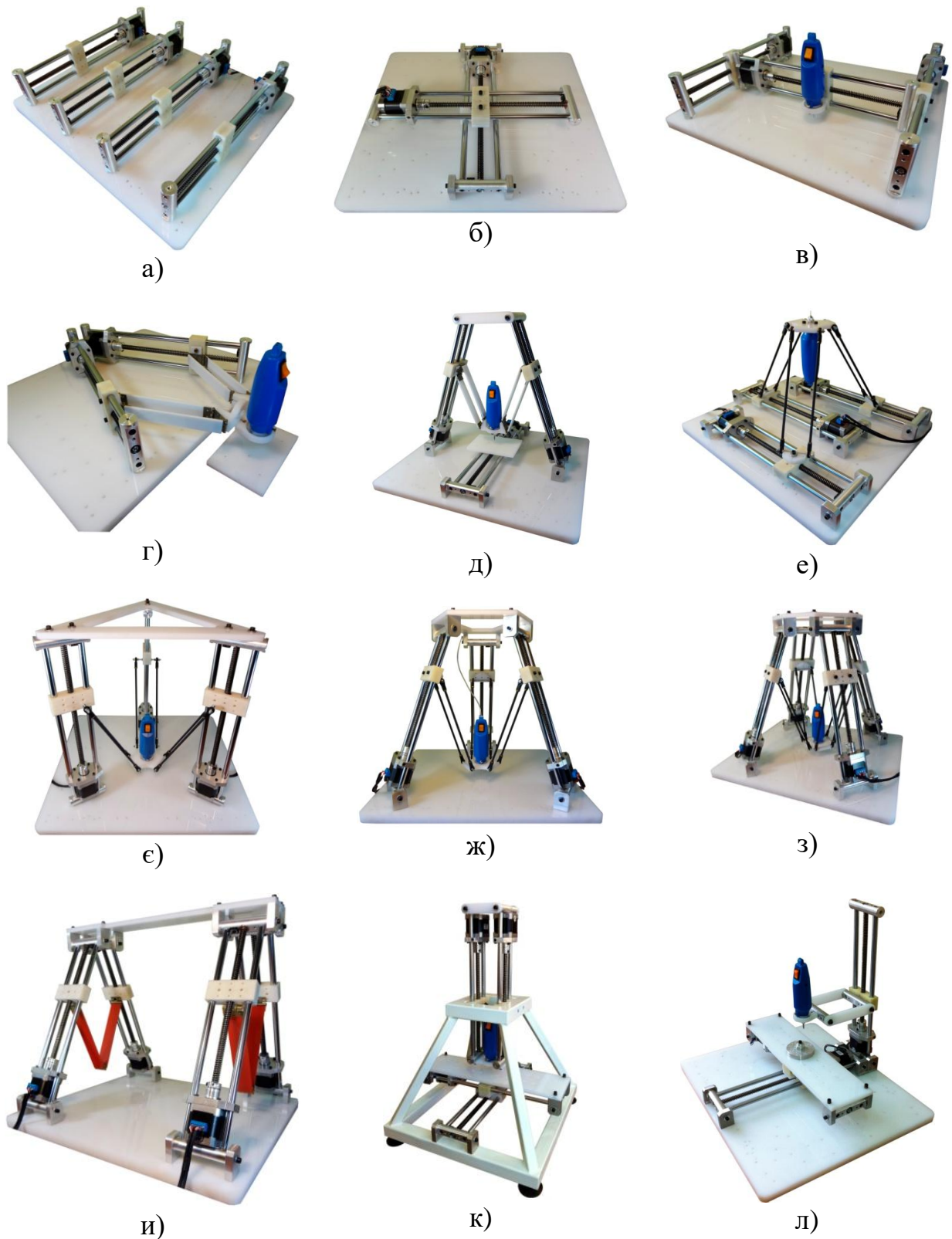


Рисунок 1.11 – Запропоновані діючі моделі малогабаритних верстатів з комп'ютерним керуванням та їх модулі: а) модулі лінійного переміщення, б) хрестовий стіл, в) портал, г) біглайд горизонтальний, ж) триглайд пірамідальний, з) тетраглайд пірамідальний, и) бігліди спарені клиноподібно, к) верстат пірамідальний без МПС, л) верстат консольний [29]

Серед зарубіжних досліджень значний інтерес викликають роботи, присвячені малогабаритним системам із паралельною кінематикою, які забезпечують високу швидкість при мінімальних габаритах. У Німеччині (університети Ахена та Штутгарта) проводяться дослідження гексаподних і триподних конструкцій верстатів для мікрообробки, де оптимізовано розташування приводів та опорних вузлів з метою підвищення стабільності при високих прискореннях [29]. Подібні розробки виконуються у дослідницьких центрах Fraunhofer IPT та RWTH Aachen University, де створено високоточний Parallel Kinematic Micro Milling Machine для обробки металів і кераміки [5].

У Швейцарії (ETH Zurich) і Японії (Tokyo Institute of Technology) активно розробляються мікрофрезерні центри з п'єзоелектричними приводами, здатні забезпечити точність переміщення до 1 мкм. Результати цих робіт наведено у публікаціях [7, 6,], де обґрунтовано застосування сенсорних систем зворотного зв'язку для компенсації похибок у реальному часі.

У США (Massachusetts Institute of Technology, Georgia Institute of Technology) проводяться дослідження в напрямку адаптивного керування малогабаритними верстатами із використанням технологій машинного навчання. Ці системи дозволяють створювати цифрові двійники (Digital Twin) верстатів та прогнозувати стан вузлів під час експлуатації [11, 8].

У країнах Азії, зокрема Китаї, Південній Кореї та Сінгапурі, розробляються настільні фрезерні верстати для навчальних і лабораторних цілей, які керуються через бездротові інтерфейси Wi-Fi або Bluetooth. Такі системи активно впроваджуються у рамках концепції Smart Factory і відповідають вимогам Індустрії 4.0 [8**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Отже, проведений аналіз свідчить, що сучасні дослідження у галузі малогабаритного верстатобудування орієнтовані на створення інтелектуальних, енергоефективних і модульних систем. Використання цифрових технологій, сенсорного контролю, бездротових засобів комунікації визначає сучасні тенденції розвитку настільних фрезерних верстатів портального типу, що підтверджує актуальність тематики даної магістерської роботи.

1.6. Мета і задачі магістерської дисертації

Метою магістерської дисертації є створення та дослідження настільного фрезерного верстата порталного компонування, що забезпечує підвищену жорсткість, точність та функціональність при збереженні компактності конструкції, а також обґрунтування технічних рішень щодо системи керування, приводів та несучої структури на основі інженерних розрахунків і чисельного моделювання.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз сучасного стану малогабаритних фрезерних верстатів, визначити актуальні технічні тенденції та особливості їх конструкцій.
2. Провести дослідження схем компонування малогабаритних фрезерних верстатів та обґрунтувати вибір порталного компонування для настільної конструкції.
3. Розробити конструкцію удосконаленого настільного фрезерного верстата.
4. Обґрунтувати вибір системи приводів координатних переміщень.
5. Обрати та налаштувати систему керування верстатом, включаючи:
 - конфігурацію контролера FluidNC;
 - підключення крокових двигунів, драйверів, кінцевих вимикачів;
 - організацію живлення та аварійної зупинки;
 - реалізацію керування через Wi-Fi та автономну роботу.
6. Виконати розрахунок режимів фрезерування для обраного типу матеріалу та обґрунтувати вибір робочого органу (мотор-шпинделя).
7. Побудувати розрахункову модель пружно-напруженого стану станини та виконати порівняльний аналіз двох компоновок:
 - замкненої кубічної;
 - U-подібної відкритої.
8. Провести моделювання та аналіз результатів методом скінченних елементів, зробити висновки щодо оптимальної геометрії несучої частини.

9. Розробити та продемонструвати процес підготовки керуючої програми, включаючи експорт G-коду та запуск обробки через веб-інтерфейс FluidNC.
10. Розробити лабораторну роботу для дослідження параметрів настільного фрезерного верстата з ЧПК.
11. Виконати вартісну оцінку виготовлення удосконаленого зразка, визначити структуру витрат та економічну доцільність конструкції.
12. Сформулювати рекомендації щодо подальшого удосконалення верстата, включаючи можливість встановлення СОЖ, збільшення потужності шпинделя та інтеграцію 4-ї осі.

2. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Напрямки удосконалення настільного фрезерного верстата порталного компонування і пошук комплектуючих

Удосконалення настільних фрезерних верстатів порталного типу передбачає комплекс заходів, спрямованих на підвищення точності, жорсткості, енергоефективності та технологічної гнучкості обладнання при збереженні його компактності й зручності експлуатації. Такі верстати займають проміжну позицію між промисловими системами та навчально-дослідними або аматорськими установками, що зумовлює особливі вимоги до їх конструкції, матеріалів і систем керування.

Основним завданням при вдосконаленні настільного фрезерного верстата є забезпечення максимальної жорсткості порталної конструкції при мінімальній масі. Для цього пропонується застосування алюмінієвих екструзійних профілів типу V-slot, які мають високу геометричну стабільність і дозволяють легко інтегрувати напрямні, лінійні підшипники та вузли кріплення. Використання модульної профільної системи забезпечує простоту складання, можливість подальшої модернізації та зручність сервісного обслуговування.

Для покращення точності переміщень осей X, Y та Z доцільно застосовувати гвинтові пари типу КГП (кулькові гвинт-гайка), які забезпечують мінімальний люфт і стабільне передавання руху при високій повторюваності позиціонування. Лінійні напрямні типу SBR вибрано як оптимальний компроміс між вартістю та показниками навантажувальної здатності. Вони забезпечують плавний хід рухомих вузлів і знижують вібрації під час обробки.

З метою зменшення маси рухомих частин та зниження інерційних навантажень пропонується застосування крокових електродвигунів NEMA 23, які мають достатній крутний момент для настільних систем і добре сумісні з системами керування на базі контролера ESP32 з прошивкою FluidNC. Це дозволяє реалізувати керування по Wi-Fi, що розширює функціональні

можливості верстата і забезпечує дистанційне управління з комп'ютера або смартфона.

Для покращення умов експлуатації та підвищення чистоти робочої зони конструкцією передбачено металевий піддон із системою зливу СОЖ (системи охолодження й змащування). Наявність піддону дозволяє зібрати стружку та охолоджувальну рідину, запобігаючи забрудненню робочого столу та електронних компонентів.

Одним із напрямів розвитку є розширення функціональності робочого органу. Передбачено можливість ручної заміни між мотор-шпинделем і лазерною головкою, що забезпечує універсальність обладнання та дозволяє виконувати як фрезерні, так і гравірувальні операції. Це рішення відповідає сучасним тенденціям багатofункціональності та модульності настільних верстатів.

Додатково передбачена опційна установка четвертої осі (A) (рис. 2.1), що дозволяє виконувати циліндричну обробку або позиційне фрезерування на обертових деталях. Використання компактного роторного приводу з редуктором підвищує технологічну гнучкість системи без суттєвого збільшення її габаритів.

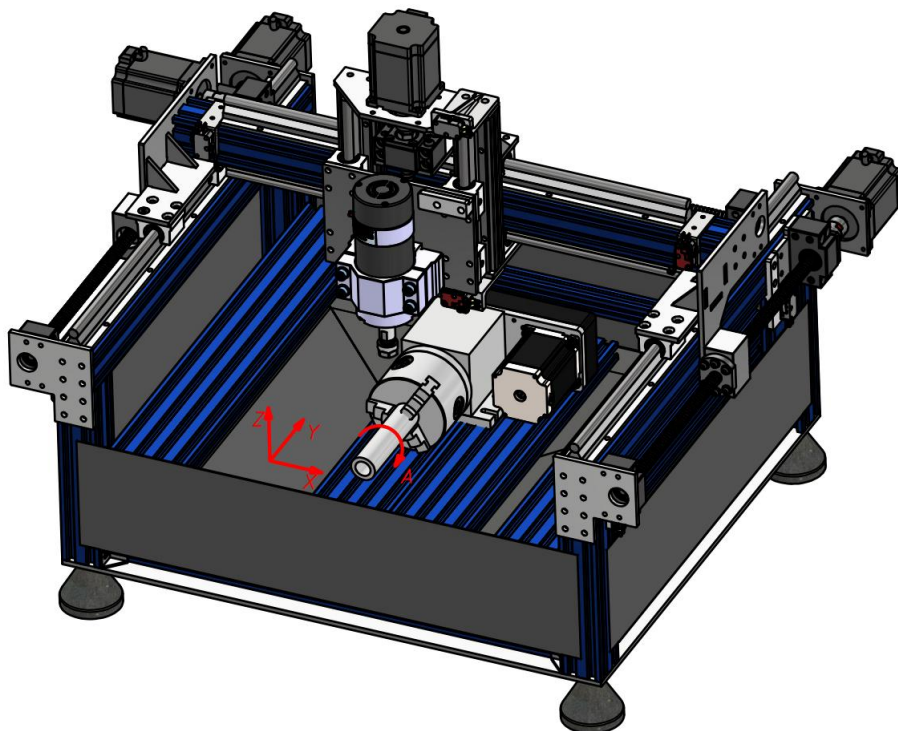


Рисунок 2.1 – Розширена система координат верстата

Серед напрямків вдосконалення даного базового верстату можна виділити спрощення конструкції за рахунок використання верстатного алюмінієвого профілю V-slot, застосування покупних комплектуючих для простої взаємозамінності і уніфікації. Основною метою модернізації верстату в даному проекті є забезпечення багатofункціональності цієї машини. Це реалізується за допомогою універсальних кріплень мотор-шпинделя і лазерної головки.

В якості приводу головного руху буде застосовуватись мотор-шпиндель від компанії Stack. Даний виробник пропонує ряд моделей шпинделів потужністю 200-500 Вт і частотою обертання 3000-12000 об/хв (рис. 2.2). Для кріплення шпинделя застосовується спеціальний хомут-кронштейн, що підходить для усього модельного ряду даних мотор-шпинделів.



Рисунок 2.2 – Мотор-шпиндель з повітряним охолодженням [35]

Функціонал верстату може розширити лазерна головка LT-40W-A-Gold потужністю 40 Вт (рис. 2.3). Наявність цього модуля дозволить виконувати лазерне гравіювання різних матеріалів, таких як нержавіюча сталь, мідь, алюміній, деревина, шкіра, пластик і багато інших.



Рисунок 2.3 – Лазерний модуль LT-40W-A-Gold [27]

Наявність четвертої осі на фрезерному верстаті з ЧПК надає можливість створювати складніші геометричні форми і реалізовувати складні операції фрезерування, такі як обробка з багатьох сторін. Четверта вісь може бути особливо корисною для фрезерування деталей, які мають складні форми або потребують обробки з різних кутів. Вона розширює можливості верстату, забезпечуючи більшу гнучкість і точність при роботі з матеріалами.

В даному проекті в якості четвертої осі буде застосовано поворотна вісь з ремінною передачею 1:4 з приводом від крокового двигуна (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Поворотна вісь з ремінною передачею [26]

У процесі різання виникають вібрації інструмента, заготовки й верстата. Причини вібрацій: коливання дії сил опору металу різанню в процесі сколювання елементів стружки; нерівномірний припуск на обробку; зовнішні коливання, що передаються через фундамент від інших машин, які працюють поблизу верстата.

Вібрації заважають нормальній роботі верстата, знижують стійкість інструмента, погіршують якість обробки, прискорюють спрацювання деталей верстата, порушують безпеку праці. Тому це є суттєвим недоліком даного верстата, що впливає на точність обробки.

Для вирішення цієї проблеми необхідно встановити верстат на віброопори. Чудовим рішенням є віброопора OB-60 GB PRO (рис. 2.5) від компанії «GB TRADE» [13], що є українським виробником промислових деталей і запчастин для машинобудування.



Рисунок 2.5 – Віброопора верстатна OB-60 GB PRO [13]

Підсумовуючи, напрямки вдосконалення настільного фрезерного верстата порталного компонування включають:

- підвищення жорсткості порталу при мінімальній масі конструкції;
- впровадження точних систем подачі (ШВП, лінійні напрямні);
- модернізацію електронної частини із реалізацією бездротового керування;
- розширення функціональності за рахунок змінних робочих органів;
- удосконалення ергономіки та умов експлуатації;
- підвищення ремонтпридатності та модульності конструкції.

Таким чином, проведені дослідження та аналіз комплектуючих дозволяють сформулювати сучасну, технологічно гнучку та економічно доцільну конструкцію настільного фрезерного верстата порталного типу, придатну для виконання широкого спектра навчальних, дослідницьких і виробничих завдань.

2.2. Конструктивні особливості і технічна характеристика удосконаленого настільного фрезерного верстата порталного компонування

Після ретельного аналізу значного обсягу даних, патентного дослідження подібних верстатів та детального вивчення їх конструкції, розпочато конструювання удосконаленого фрезерного верстата порталного компонування (рис. 2.6).

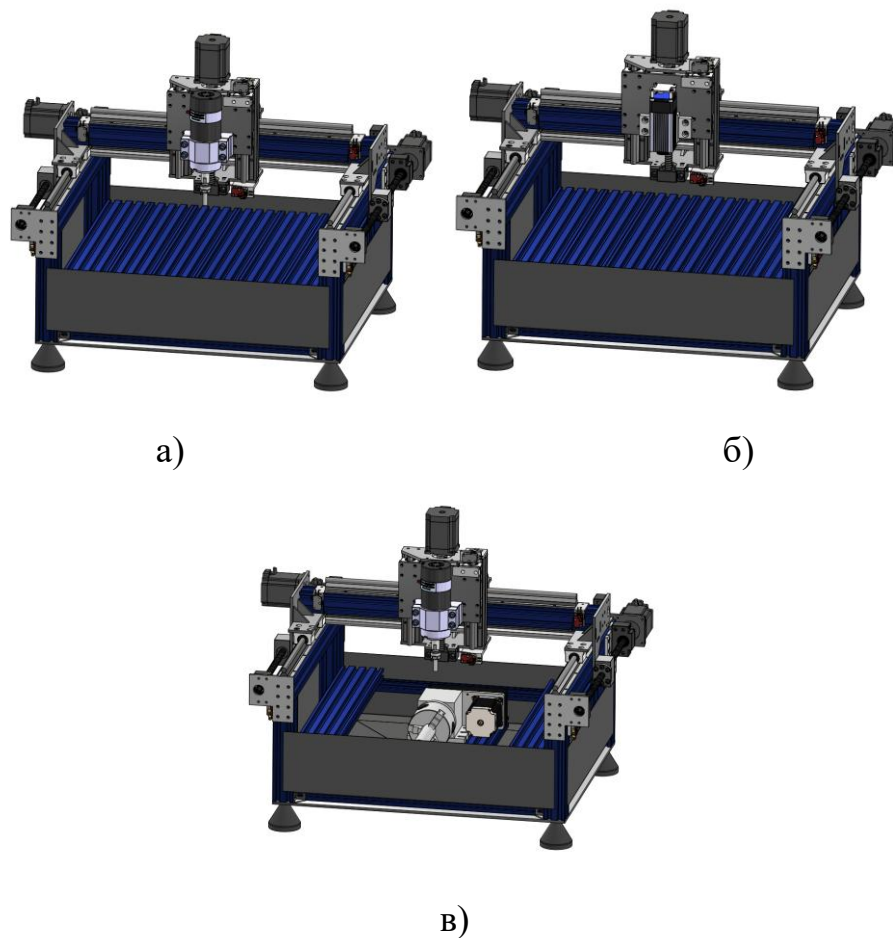


Рисунок 2.6 – Модернізований верстат:
а) - фрезерний верстат; б) - лазерний верстат; в) - фрезерний 4-х координатний верстат

Удосконалений настільний фрезерний верстат порталного компонування розроблений з метою підвищення технологічної гнучкості, зручності експлуатації та ремонтпридатності при збереженні компактних габаритів і високої точності обробки. Основою конструкції є жорстка просторово-рамна структура, яка забезпечує стабільність геометрії під час роботи, а також можливість виконання фрезерних і гравірувальних операцій у трьох координатних осях із подальшим розширенням функціональності до чотирьох осей.

Несуча рама верстата виконана з верстатного алюмінієвого профілю типу V-slot, який є одним із найпоширеніших стандартів у малогабаритному машинобудуванні. Така система побудови має низку переваг: по-перше, це модульність, що дозволяє змінювати або доповнювати конструкцію без переробки всієї рами; по-друге, економічність і ремонтпридатність, оскільки елементи V-slot мають уніфіковані геометричні розміри та доступні на ринку як готові вироби. У разі поломки або деформації будь-якої секції її можна швидко замінити без демонтажу всієї конструкції, що істотно спрощує технічне обслуговування.

З'єднання елементів рами здійснюється за допомогою стандартних кутових з'єднувачів і болтових з'єднань, які забезпечують надійне фіксування елементів та точне взаємне позиціонування. Усі стики можуть бути відрегульовані після складання.

Особливістю конструкції удосконаленого верстата є наявність двох робочих столів, розташованих на різних рівнях.

- Верхній стіл призначений для обробки листових матеріалів, пластмас і малогабаритних деталей. Він утворений з кількох паралельно встановлених профілів V-slot 20×80 мм, що утворюють рівну опорну поверхню з можливістю фіксації заготовок у будь-якому місці за допомогою T-пазів.
- Нижній стіл виконує функцію базової платформи для встановлення верстатного оснащення – наприклад, ділильної головки, поворотного

столу або машинних лещат. Завдяки цьому верстат може виконувати обробку більш масивних і габаритних деталей без втрати точності позиціонування.

Така дворівнева компоновка забезпечує гнучкість використання обладнання при малому ході шпинделя вздовж осі Z. Для переходу до роботи з нижнім столом передбачено знімні центральні секції верхнього столу – оскільки його поверхня складається з кількох профілів V-slot, демонтаж кількох елементів не викликає труднощів і не потребує спеціального інструменту. Таким чином, користувач має змогу швидко змінити конфігурацію робочої зони під різні завдання.

Переміщення рухомих вузлів здійснюється по лінійних напрямних типу SBR (рис. 2.7), які відрізняються підвищеною жорсткістю і несучою здатністю порівняно зі звичайними круглими напрямними. Профіль напрямної має циліндричну форму з інтегрованою опорною рейкою, що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження та зменшує згинальні деформації під час роботи. Використання кареток SBR10UU забезпечує плавний хід, низький рівень вібрацій і зменшення зносу вузлів. Крім того, відкритий тип напрямних полегшує очищення від стружки та змащення, що особливо важливо для настільних верстатів із ручним технічним обслуговуванням.



Рисунок 2.7 – Лінійні напрямні SBR10 [24]

Координатні переміщення по осях X, Y і Z виконуються за допомогою кульково-гвинтових передач (КГП), що забезпечують мінімальний люфт і високу повторюваність позиціонування. Застосування звичайної передачі гвинт-гайка ковзання для такого типу обладнання є недоцільним, оскільки під час обробки утворюється значна кількість стружки та пилю, які можуть потрапляти на різьбу, що призводить до швидкого зношування. На відміну від цього, гайка кульково-гвинтової пари має ущільнення та захист від забруднення, що значно підвищує довговічність вузла.

Опори гвинтових пар виконані на базі продукції TBI MOTION (Тайвань) із застосуванням радіально-упорних підшипників виробництва NSK (Японія) (рис. 2.8). Така комбінація забезпечує точне позиціонування, стабільну роботу на високих обертах та мінімальний люфт у гвинтових передачах. Передня опора гвинта має два підшипники з попереднім натягом і затяжною гайкою, що усуває осьове зміщення, а задня – один підшипник плаваючого типу, який компенсує температурні деформації гвинта. Це рішення дозволило суттєво зменшити люфт передачі та покращити точність позиціонування при зміні напрямку руху.



Рисунок 2.8 – Підшипникові опори для передачі гвинт-гайка кочення [17]

Якщо вал КГП з'єднаний безпосередньо з валом крокового двигуна без опор, можливе осьове зміщення гвинта, що призводить до похибок позиціонування. Застосування підшипникових опор повністю усуває цю проблему, зберігаючи жорсткість і стабільність кінематичної схеми.

Портал складається з двох зварних кронштейнів з лінійними підшипниками SBR10UU для забезпечення правного руху вздовж осі Y, між якими встановлена поперечна балка. На балці змонтована каретка осі Z із шпindelним вузлом. Для зменшення маси рухомих частин каретка виконана з алюмінієвої плити. Шпindel потужністю 500 Вт розрахований на швидкість обертання до 12 000 об/хв і має стандартне кріплення Ø52 мм, що дозволяє швидко замінювати його на лазерну головку. Така модульність робочого органу забезпечує виконання різних типів операцій без зміни конструкції верстата.

Після модернізації маса верстата становить приблизно 40 кг, що забезпечує стійкість під час обробки при збереженні можливості розміщення верстата на робочому столі. Збільшено діапазон координатних переміщень, який становить:

- по осі X – 320 мм,
- по осі Y – 320 мм,
- по осі Z – 65 мм.

Це дозволяє обробляти деталі ширшого спектра габаритів і форм, у тому числі корпусні та циліндричні заготовки при встановленні додаткового оснащення.

Привід осі Y реалізовано двома кроковими двигунами, встановленими симетрично по лівій і правій частині станини та з'єднаними з окремими КГП. Система працює в відкритому контурі: обидва драйвери отримують ідентичні сигнали STEP/DIR, тому електронна синхронізація досягається подачею однакових імпульсів на обидва канали. Жодного активного відслідковування положення чи корекції помилок під час руху не виконується, оскільки зворотний зв'язок від двигунів відсутній.

У такій архітектурі ключовим стає правильне «вирівнювання» порталу під час нульового ходу. Для цього використовуються два окремих кінцевих вимикачі (по одному на кожен двигун). Процедура занулення виконується паралельно для обох боків порталу: кожен двигун під'їжджає до свого кінцевика, після спрацювання зупиняється і виконує невеликий відкат для зняття натягу. У результаті балка порталу «квадратується» відносно осі X. Надалі під час робочих

переміщень обидва двигуни отримують однакову кількість імпульсів і продовжують рухатися синхронно, доки не станеться пропуск кроків з будь-якого боку (через перевантаження, надто різке прискорення, ударні навантаження тощо).

Оскільки автоматичної корекції розсинхронізації в ході роботи немає, забезпечення стабільності досягається сукупністю механічних і налашкових заходів:

- Механічна симетрія та жорсткість: однакова довжина і тип КГП, однакові опори (BK/BF), коректне співвісне встановлення напрямних.
- Єдині налаштування каналів: ідентичні значення steps/mm, мікрокроку, струму фази та мікропараметрів драйверів для лівого і правого приводів.
- Консервативні динамічні режими: розумні обмеження прискорення і швидкості подачі, щоб виключити пропуски кроків на піках навантаження (особливо в Z-агресивних режимах різання та при швидких реверсах).
- Чистота і захист приводів: регулярне очищення гвинтів і направляючих, контроль натягу муфт, відсутність заїдань кареток.
- Регулярне реферування: занулення перед кожним новим завданням і після операцій, що могли створити ударні навантаження (грубе ручне переміщення, зіткнення інструмента тощо).

Для підтвердження якості «квадратування» доцільно виконати перевірку паралельності порталу індикатором годинникового типу. Допустимий розбіг фіксується як початкове налаштування й, за потреби, коригується положенням кінцевиків або механічним підстроюванням однієї з опор КГП.

Підсумовуючи, двомоторна вісь Y у відкритому контурі забезпечує необхідну точність і повторюваність для настільного портального верстата за умови правильної процедури автоквадратування порталу під час занулення, симетричної механіки та зважених динамічних налаштувань. Це дає раціональний компроміс між вартістю, складністю і функціональністю без впровадження дорогих сервоприводів або енкодерного зворотного зв'язку.

2.3. Вибір та налаштування системи керування

Система керування є ключовим елементом настільного фрезерного верстата, що забезпечує координовану роботу всіх вузлів і механізмів у процесі обробки. Від правильного вибору її структури та компонентів залежить точність, стабільність і функціональні можливості верстата.

Загалом система керування сучасного ЧПК-верстата виконує такі основні функції:

- приймання та оброблення керуючої програми (G-коду);
- перетворення команд у сигнали керування приводами осей;
- регулювання швидкості обертання шпинделя або потужності лазерного випромінювання;
- контроль положення рухомих елементів за допомогою кінцевих вимикачів;
- забезпечення взаємодії між користувачем і верстатом через інтерфейс керування.

Типова система керування фрезерного верстата включає такі основні складові:

Контролер ЧПК – центральний елемент, що обробляє команди з керуючої програми та формує сигнали для виконавчих механізмів.

Крокові двигуни (NEMA 23) – забезпечують точне позиціонування робочого інструмента по координатах X, Y, Z та обертання деталі навколо осі A.

Драйвери крокових двигунів – проміжна ланка між контролером і приводами, яка перетворює цифрові імпульси (STEP/DIR) у струмові імпульси потрібної величини для керування обмотками двигуна.

Шпиндельний вузол – основний виконавчий орган для фрезерування, швидкість обертання якого регулюється ШІМ-регулятором.

Лазерна головка – додатковий робочий інструмент для гравіювання та різання, керується сигналом PWM для зміни потужності випромінювання.

Кінцеві вимикачі (датчики обмеження ходу) – визначають нульові позиції осей (так званий «нуль верстата»).

Блок живлення – формує необхідні напруги живлення для контролера, драйверів і виконавчих механізмів (24 В).

Інтерфейс користувача – забезпечує зв'язок оператора з системою, дозволяючи завантажувати програми, стежити за координатами та станом верстата.

Захисні елементи та допоміжне обладнання – включають системи охолодження, аварійні вимикачі, реле живлення тощо.

Робота системи керування відбувається за принципом послідовного перетворення даних із програми у фізичні дії механізмів. Контролер зчитує G-код, інтерпретує його та формує послідовність електричних імпульсів для кожної осі. Драйвери крокових двигунів приймають ці імпульси й здійснюють відповідне обертання валів двигунів, що призводить до переміщення інструмента по заданих координатах.

Розберемо кожен елемент системи керування окремо

Вибір контролера системи керування

Основною вимогою до вибору контролера є можливість керувати як мінімум 5 кроковими двигунами, оскільки рух по осі Y здійснюється за допомогою двох крокових двигунів, а не одного (як для інших осей), то необхідно мати на контролері ще один роз'єм.

Для реалізації автоматизованого керування рухом робочих органів настільного фрезерного верстата обрано контролер FluidNC 6x CNC Controller, який підтримує до шести незалежних осей. Ще аргументом за вибір цього контролера є можливість підключення кількох шпинделів і лазерного модуля, що ідеально підходить під цей проект.

керуванні. Для кожного двигуна використовується окремий драйвер моделі DM556, сумісний із сигналами STEP/DIR від контролера FluidNC.

Система забезпечує незалежне керування всіма чотирма осями:

- X, Y, Z – лінійні переміщення робочого органу;
- A – обертальна вісь для обробки циліндричних деталей або позиціонування заготовки під кутом.

Робочим органом фрезерного верстата є мотор-шпиндель постійного струму, який забезпечує обертання ріжучого інструмента з регульованою частотою. Керування швидкістю обертання виконується через регулятор типу WK611.

Для розширення функціональних можливостей верстата додатково встановлено лазерний модуль потужністю 40 Вт. Він використовується для гравіювання та різання неметалевих матеріалів (дерево, фанера, пластик). Регулювання потужності лазера здійснюється за допомогою PWM-сигналу від контролера FluidNC, що дозволяє керувати інтенсивністю випромінювання залежно від швидкості переміщення по траєкторії.

Структурна схема системи керування

Система керування побудована за модульним принципом, де центральним елементом є контролер FluidNC 6х. До нього підключені такі основні вузли:

- Крокові двигуни через драйвери;
- Шпиндель з ШІМ-регулятором;
- Лазерна головка, керована сигналом PWM;
- Кінцеві вимикачі по осях X, Y, Z для калібрування нульових позицій.

Керування здійснюється через веб-інтерфейс FluidNC, що дає змогу завантажувати, запускати й контролювати виконання програм у форматі G-коду дистанційно через ПК або навіть смартфон.

Підключення блоку живлення та силової частини

Подача живлення 220 В здійснюється через тумблер, який виконує функцію головного силового вводу. Після тумблера напруга подається на блок

живлення 24 В постійного струму. Вихідні клеми "+" і "-" використовуються для живлення контролера, драйверів DM556 та лазерної головки.

Силові лінії розводяться окремими кабелями з перерізом, що відповідає струмовим навантаженням, із обов'язковим розділенням силової та сигнальної проводки для уникнення електромагнітних перешкод.

Підключення драйверів крокових двигунів DM556

Кожен драйвер DM556 підключається за стандартною схемою:

- до клем V+ / V– подається живлення 24 В від блока живлення;
- вихідні клеми драйвера A+ A–, B+ B– підключаються до обмоток крокового двигуна відповідно до маркування виробника;
- сигнальні входи PUL+, PUL–, DIR+, DIR– з'єднуються з відповідними виходами контролера FluidNC.

У процесі налаштування приводів координатних переміщень важливим параметром є вибір режиму мікрокроку на драйверах DM556. Мікрокрок визначає кількість імпульсів STEP, необхідних для здійснення одного повного обороту вала крокового двигуна. Зміна мікрокроку впливає на плавність ходу, динаміку, максимальну швидкість і реальну точність системи.

Крокові двигуни моделі 57BYG250C мають базовий крок 1,8°, тобто 200 кроків на оберт. Оскільки в конструкції верстата застосовано кульково-гвинтові передачі з кроком 4 мм, то при повному кроці теоретична подача складає:

$$S = \frac{4}{200} = 0.02 \text{ мм/крок}$$

Таке значення є замалим для плавної подачі та може створювати ривковість руху при низьких швидкостях. Тому застосування мікрокроку є необхідним.

З аналізу можливих режимів DM556 встановлено, що найкращим варіантом є 1600 pulse/rev, що відповідає 1/8 мікрокроку. У цьому режимі один оберт ШВП здійснюється за 1600 імпульсів, а величина лінійного переміщення за один мікрокрок дорівнює:

$$S_{1/8} = \frac{4}{1600} = 0.0025 \frac{\text{мм}}{\text{крок}} = 2,5 \frac{\text{мкм}}{\text{крок}}$$

Така дискретність є значно більшою за реальні можливості механіки порталної конструкції на V-slot та лінійних напрямних SBR, і водночас забезпечує достатню плавність переміщень без зниження моменту двигуна на низьких швидкостях.

Важливо зазначити, що надмірне збільшення мікрокроку (1/16, 1/32, 1/64 і більше) не дає приросту реальної точності, оскільки вона обмежується механо-еластичними властивостями станини та КГП. Натомість надто великий мікрокрок збільшує частоту імпульсів STEP, що створює додаткове навантаження на контролер та знижує доступну максимальну швидкість переміщення осей. Таким чином, мікрокрок 1/8 є найкращим компромісом між плавністю, стабільністю роботи, максимальною швидкістю та навантажувальною здатністю двигуна.

Для встановлення режиму 1600 pulse/rev на драйвері DM556 перемикачі SW5–SW8 мають відповідати комбінації:

SW5 – off

SW6 – off

SW7 – on

SW8 – on

У конфігураційному файлі контролера FluidNC це значення відповідає:

$$\text{steps_per_mm} = \frac{1600}{4} = 400$$

Таким чином отримується стабільна й технічно обґрунтована конфігурація приводів, яка відповідає конструкції та технологічному призначенню верстата.

Окремим етапом конфігурування є правильне встановлення робочого струму на драйвері DM556. Кроковий двигун 57BYG250C має номінальний фазний струм 3,0 А, тому драйвер слід налаштувати на режим, максимально наближений до цього значення. Зниження струму призведе до втрати крутного моменту, підвищеної ймовірності пропусків кроків та нестабільної роботи на високих прискореннях. Завищення струму, навпаки, викликає перегрівання

двигуна, підвищене теплове навантаження на обмотки та зменшення їх ресурсу. Найближчим варіантом є встановлення струму на рівні номіналу – 3,2 А. Для встановлення цього режиму на драйвері DM556 перемикачі SW1–SW3 мають відповідати комбінації:

SW1 – off

SW2 – off

SW3 – on



Рисунок 2.10 – Драйвер DM556

Мотор-шпиндель 500 Вт живиться від окремої лінії, що відгалужується після головного силового тумблера. Живлення шпинделя проходить через окремий тумблер, що дозволяє примусово відключити силову частину незалежно від контролера. Керування швидкістю обертання здійснюється через ШІМ-регулятор.

Лазерна головка підключається за аналогічною структурою: живлення 12...24 В подається через окремий тумблер, що забезпечує повне апаратне

вимкнення лазера. Сигнальний кабель (керуючий вхід PWM) підключається до PWM-виходу контролера.

У складі системи керування важливу роль відіграють органи контролю та захисту, до яких належать кінцеві вимикачі та кнопка аварійної зупинки. Кінцеві вимикачі забезпечують визначення нульових позицій осей і запобігають виходу рухомих вузлів за межі робочої зони. Для кожної осі (X, Y та Z) використовуються по одному кінцевому вимикачу типу “NO/NC”, які під’єднуються до відповідних входів контролера FluidNC. У конфігураційному файлі задається тип контактної логіки (як правило, використовують NC-схему, що забезпечує автоматичне виявлення обриву ланцюга), напрямок руху під час процедур “homing”.

Правильно налаштовані кінцеві вимикачі гарантують коректне позиціонування системи, стабільність процедур калібрування та захист від механічного перевантаження.

Кнопка аварійної зупинки виконує функцію апаратного вимкнення живлення верстата у непередбачених ситуаціях. У даній конструкції вона вмикається послідовно в ланцюг основного живлення блока живлення 24 В, що дозволяє миттєво відключити контролер, драйвери крокових двигунів та периферійні модулі одним натисканням. Електрична схема виконана за принципом нормально замкненого кола (NC), тому розмикання контактів кнопки негайно зупиняє систему навіть у разі обриву проводу або внутрішньої несправності. Аварійна кнопка встановлюється на передній панелі верстата у легкодоступному місці, що відповідає вимогам безпеки роботи з обладнанням з ЧПК.

Загальна спрощена схема підключення електричної частини верстата зображена на рисунку 2.11.

Налаштування системи керування

Конфігурація контролера виконується через текстовий конфігураційний файл `config.yaml`, де задаються основні параметри системи:

- кількість осей та їхні типи;

- крок на міліметр для кожного двигуна;
- прискорення та швидкість переміщення;
- параметри PWM-виходу для керування шпинделем та лазером;
- типи кінцевих вимикачів (NO/NC);
- параметри Wi-Fi-з'єднання.

Після завантаження конфігурації контролер автоматично зчитує параметри при запуску, що дозволяє швидко змінювати характеристики верстата без перепрошивки.

Для калібрування проводиться тестове переміщення осей та вимірювання фактичних відстаней, після чого вносяться корекції у файл конфігурації.

Для правильного функціонування системи створено конфігураційний файл у форматі .yaml, у якому задаються основні параметри кінематики, напрямки обертання двигунів, граничні переміщення, параметри шпинделя та лазерного модуля.

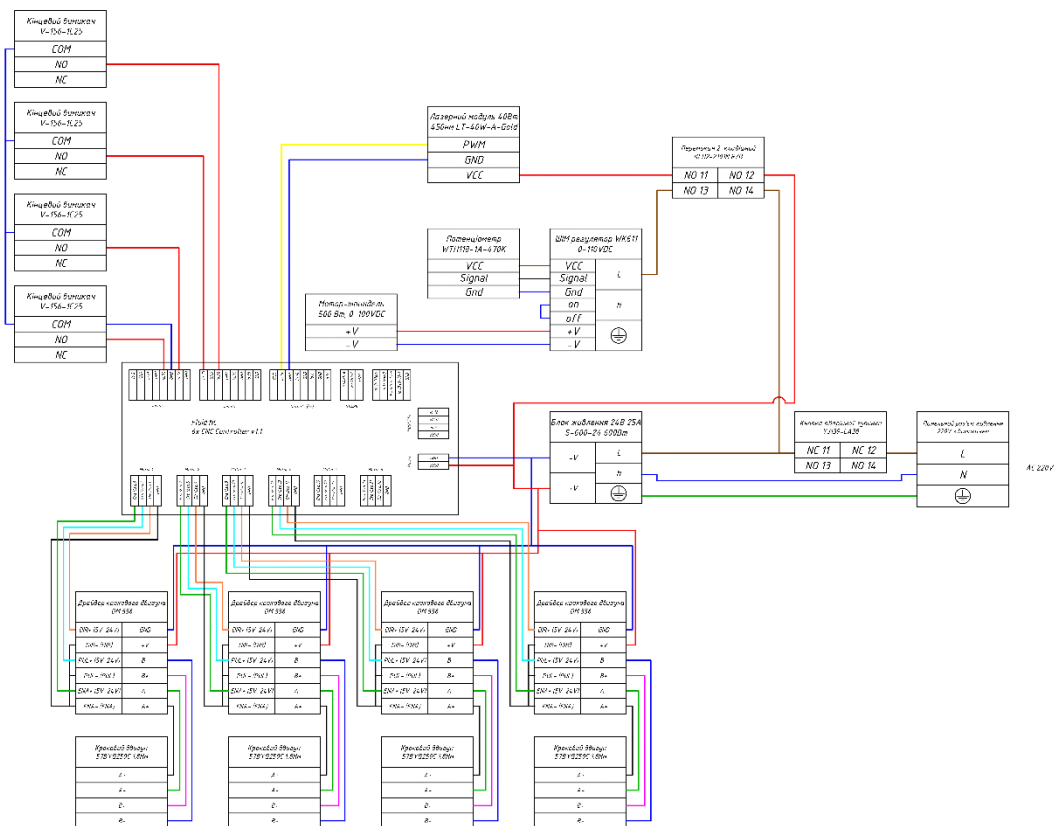


Рисунок 2.11 – Загальна схема підключення елементів верстата

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1. Розрахунок режимів фрезерування

Перед початком розрахунку режимів різання необхідно визначитись з інструментом, яким буде виконуватись обробка. Обрана раніше модель мотор-шпинделя містить в комплекті набір цангових патронів. Це дозволяє закріпити інструменти з хвостовиком діаметром від 1 до 8 мм. Для розрахунку обрано кінцеву фрезу діаметром 8 мм від компанії «Metalorez» [31] (рис. 3.1). Фреза містить 4 ріжучих кромки, що виконані з швидкорізальної сталі Р6М5. Виробник гарантує нормальну роботу з міддю, алюмінієм та іншими легкооброблюваними матеріалами. Отже, розрахунок буду виконувати, враховуючи, що матеріал заготовки – алюміній.



Рисунок 3.1 – Фреза «Metalorez» діаметром 8 мм

Швидкість різання для твердого алюмінію становить 80 – 100 м/хв. Так як максимально можливий діаметр фрези для, яку можна встановити в патрон мотор-шпинделя становить 8 мм то діапазон частот обертання фрези визначається за формулою 3.1:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (3.1)$$

$$n = \frac{1000 \cdot (80 \dots 100)}{\pi \cdot 8} = 3183 \dots 3978 \text{ хв}^{-1}$$

де v – швидкість різання, м/хв;

D – діаметр фрези, мм.

Частота обертання мотор-шпинделя становить 3000-12000 об/хв, отже розрахована частота входить в цей діапазон. Нехай частота обертання фрези буде складати 4000 об/хв. При цій частоті обертання мінімальна швидкість різання становитиме:

$$v_{min} = \frac{\pi \cdot D_{max} \cdot n_{min}}{1000} \quad (3.2)$$

$$v_{min} = \frac{3.14 \cdot 8 \cdot 4000}{1000} = 100,5 \text{ м/хв}$$

де D_{max} – максимальний діаметр фрези, мм;

n_{min} – мінімальна частота обертання фрези, об/хв.

Хвилинну подачу визначаємо за формулою 3.3:

$$S_{хв} = S_z \cdot z \cdot n \quad (3.3)$$

$$S_{хв} = 0.03 \cdot 4 \cdot 4000 = 480 \text{ мм/хв}$$

де S_z – подача на зуб, мм;

z – кількість різальних кромки;

n – частота обертання фрези хв^{-1} .

Головна складова сили різання при фрезеруванні – це колова сила:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{MP} \quad (3.4)$$

де C_p – коефіцієнт;

t – глибина різання, мм;

S_z – подача на зуб, мм;

B – ширина різання, мм;

z – кількість різальних кромки;

D – діаметр фрези, мм;

n – частота обертання фрези, хв^{-1} ;

x, y, u, q, w – показники степеня.

Коефіцієнт C_p та показники степеня x, y, u, q, w вибираються за [табл. 47, 25].

Отже, колова сила за формулою 3.4 становить:

$$P_z = \frac{10 \cdot 22.6 \cdot 2^{0.86} \cdot 0.03^{0.72} \cdot 8^1 \cdot 4}{8^{0.86} \cdot 4000^0} \cdot 1 = 176 \text{ Н}$$

Визначаю осьову P_x і радіальну P_y складові сили різання з наступних залежностей [табл. 48, 25]:

- осьова складова $P_x/P_z = (0,5 \dots 0,55)$, звідси $P_x = 90 \text{ Н}$
- радіальна складова $P_y/P_z = (0,3 \dots 0,4)$, звідси $P_y = 60 \text{ Н}$

Загальна сила різання складає:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (3.5)$$

$$P = \sqrt{90^2 + 60^2 + 176^2} = 207 \text{ Н}$$

де P_x – осьова складова сили різання, Н;

P_y – радіальна складова сили різання, Н;

P_z – колова складова сили різання, Н.

Крутний момент на шпинделі визначається за формулою 3.6:

$$M_{\text{кр}} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot 100} \quad (3.6)$$

$$M_{\text{кр}} = \frac{207 \cdot 8}{2 \cdot 100} = 8,28 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де P – загальна сила різання, Н;

D – діаметр фрези, мм.

Ефективна потужність різання:

$$N_e = \frac{P \cdot v}{1020 \cdot 60} \quad (3.7)$$

$$N_e = \frac{207 \cdot 100,5}{1020 \cdot 60} = 0,34 \text{ кВт}$$

де P – загальна сила різання, Н;

v – швидкість різання, м/хв.

3.2. Вибір приводу головного руху

У сучасних верстатах усі основні рухи – обертання інструмента, подачі, швидкі переміщення – здійснюються від індивідуальних приводів, тобто кожний рух має власне джерело енергії у вигляді окремого електродвигуна. Такий підхід дозволяє досягати більшої гнучкості керування, забезпечувати точну зміну швидкостей, підвищену надійність і можливість автоматизації процесу обробки.

Основну роль у структурі будь-якого металообробного верстата відіграє привід головного руху, який забезпечує обертання інструмента або заготовки. Саме цей привід визначає потужність, швидкість і стабільність процесу різання, а отже – продуктивність і якість обробки.

До приводу головного руху висуваються такі основні вимоги:

- забезпечення необхідного діапазону частот обертання для реалізації режимів різання при обробці різних матеріалів;
- стабільність крутного моменту в усьому діапазоні швидкостей;
- плавність пуску та зупинки, без ривків і перевантажень;
- можливість безступінчастого регулювання швидкості обертання;
- мінімальні габарити та маса, що особливо важливо для настільних верстатів;
- високий ресурс роботи під навантаженням та простота обслуговування.

У промислових і лабораторних настільних верстатах найчастіше застосовуються електричні приводи безступінчастого регулювання, які можуть бути реалізовані трьома основними способами:

- електричні (через широтно-імпульсне регулювання або частотне керування);
- механічні варіатори (для спрощених систем);
- гідравлічні (у верстатах спеціального призначення).

Серед них електричні приводи є найбільш ефективними для малогабаритних систем завдяки простоті, компактності й точності регулювання швидкості.

У конструкції розробленого настільного фрезерного верстата як привід головного руху обрано мотор-шпиндель з інтегрованим електродвигуном (рис. 3.2) [35]. Такий привід поєднує функції шпиндельного вузла та привідного двигуна, що дозволяє зменшити кількість проміжних елементів (пасів, муфт, редукторів) і забезпечити високу кінематичну жорсткість системи.



Рисунок 3.2 – Мотор-шпиндель 500 Вт

Мотор-шпиндель – це компактний, герметичний вузол, який включає:

- електродвигун постійного струму з вбудованим ротором на валу шпинделя;
- підшипникову опору високої точності;
- систему охолодження (повітряну або рідинну);
- датчики температури та обертів (у складніших моделях).

За результатами розрахунків режимів фрезерування (розділ 3.1) визначено, що ефективна потужність різання при обробці алюмінію становить близько 340 Вт.

З урахуванням коефіцієнта запасу потужності (1,3–1,5) для компенсації можливих перевантажень, вибрано мотор-шпиндель номінальною потужністю

500 Вт. Такий запас дозволяє забезпечити стабільну роботу під час різання не лише алюмінію, але й м'яких сталей, пластмас та композитних матеріалів.

Мотор-шпиндель оснащено повітряним охолодженням, що є доцільним для настільних верстатів малої потужності, оскільки не потребує додаткової системи рідинної циркуляції й не ускладнює конструкцію.

Робочий діапазон швидкостей шпинделя становить 5000–12000 об/хв, що дозволяє обробляти як дрібні деталі з високою чистотою поверхні, так і виконувати чорнове знімання матеріалу на середніх подачах.

Такий вибір забезпечує оптимальне співвідношення потужності, компактності, вартості та технологічної універсальності. Конструкція мотор-шпинделя дає змогу реалізувати безступінчасте регулювання швидкості, стабільну роботу у всьому діапазоні навантажень і високу точність обертання інструмента, що повністю відповідає вимогам, висунутим до настільного фрезерного верстата порталного типу.

3.3. Вибір приводів координатних переміщень

Приводи координатних переміщень забезпечують подачу інструмента або заготовки в заданому напрямку з необхідною швидкістю і точністю. Для настільного фрезерного верстата порталного компонування такі приводи повинні поєднувати компактність, плавність ходу, стабільність позиціонування та достатній крутний момент для подолання сил різання і тертя у напрямних.

У сучасних верстатах подачі найчастіше реалізуються за допомогою електричних крокових двигунів, що безпосередньо або через муфту приводять у рух кульково-гвинтову пару (ШВП). Перевагою такого рішення є відсутність люфту, простота керування, висока точність переміщення та можливість інтеграції у систему числового програмного керування.

З числа сил, що діють на кульково-гвинтову передачу, крутний момент для зовнішнього навантаження (опір тертю поверхні напрямної або навантаження ззовні) розраховується за формулою 3.8:

$$T = \frac{P \cdot t}{2\pi \cdot \eta} \quad (3.8)$$

де P – прикладене навантаження, Н;

t – крок різьби ходового гвинта (попередньо обираю ШГП з кроком 4 мм);

η – ККД шарико-гвинтової передачі (0,9...0,95).

Отже, крутний момент за формулою 3.8 складає:

$$T = \frac{207 \cdot 4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,9} = 146 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

В цілях безпеки, зазвичай крутний момент подвоюють, тому $T = 290 \text{ Н} \cdot \text{мм}$.

В якості приводів подач (приводів координатних переміщень) верстата використаю крокові двигуни 57BYG250С (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Крокові двигуни 57BYG250С [19]

Основні характеристики цього двигуна наведено нижче:

- номінальний утримуючий момент – 1,8 Н·м;
- номінальний струм фази – 3 А;
- опір фази – 1,1 Ом;
- індуктивність – 3,8 мГн;
- кут кроку – 1,8° (200 кроків на оберт);
- маса – приблизно 1,2 кг.

Отриманий момент двигуна більш ніж у п'ять разів перевищує розрахунковий, що забезпечує надійний запас потужності при будь-яких

режимах фрезерування, а також дає можливість підвищення прискорень і швидкості подач без ризику пропуску кроків.

Висновки

У розрахунковому розділі було проведено аналіз і обґрунтування основних параметрів, що визначають ефективність роботи настільного фрезерного верстата портального компонування.

На основі проведених розрахунків і техніко-конструктивних рішень отримано такі результати:

Визначено режими фрезерування для обробки алюмінієвих сплавів, що є основним матеріалом для випробувань.

У результаті розрахунків встановлено оптимальні параметри — частоту обертання шпинделя, подачу на зуб і глибину різання, які забезпечують раціональне співвідношення між продуктивністю та чистотою обробленої поверхні. Отримані дані покладено в основу вибору приводу головного руху.

На підставі розрахункової потужності різання (≈ 340 Вт) та з урахуванням коефіцієнта запасу обрано мотор-шпиндель потужністю 500 Вт із повітряним охолодженням.

Такий привід забезпечує необхідний крутний момент, плавне безступінчасте регулювання швидкості в діапазоні 5000–12000 об/хв, низький рівень шуму та компактність конструкції, що є критично важливим для настільного верстата.

Розраховано та обрано приводи координатних переміщень.

Визначено необхідний крутний момент для переміщення рухомих вузлів по осях, який становить приблизно $0,31$ Н·м з урахуванням запасу.

Для забезпечення стабільної роботи та високої точності позиціонування обрано крокові двигуни 57BYG250С з утримуючим моментом $1,8$ Н·м, що мають достатній запас потужності. Такий вибір дозволяє досягти плавного ходу, низької вібрації та високої повторюваності позиціонування.

Потужність двигунів координатних переміщень і шпинделя підібрана з урахуванням сумарних навантажень і допустимих струмів живлення, що забезпечує ефективну роботу системи керування без перевантажень і перегрівів.

Підтверджено відповідність обраних параметрів вимогам до малогабаритного настільного фрезерного верстата.

Розраховані та підібрані вузли забезпечують достатній запас міцності, точність і надійність при компактних розмірах і відносно низькій вартості конструкції.

Проведені розрахунки підтвердили правильність обраних технічних рішень. Використання мотор-шпинделя потужністю 500 Вт у поєднанні з кроковими двигунами 57BYG250С та кульково-гвинтовими передачами з кроком 4 мм забезпечує високі експлуатаційні характеристики, точність позиціонування та енергоефективність верстата.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої оптимізації системи керування, а також для практичного виготовлення та випробування дослідного зразка.

4. ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1. Побудова розрахункової схеми пружно-напруженого стану несучої системи верстата

Для оцінки впливу форми несучої частини на жорсткість і загальний пружно-напружений стан настільного фрезерного верстата необхідно розробити розрахункову схему, що включає два варіанти конструкцій несучого каркаса.

Перший варіант (рисунок 4.1) являє собою замкнену кубічну раму, що утворена нижньою та верхньою прямокутними рамами, з'єднаними між собою чотирма вертикальними стійками. Така конструкція відповідає кубічному типу несучої системи, при якій силові контури замкнені у трьох площинах, що сприяє рівномірному розподілу навантажень і підвищенню просторової жорсткості.

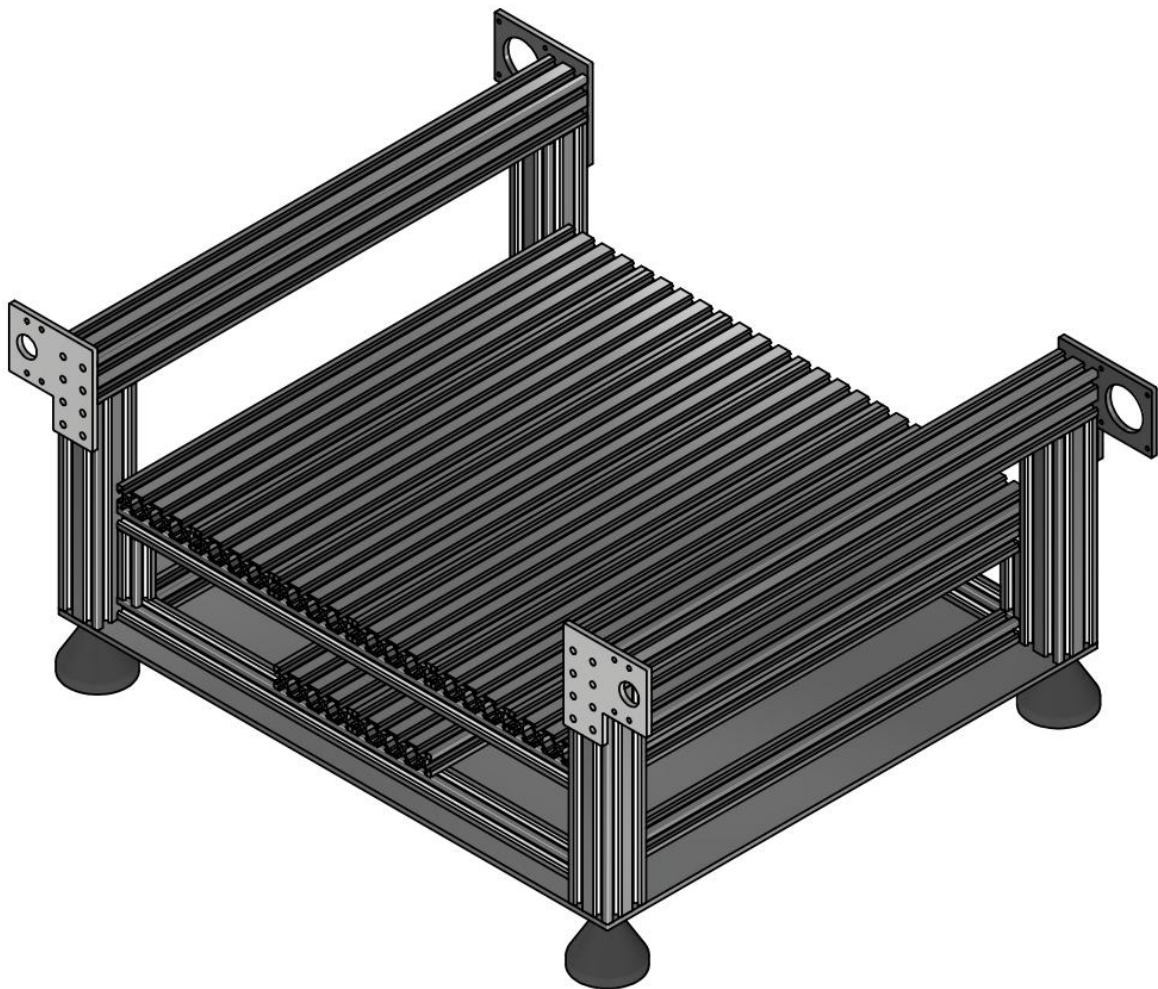


Рисунок 4.1– Загальний вигляд станини у формі куба

Другий варіант (рисунок 4.2) – відкрита U-подібна конструкція, в якій верхня грань куба відсутня. Каркас складається з нижньої прямокутної площини та чотирьох вертикальних стійок, що попарно з'єднані лише поздовжніми балками. Поперечне з'єднання зверху відсутнє, тому силова структура залишається незамкненою у верхній частині, що потенційно знижує жорсткість і стійкість до перекручувань.

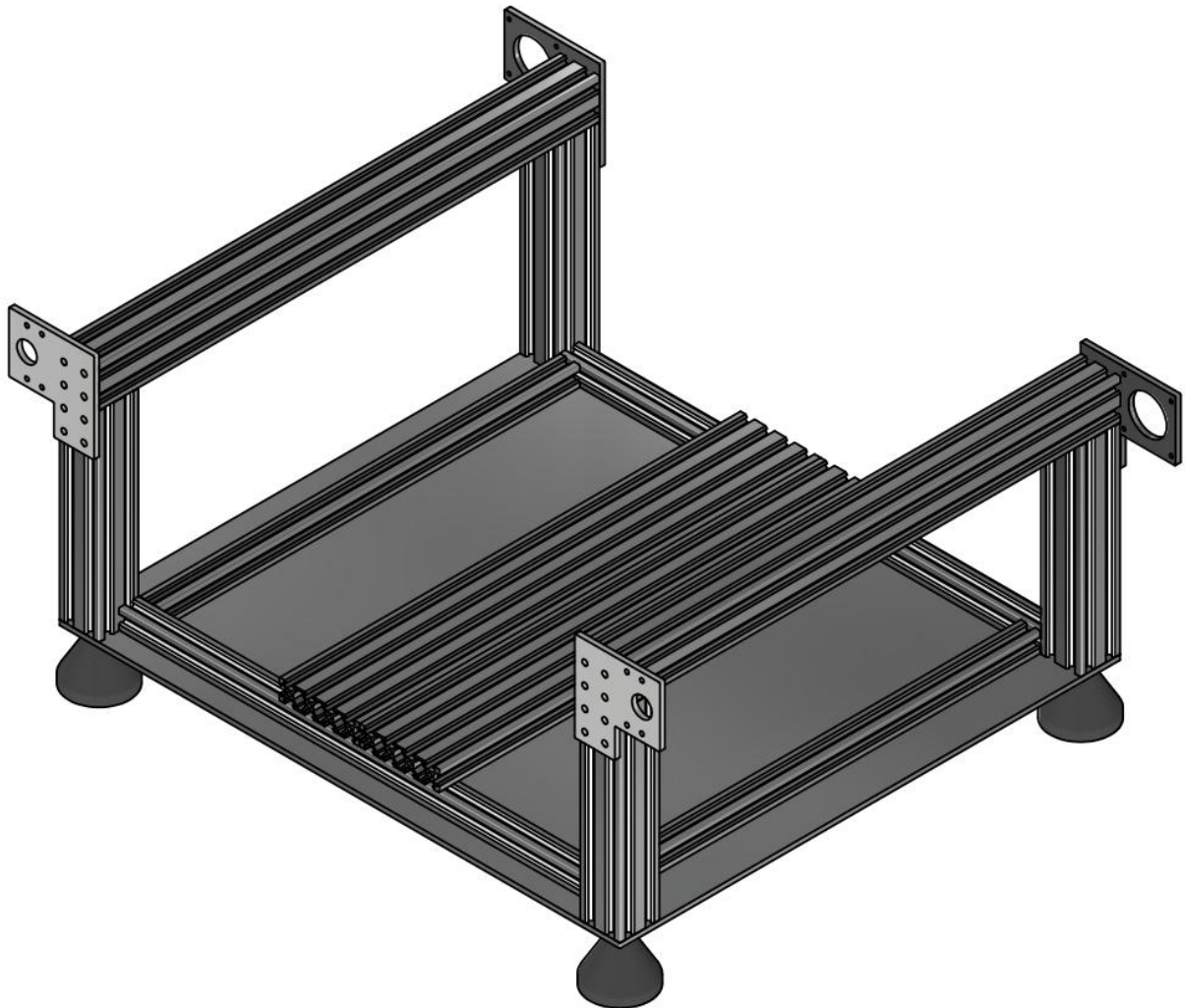


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд станини у формі U-подібної конструкції

Основною метою дослідження є порівняння впливу геометричної форми рами на жорсткість і стійкість конструкції, тому в розрахунку прийнято спрощувальні припущення. Для забезпечення однакових умов обидва варіанти моделювались у вигляді каркасних структур, створених із стержневих (beam) елементів з жорсткими з'єднаннями у вузлах. Такий підхід дозволяє оцінити

вплив саме компоновки елементів, не враховуючи деформацій у місцях болтових стиків чи опорних поверхонь.

Оскільки мета полягає у порівняльному аналізі двох компоновок, граничні умови спрощено – ніжки верстата у всіх моделях прийнято як жорстко защемлені (Fixed). Таке припущення забезпечує повну фіксацію переміщень по всіх напрямках (X, Y, Z) у точках опори. Цей тип закріплення дає завищене значення абсолютної жорсткості, однак забезпечує коректність відносного порівняння між варіантами конструкцій, оскільки умови опираючі і навантаження є ідентичними. Крім того, жорстке защемлення дозволяє уникнути помилок, пов'язаних з надмірною рухомістю або нестійкістю моделі при лінійному статичному розрахунку.

Основними параметрами, за якими проводиться порівняння, є:

- максимальне лінійне переміщення у напрямку дії сили, яке показує, наскільки конструкція відхиляється під навантаженням;
- кутовий перекид верхньої площини (обертання навколо вертикальної осі Z), що відображає схильність рами до кручення під дією асиметричних навантажень;
- максимальні еквівалентні напруження (σ_{\max}) у стійках і поперечних елементах конструкції.

Таке визначення жорсткості є найбільш показовим для фрезерних верстатів, де домінуючими є саме бокові сили різання, що спричиняють згинальні та крутильні деформації порталу й станини. Порівняння за цими параметрами дає можливість оцінити ефективність форми несучої системи з точки зору опору зсуву і перекосу.

Очікується, що замкнена кубічна конструкція, у якій силові контури утворюють повний просторовий об'єм, матиме суттєво більшу жорсткість і менші деформації, ніж U-подібна. В останній відсутність верхнього контура призводить до збільшення податливості стійок і втрати стійкості до кручення, що особливо проявляється при бокових навантаженнях і моментах, спричинених асиметричним різанням.

Результати розрахунку дозволять визначити відносний вигаш у жорсткості замкненої структури порівняно з відкритою та підтвердити доцільність вибору кубічної форми несучої системи для малогабаритного фрезерного верстата. Це дослідження також дає можливість кількісно оцінити вплив просторового замикання силових контурів на деформаційні характеристики рами, що є важливим для оптимізації конструкції на етапі проектування.

4.2. Моделювання пружно-напруженого стану верстата

Для визначення напружено-деформованого стану несучої системи настільного фрезерного верстата виконано тривимірне комп'ютерне моделювання за допомогою програмного комплексу Autodesk Inventor Professional. Метою даного етапу є перевірка працездатності розрахункової схеми, побудованої на попередньому етапі, а також отримання полів переміщень і напружень у конструкції при діях сил різання.

Перед початком аналізу було створено параметричну модель станини з двома «станами моделі»:

Кубічна (замкнена) – включає верхній пояс, який утворює повний просторовий контур;

U-подібна (відкрита) – аналогічна за розмірами, але без верхнього замикального елемента.

Обидві моделі побудовано у середовищі 3D-моделювання Autodesk Inventor. Конструкції сформовано з алюмінієвих профілів V-slot. Для забезпечення максимальної ідентичності геометрії всі елементи мають однакові довжини та розташування, а точки навантаження і опори – ті ж самі координати в обох варіантах. Відмінністю цих двох «станів моделі» є наявність або відсутність балок, що утворюють верхній контур станини.

Після створення геометричної моделі виконано перехід у середовище Аналіз напружень (Stress Analysis).

Усі елементи конструкції отримали властивості алюмінієвого сплаву EN AW-6063-T6 із такими параметрами: модуль пружності $E = 70$ ГПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,33$, густина $\rho = 2700$ кг/м³.

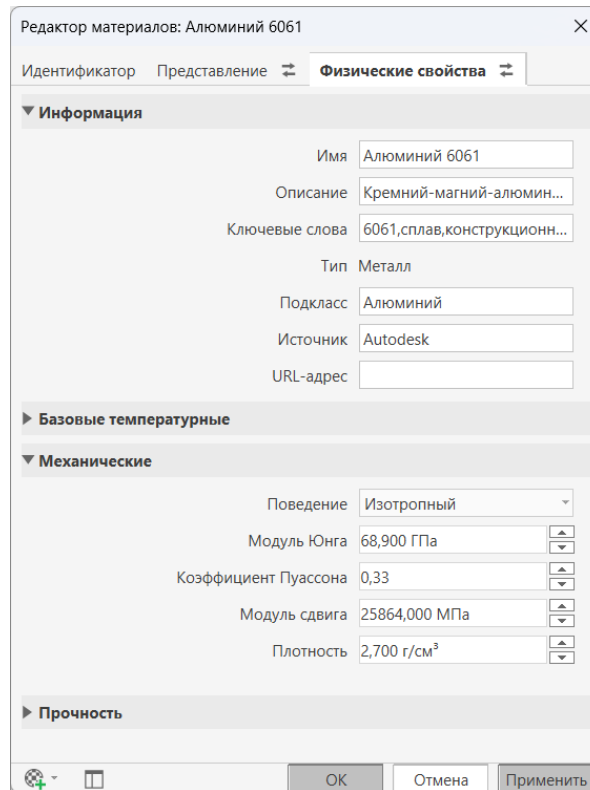


Рисунок 4.3 – Фізичні властивості матеріалу в бібліотеці матеріалів Inventor

Такі характеристики відповідають реальним профілям, що використовуються у верстатобудуванні, та забезпечують достовірність оцінки пружних деформацій.

Моделі станини створено з стержневих елементів (Beam), які передають зусилля згину, стиску, розтягу та кручення. Усі вузлові з'єднання визначені як жорсткі (Rigid), що моделює поведінку жорстко закріплених кутників у реальній конструкції.

Для забезпечення однакових умов порівняння опори ніжок в обох моделях задані як жорстко защемлені (Fixed) (рисунок 4.4).

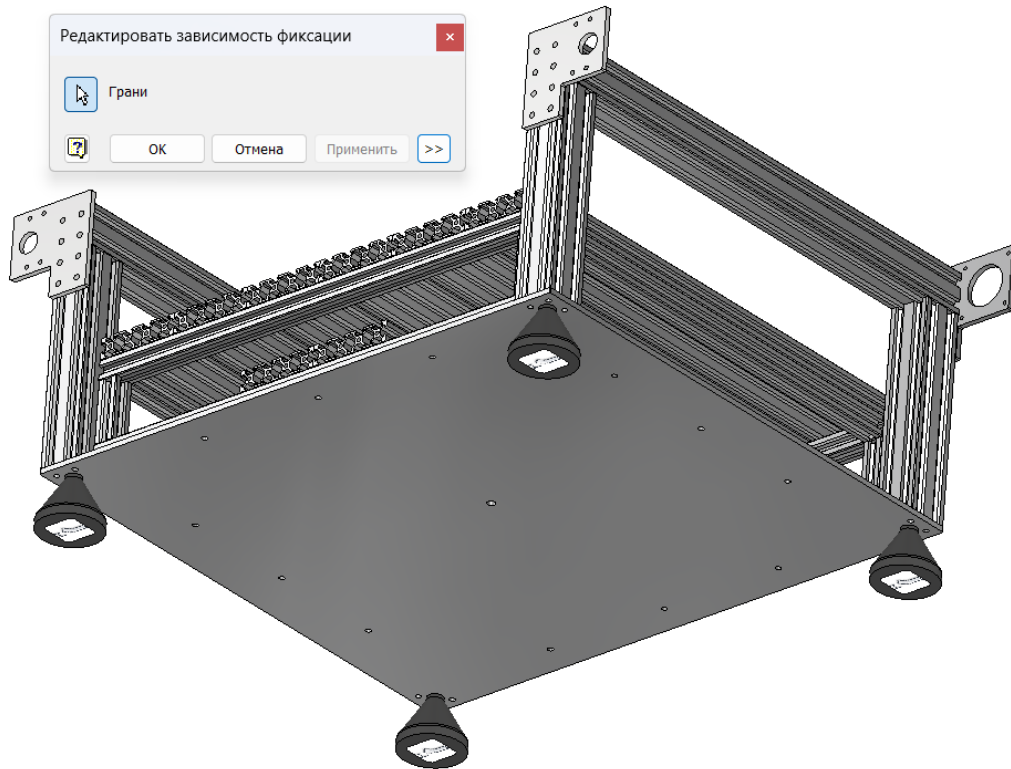


Рисунок 4.4 – Задання залежності фіксації опор

Кожна ніжка має свою опорну площину, закріплену від переміщень по всіх напрямках (X, Y, Z).

Такий підхід спрощує розрахунок і дозволяє уникнути надмірної податливості моделі, при цьому забезпечуючи ідентичні умови для обох компоновок.

Головним навантаженням є сили різання, прикладені в області шпindelного вузла, тобто у верхній частині конструкції, де розташовується портал верстата.

Для кожного випадку аналізу задавалось наступне навантаження (рисунок 4.5):

- уздовж осі X: сила $F_x = 300\text{H}$
- уздовж осі Y: сила $F_y = 300\text{H}$

Числові значення сил різання обрано умовно, для виконання статичного аналізу пружно-напруженого стану.

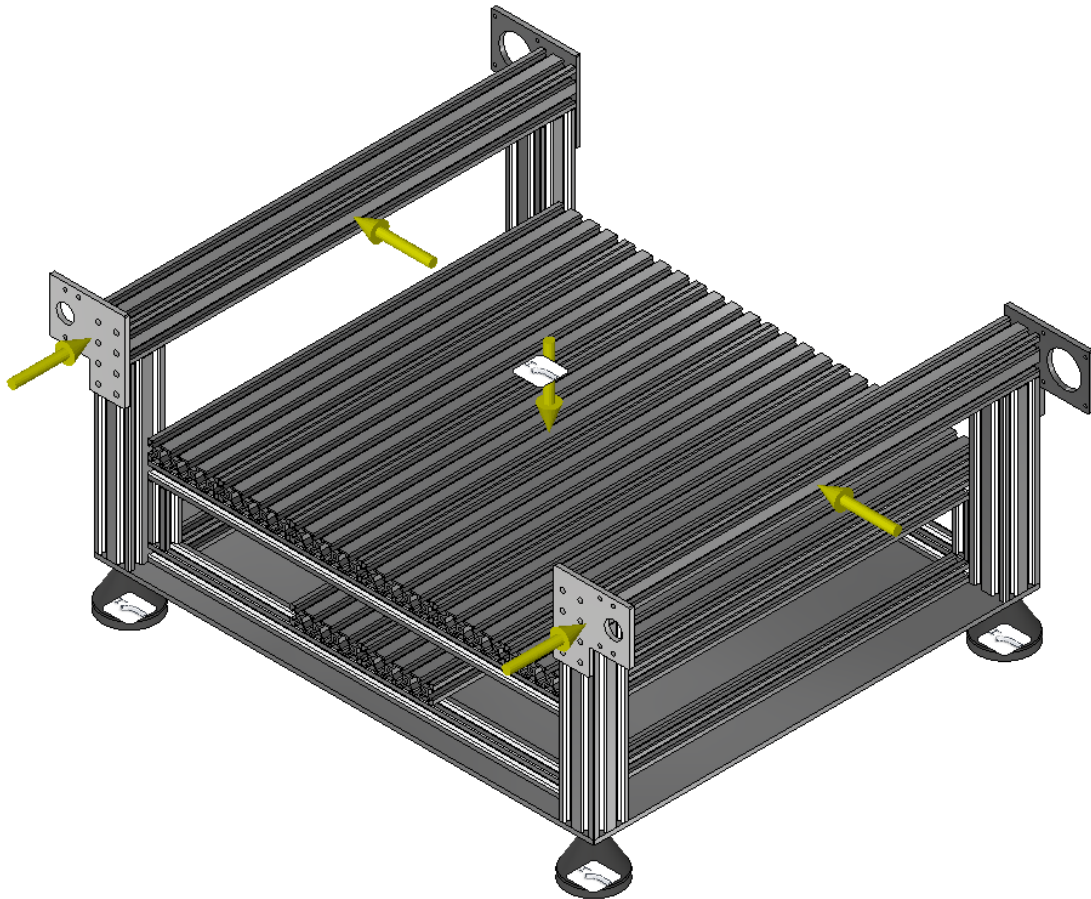


Рисунок 4.5 – Задання зовнішніх навантажень

Напрямки дії сил задавалися у позитивному напрямку відповідних осей глобальної системи координат.

Усі параметри навантаження (величина, напрямок, координати прикладання) є однаковими для обох варіантів станини.

Для більш повної оцінки жорсткісних характеристик несучої системи проведено додаткове моделювання, спрямоване на визначення кутового перекосу верхньої площини станини при дії крутного моменту навколо вертикальної осі.

Для цього створено окреме дослідження з аналогічними граничними умовами – опори ніжок моделювалися як жорстко защемлені (Fixed), матеріал конструкції та тип елементів залишались незмінними.

Відмінність полягала лише у схемі навантаження. Як показано на рисунку 4.6, на дві протилежні сторони станини прикладено рівні за величиною, але протилежні за напрямком сили, що створюють пару моментів відносно вертикальної осі Z.

Величина кожної сили становила $F=300$ Н, прикладання виконувалось на висоті верхнього поясу рами. Така схема імітує реальну ситуацію, коли при різанні інструмент створює крутильне навантаження на станину через асиметричний розподіл сил різання або нецентровану подачу.

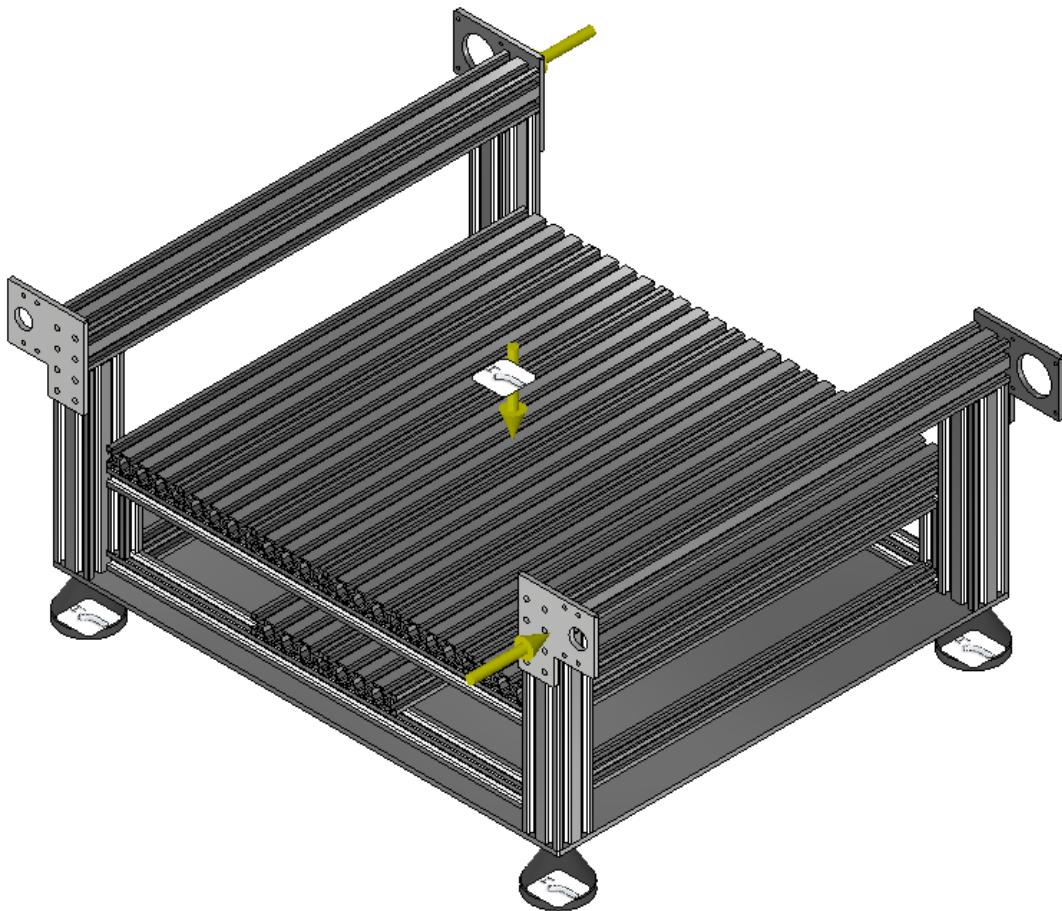


Рисунок 4.6 – Задання сил для аналізу крутильної жорсткості станини

Основною метою даного аналізу було визначення кутового перекосу (φ_z) верхньої площини станини, який характеризує здатність конструкції чинити опір скручуванню. Для кожного варіанта (кубічної та U-подібної станини) отримано карти деформацій, за якими можна оцінити розподіл переміщень по діагоналях

конструкції. При цьому у кубічній рамі очікується утворення замкненого просторового контуру, який ефективно протидіє крутінню, тоді як у відкритій U-подібній структурі частина моменту сприймається переважно верхніми балками, що призводить до значного перекосу і нерівномірного розподілу напружень у вертикальних стійках.

Для забезпечення точності розрахунку створено просторову скінченно-елементну сітку (рисунок 4.7).

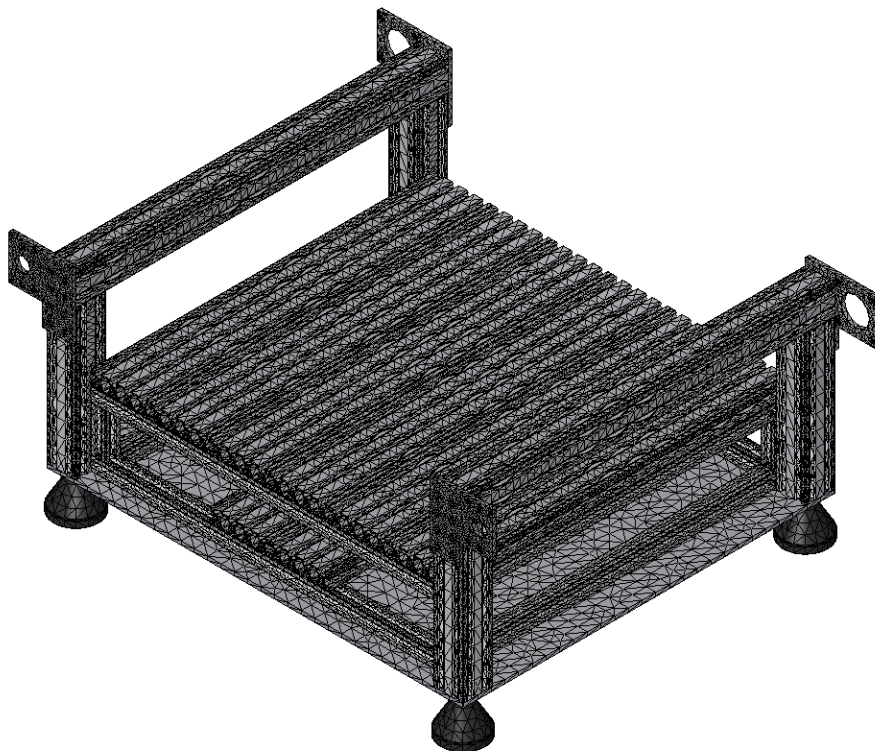


Рисунок 4.7 – Вигляд сітки станини

У розрахунку не враховувались нелінійні ефекти (контактне прилягання, пластичність, демпфування), оскільки метою є визначення відносної жорсткості конструкцій у межах пружної роботи матеріалу.

В результаті для кожного випадку отримано поля напружень та переміщень, що відображають реакцію конструкції на прикладені сили різання. Отримані дані дозволяють оцінити деформаційний стан станини, визначити напрямки максимальних відхилень і напружень, а також провести порівняльну оцінку ефективності геометричних форм несучих систем у подальшому аналізі.

4.3. Результати моделювання

У результаті моделювання пружно-напруженого стану було отримано розподіл переміщень і напружень у несучій частині верстата для двох варіантів конструкції.

На рисунку 4.8 представлено діаграму переміщень для замкненої кубічної конструкції. Максимальне зміщення спостерігається у верхній частині порталу, безпосередньо в місці прикладання навантаження, і становить 0,1347 мм.

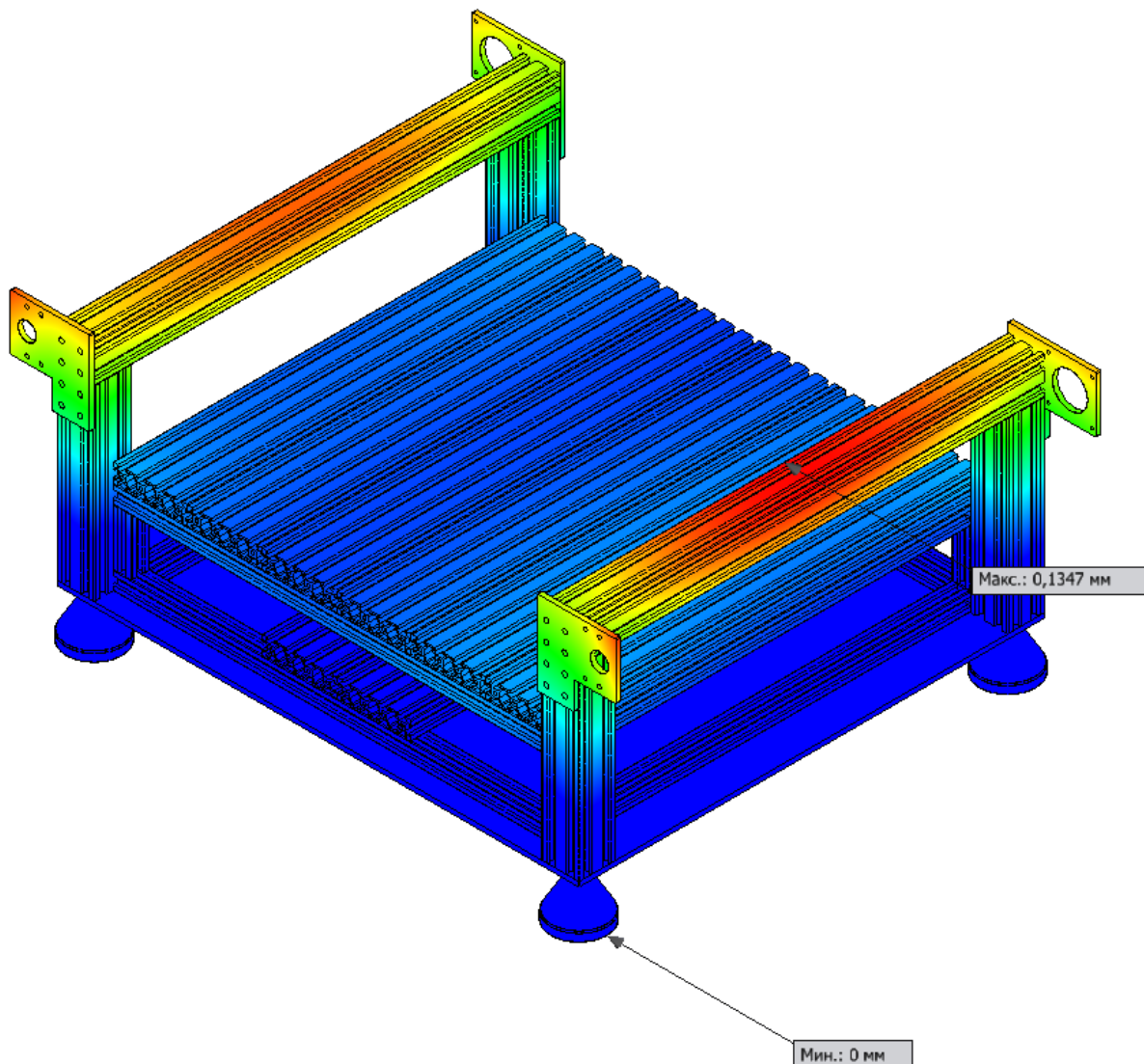


Рисунок 4.8 – Розподіл зміщень замкненої системи

Найбільші деформації зосереджені в горизонтальних балках, що з'єднують вертикальні стійки, тоді як нижня частина конструкції залишається практично нерухомою. Це свідчить про те, що навантаження ефективно розподіляється через замкнуту просторову схему каркаса, і силові елементи працюють спільно – частково на розтяг, частково на стиск.

На рисунку 4.9 наведено аналогічний розподіл переміщень для U-подібної станини. В даному випадку максимальне зміщення у верхній частині порталу становить 0,2508 мм, що майже у 1,9 рази більше, ніж у кубічній схемі.

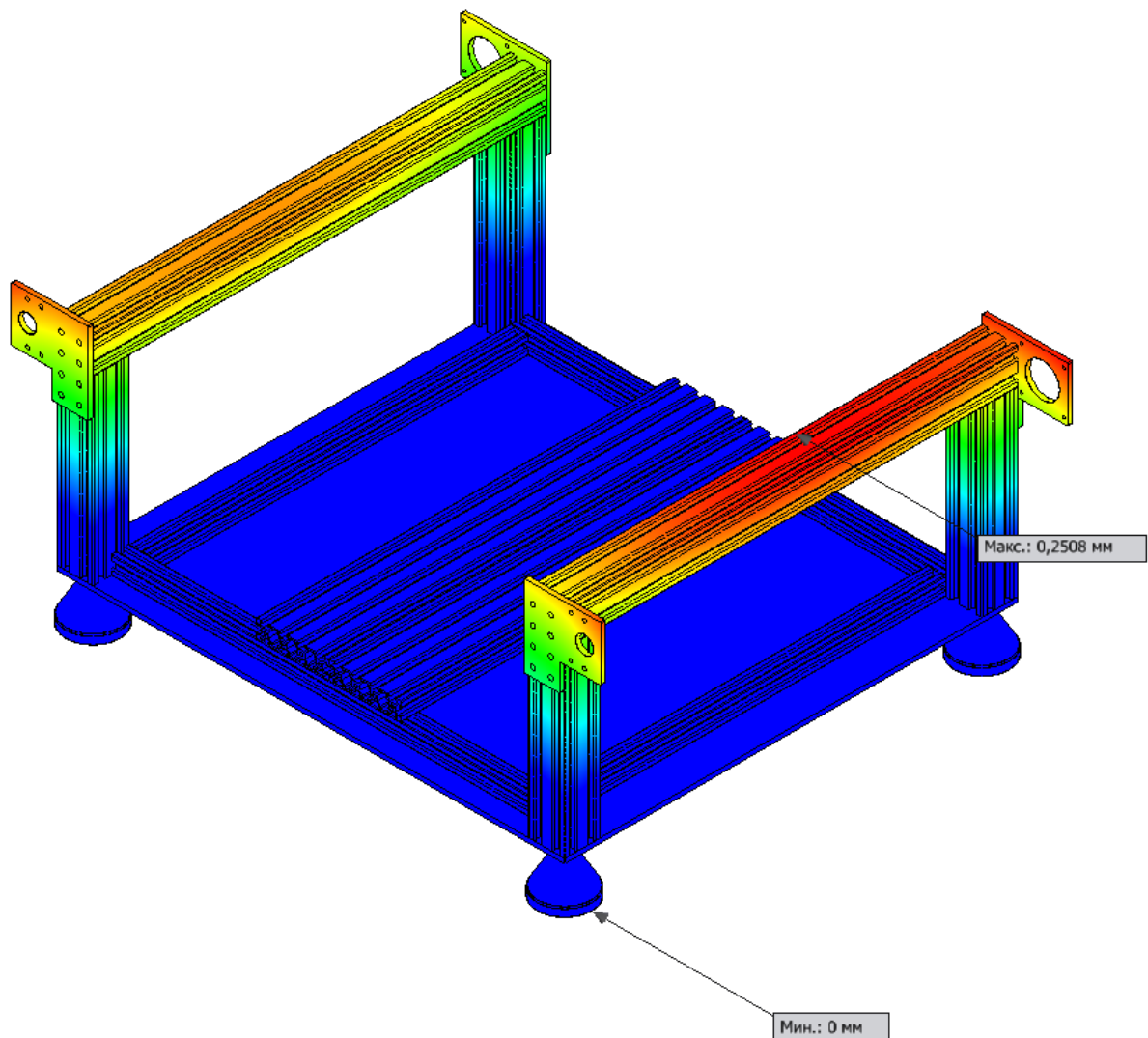


Рисунок 4.9 – Розподіл зміщень для відкритої системи

З аналізу кольорового розподілу видно, що найбільші деформації зосереджені у верхніх горизонтальних елементах та у місцях їх з'єднання зі

стійками. Відсутність верхнього замикання призводить до збільшення згинального моменту у вертикальних стійках, що суттєво зменшує загальну жорсткість системи.

Аналіз результатів при крутильному навантаженні

Для оцінки стійкості станини до скручування було проведено окреме моделювання з прикладанням навантажень, які утворюють крутний момент відносно вертикальної осі верстата. Сили величиною $F=300$ Н прикладалися до двох протилежних сторін конструкції у протилежних напрямках, що створює пару моментів, імітуючи реальний випадок асиметричного навантаження при роботі шпинделя.

На рисунку 4.10 показано діаграму переміщень для кубічної станини. Максимальне зміщення становить 0,2219 мм і спостерігається у верхній частині порталу, поблизу точки прикладання сили. Деформації мають рівномірний характер – видно, що вся верхня площина зберігає жорстке просторове замикання, а переміщення протилежних кутів майже симетричні. Це свідчить про ефективну роботу верхнього контуру конструкції, який замикає контур і перерозподіляє крутильний момент між усіма силовими елементами. Верхні балки працюють у парі зі стійками на розтяг і стиск, зменшуючи перекіс і скручування.

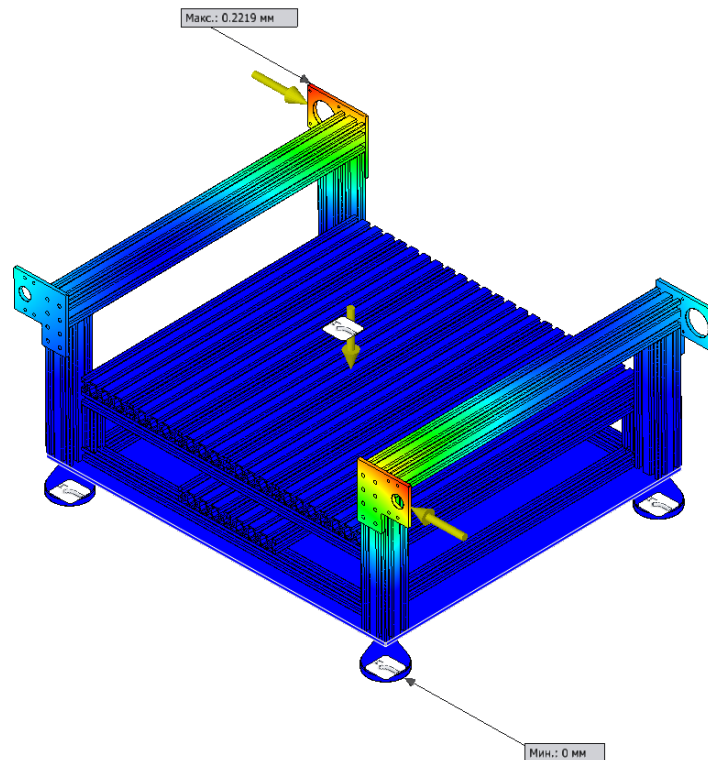


Рисунок 4.10 – Розподіл крутильної жорсткості закритої системи

На рисунку 4.11 подано результати для U-подібної станини, у якій відсутня верхня замикальна частина. У цьому випадку максимальне зміщення досягає 0,7915 мм, тобто майже у 3,6 раза більше, ніж у кубічної конструкції. Розподіл кольорів показує, що основні деформації зосереджуються у верхніх балках та у місцях їхнього кріплення до стійок. Через відсутність замкненого контуру значна частина моменту сприймається лише окремими елементами, що призводить до великого перекосу верхньої площини та втрати геометричної стабільності.

Це означає, що кубічна конструкція має приблизно у 3,5–4 рази більшу крутильну жорсткість, ніж U-подібна.

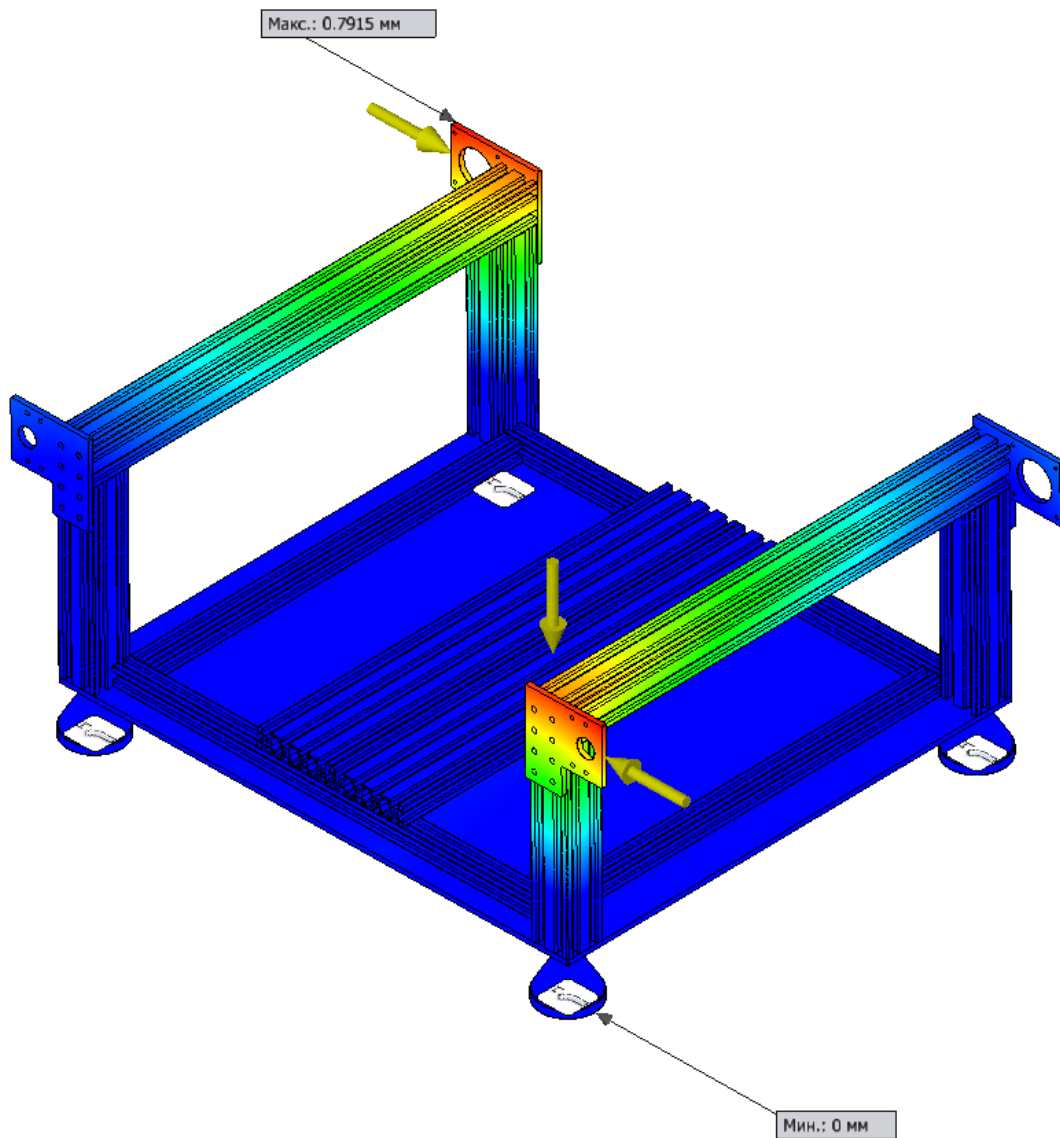


Рисунок 4.11 - Розподіл крутильної жорсткості відкритої системи

4.4. Приклад налагодження верстата на обробку деталі

Для створення керуючої програми скористаюся програмним забезпеченням від компанії Autodesk, а саме Inventor 2025 [37] та додатковим модулем Inventor CAM [38].

Спочатку за допомогою Inventor 2025 створюється 3д-модель деталі.

Для прикладу виконаю обробку тестової деталі (рисунок 4.12).

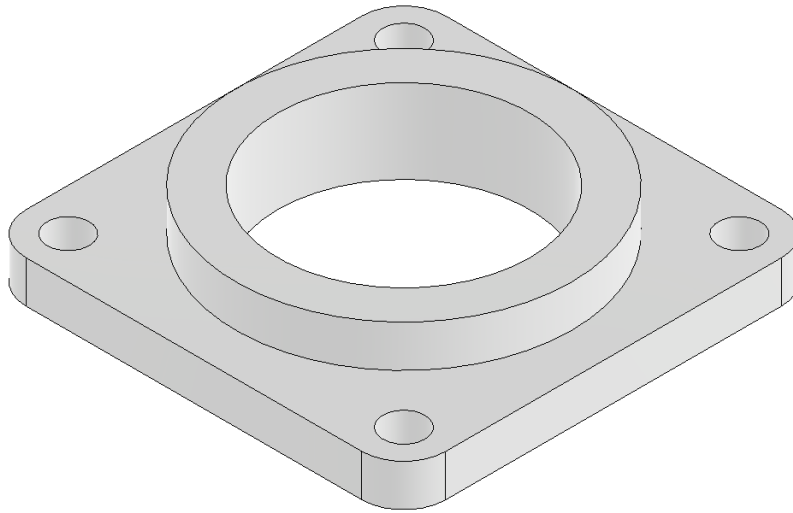


Рисунок 4.12 – Деталь для обработки на разобленном верстаті

Розглянемо детальніше кроки для створення керуючої програми.

Після переходу на вкладку CAM у Inventor необхідно створити налаштування на обробку, а також заготовку (рисунок 4.13).

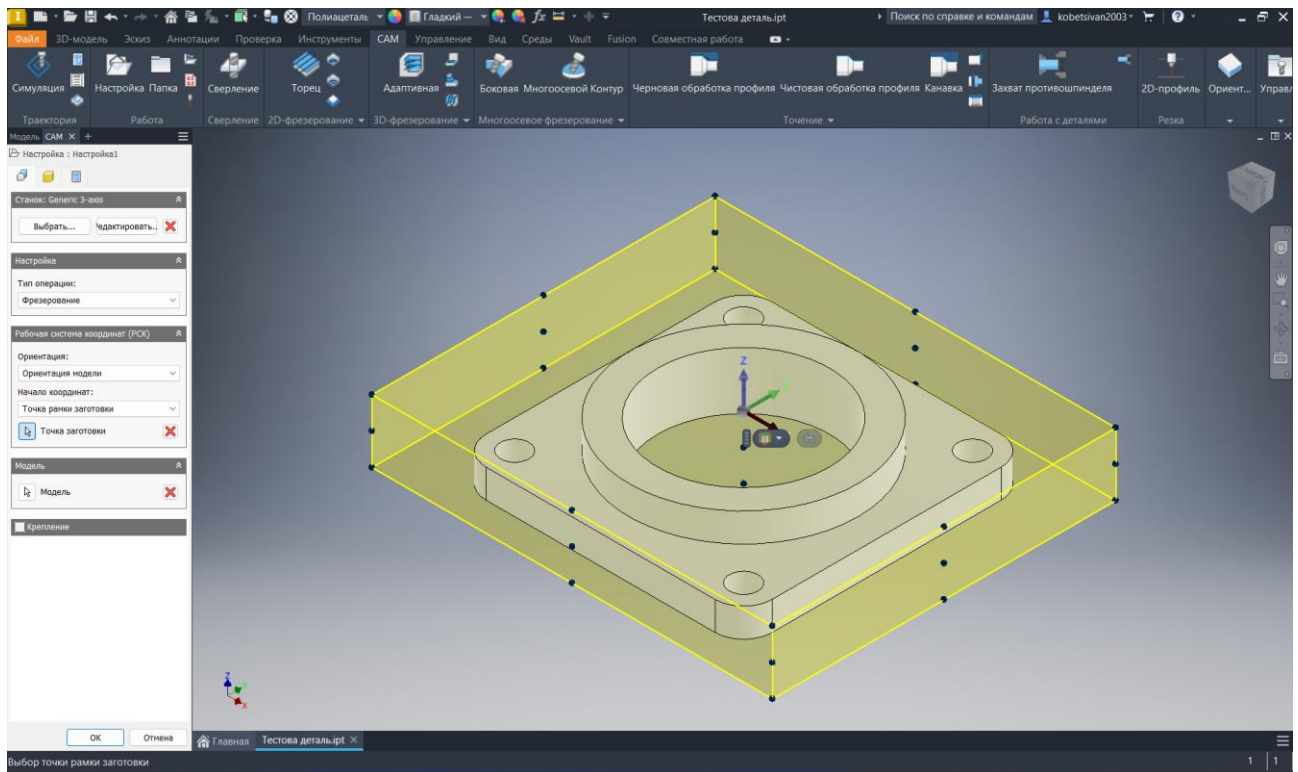


Рисунок 4.13 – Створення заготовки

Наступним кроком є створення траєкторії обробки. Для обробки застосовую стратегію «2D-карман» (рисунок 4.14). За цього способу обробки відбувається фрезерування карманів, виступів та інших елементів.



Рисунок 4.14 – Вибір стратегії обробки

Наступним етапом є налаштування обраної стратегії фрезерування. В цьому вікні налаштовується система координат в якій виконується обробка, стратегія підводу і відводу інструмента, обмеження при обробці, параметри інструменту, режими різання (рисунок 4.15) і багато іншого.

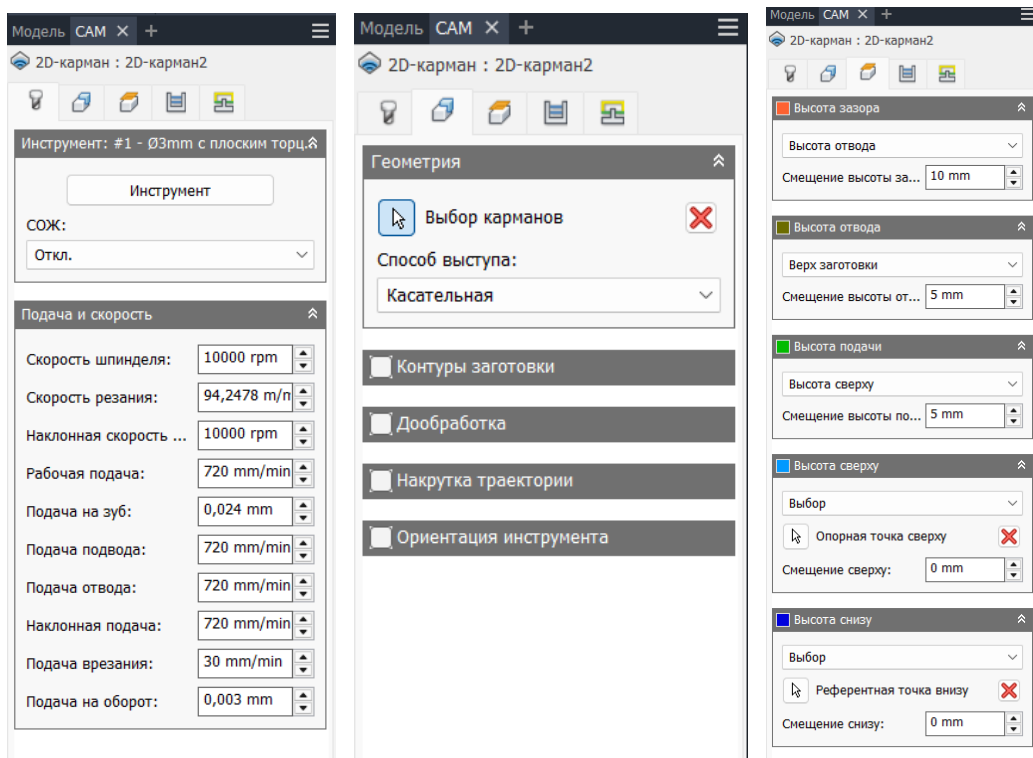


Рисунок 4.15 – Налаштування стратегії фрезерування

Після всіх налаштувань система генерує траєкторію, по якій буде переміщуватись робочий орган в процесі обробки деталі. Inventor CAM дає можливість виконати симуляцію виконання керуючої програми, результат якої показано на рисунку 4.16.

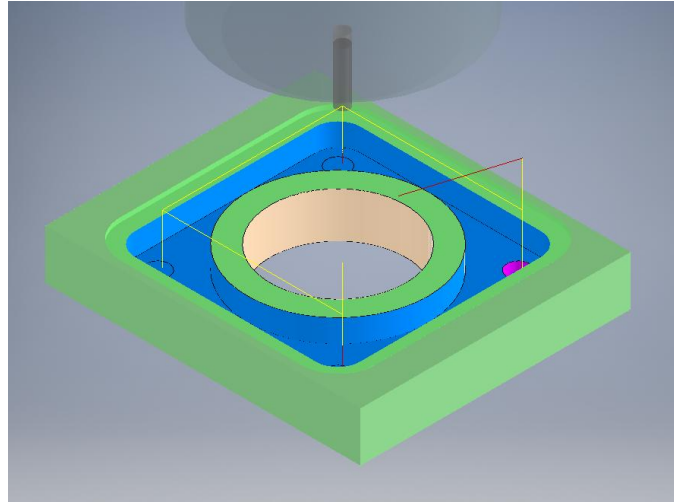


Рисунок 4.16 – Результат виконання першої частини обробки

Для відрізання деталі від заготовки застосовується стратегія «2D-контур» (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 – Вибір стратегії обробки

Важливим моментом під час обробки за допомогою цієї команди є створення перемичок між готовою деталлю і заготовкою (рисунок 4.18). Цей

елемент потрібен для утримання деталі на заготовці на кінцевих проходах фрези. Після завершення обробки на верстаті ці перемички видаляються слюсарними методами, таким чином деталь відділяється від заготовки.

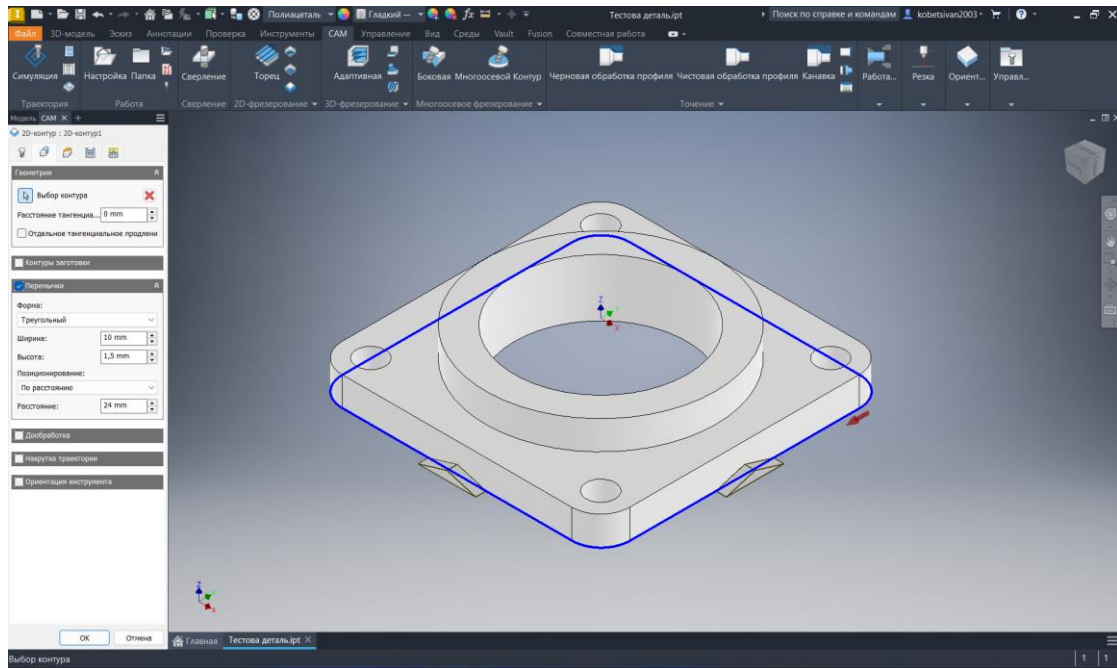


Рисунок 4.18 – Створення перемичок

Після повного створення керуючої програми необхідно провести симуляцію обробки, виявити слабкі місця в g-кодi, знайти моменти, які можна оптимізувати для зменшення часу обробки.

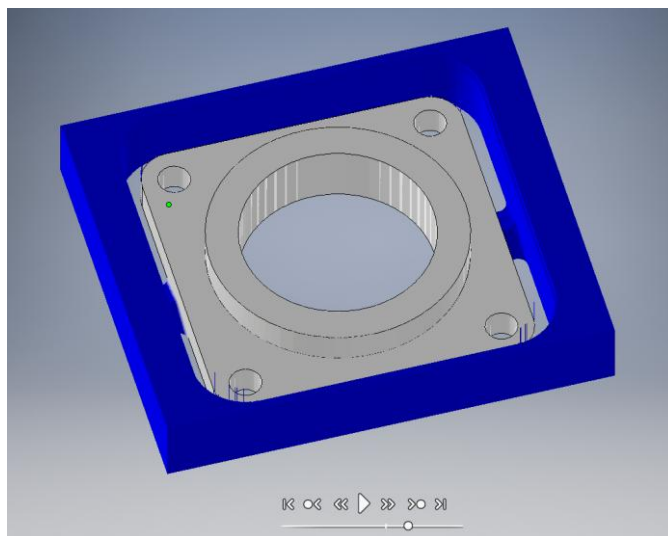


Рисунок 4.19 – Вікно симуляції

Створену керуючу програму для обробки необхідно зберегти у NC-файл, в якому буде записаний G-код (рисунок 4.20). Пост процесор обирається з наявних в бібліотеці.

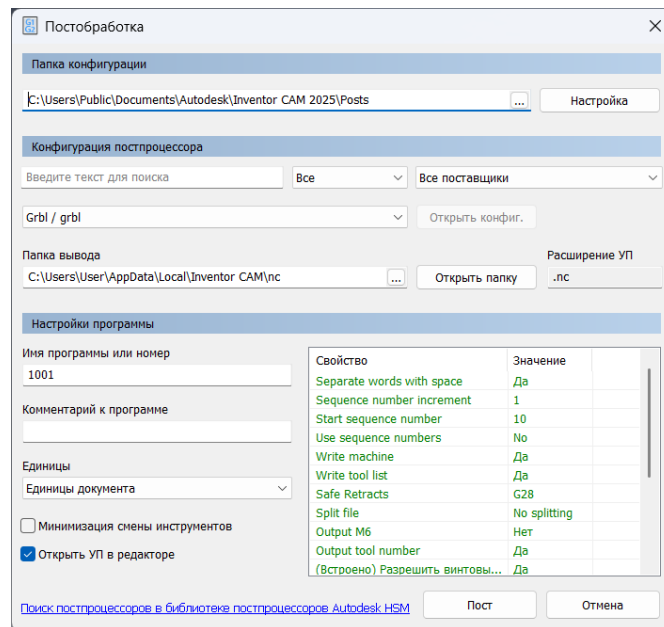


Рисунок 4.20 – Вікно генерації NC-файлу

Після формування та експорту керуючої програми у форматі G-коду наступним етапом є передача цієї програми на контролер FluidNC та її виконання. У конструкції верстата передбачена можливість бездротового підключення через вбудований модуль Wi-Fi, що значно спрощує процес налагодження та зменшує кількість дротів у робочій зоні.

Після увімкнення живлення контролера FluidNC створює власну точку доступу Wi-Fi. На екрані ПК або смартфона з'являється мережа з назвою «FluidNC». Для підключення необхідно вибрати цю мережу та ввести стандартний пароль, заданий у прошивці. Після успішного підключення користувач отримує доступ до веб-інтерфейсу контролера за адресою 192.168.0.1, яка відкривається у будь-якому сучасному браузері.

У веб-інтерфейсі FluidNC доступний повний набір інструментів для роботи з верстатом: панель ручного керування осями, відображення координат, журнал подій, завантаження файлів та доступ до конфігураційних параметрів.

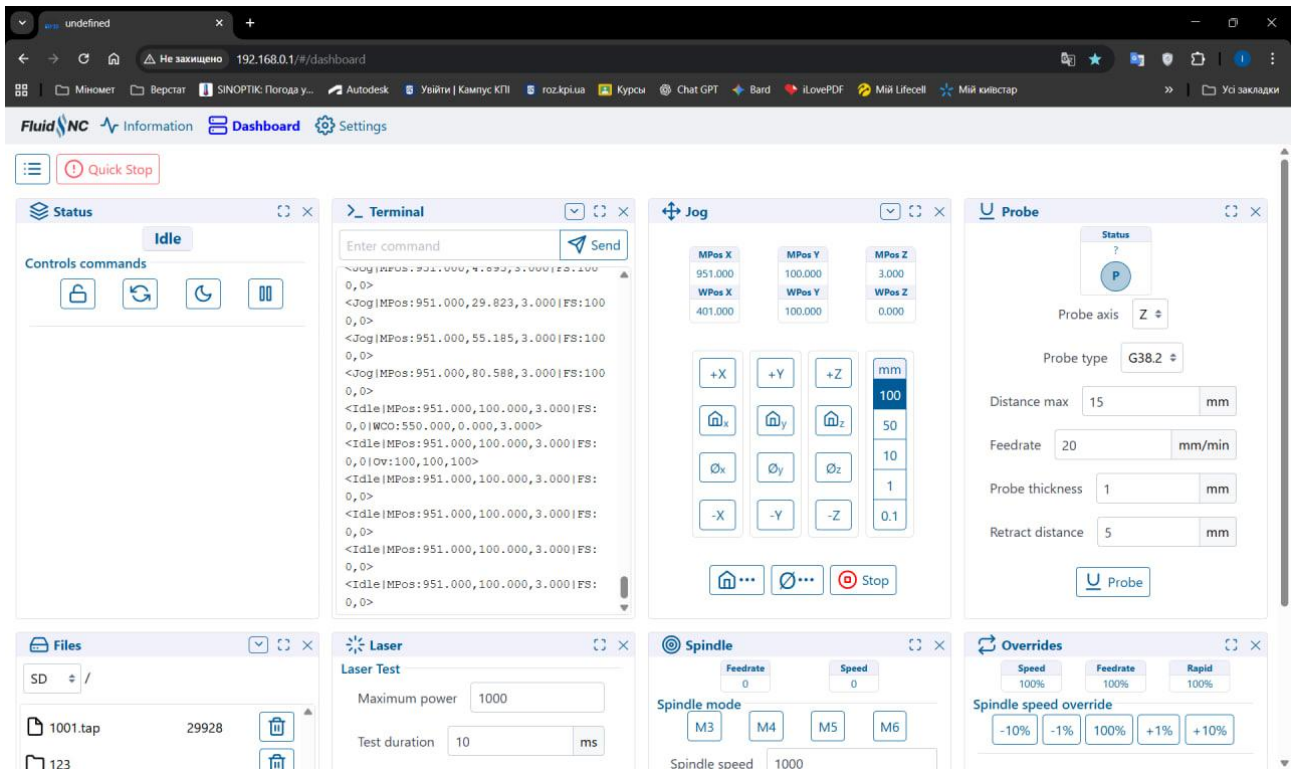


Рисунок 4.21 – Веб-інтерфейс верстата на базі FluidNC

Для запуску керуючої програми необхідно перейти в розділ Files, де розміщений файловий менеджер внутрішнього сховища контролера. Завантаження G-коду здійснюється шляхом вибору файлу на комп'ютері та натискання кнопки Upload. Після завершення завантаження програма з'являється у списку доступних файлів.

Перед запуском обробки виконується процедура встановлення нульової точки деталі (work offset). Це здійснюється через панель ручного керування, де оператор переміщує інструмент у потрібну позицію та фіксує її командою Set Zero. Після встановлення нульової системи координат можна переходити до запуску G-коду.

Запуск здійснюється натисканням кнопки Run поруч із вибраним файлом. У процесі роботи веб-інтерфейс відображає активний рядок програми, фактичні координати, швидкість подачі та відсоток виконання. При необхідності оператор може зупинити процес за допомогою кнопки Pause або повністю перервати обробку командою Stop. Усі команди дублюються апаратною кнопкою аварійної зупинки, що забезпечує повне вимкнення живлення у разі небезпечної ситуації.

Таким чином, використання бездротового підключення через Wi-Fi у поєднанні з веб-інтерфейсом FluidNC забезпечує зручний, інтуїтивно зрозумілий та технологічно ефективний спосіб передавання і запуску керуючих програм на даному настільному фрезерному верстаті.

Висновки

У дослідницькому розділі виконано комплексний аналіз пружно-напруженого стану несучої системи настільного фрезерного верстата порталного компонування з використанням методів чисельного моделювання та практичного налагодження системи керування. Дослідження було проведено для двох варіантів компоновки станини – замкненої кубічної та відкритої U-подібної.

Для обох конструкцій були забезпечені однакові граничні умови, матеріал, геометричні параметри та величини навантажень, що дозволило виконати коректне порівняння результатів. Аналіз проводився для двох режимів навантаження:

- дії горизонтальних сил різання по осях X і Y;
- дії пари сил, що створює крутний момент навколо вертикальної осі.

При прикладенні горизонтальної сили величиною $F = 300$ Н максимальні зміщення у верхній частині кубічної рами склали 0,1347 мм, тоді як для U-подібної конструкції – 0,2508 мм, що у 1,9 раза більше. Перевага замкненої конструкції пояснюється утворенням силового контуру, який забезпечує ефективний перерозподіл навантажень між стійками та поперечинами, що працюють одночасно на розтяг і стиск.

Дослідження на кручення показало ще суттєвішу різницю: для кубічної рами максимальне зміщення склало 0,2219 мм, тоді як для U-подібної – 0,7915 мм, тобто приблизно у 3,6 раза більше. Таким чином, крутильна жорсткість замкненої конструкції майже у чотири рази перевищує жорсткість відкритої, що

свідчить про критичну роль верхнього замикального поясу у формуванні просторової жорсткості станини.

Отримані результати демонструють, що форма несучої частини є визначальним фактором жорсткості й стабільності настільного верстата. Замкнена кубічна конструкція ефективно протидіє згину та крученням, забезпечує стабільність геометрії робочої зони та зменшує деформації у вузлі закріплення порталу. U-подібна конструкція, навпаки, має підвищену податливість і схильність до перекосів, що може призводити до втрати точності та підвищених вібрацій.

Окрім цього, у межах дослідження продемонстровано повний цикл налагодження верстата: створення САМ-програми, генерація G-коду, підключення до контролера FluidNC через Wi-Fi та запуск керуючої програми через веб-інтерфейс. Це підтвердило можливість автономної роботи верстата без застосування зовнішнього ПК та зручність керування.

Таким чином, результати моделювання та експериментального налагодження підтверджують доцільність застосування замкненої кубічної компоновки станини, а також ефективність прийнятих конструктивних і технічних рішень. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації конструкції верстата та розробки аналогічних малогабаритних верстатів з підвищеною жорсткістю і точністю.

5. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1. Постановка лабораторної роботи «Настільний фрезерний верстат з комп'ютерним керуванням»

У рамках створеного настільного фрезерного верстата порталного компоновання передбачається можливість його використання як навчального технічного засобу для ознайомлення студентів з принципами роботи обладнання з числовим програмним керуванням. Компактність конструкції, наявність повноцінної системи приводів та доступність програмного інтерфейсу дозволяють використовувати верстат для виконання лабораторних робіт, спрямованих на відпрацювання навичок підготовки управляючих програм та базових технологічних операцій фрезерування.

Метою лабораторної роботи є формування практичного уявлення про структуру настільного фрезерного верстата, його основні системи та порядок взаємодії між апаратною частиною й програмним забезпеченням. Студент у процесі виконання роботи має ознайомитися із конструкцією приводів координатних переміщень, принципами роботи кульково-гвинтових передач, системою керування та алгоритмом запуску технологічного процесу.

Виконання лабораторної роботи передбачає виконання послідовності операцій, необхідних для підготовки верстата до обробки. До основних етапів належать: увімкнення та перевірка працездатності приводів, встановлення інструмента, визначення нульових точок, підготовка або імпорт управляючої програми у форматі G-кодів, виконання пробного холостого прогону та подальше фрезерування тестової деталі з малотвердої заготовки. Після виконання обробки студент повинен провести контроль розмірів, оцінити точність позиціонування та зробити висновки щодо роботи механічної та електричної частин установки.

Порядок виконання лабораторної роботи:

1. Ознайомитись з технікою безпеки при роботі з верстатом.
2. За виданим викладачем креслеником створити 3Д-модель.
3. По створеній 3Д-моделі створити керуючу програму для обробки деталі.
4. Експортувати G-код, для подальшого запуску на верстаті.
5. Підготувати верстат до роботи. Увімкнути подачу живлення на систему керування верстата та переконатися у відсутності перешкод у зоні переміщення рухомих частин.
6. Встановити та закріпити заготовку на робочому столі верстата.
7. Встановити та закріпити необхідний інструмент.
8. Виконати процедуру «Homing» через веб-інтерфейс контролера FluidNC.
9. Задати нульову точку деталі.
10. Запустити G-код через веб-інтерфейс контролера FluidNC.
11. Після завершення обробки вимкнути шпиндель і звільнити заготовку.
12. Провести вимірювання основних розмірів тестової деталі.
13. Оцінити відхилення отриманих розмірів від номінальних.
14. Зробити висновок про точність верстата.
15. Оформити звіт.

Практичне застосування лабораторної роботи дає змогу дослідити поведінку невеликого порталного фрезерного комплексу в реальних умовах експлуатації, оцінити взаємодію конструктивних підсистем та визначити чинники, що впливають на точність і стабільність процесу обробки. Використання настільного фрезерного верстата у навчальних цілях забезпечує можливість моделювання типової виробничої ситуації в умовах навчальної лабораторії та дозволяє набути практичних навичок роботи з ЧПК-обладнанням без необхідності застосування промислових верстатів.

5.2. Охорона праці при роботі на настільному верстаті

Експлуатація настільного фрезерного верстата з комп'ютерним керуванням передбачає взаємодію оператора з рухомими механічними вузлами, обертальним шпинделем та електронними компонентами, що вимагає дотримання комплексу заходів безпеки. Незважаючи на малогабаритність конструкції, верстат відноситься до обладнання підвищеної небезпеки через наявність високошвидкісного різального інструмента, силових приводів та електроживлення мережі 220 В.

Перед початком роботи оператор повинен виконати зовнішній огляд обладнання і переконатися у відсутності механічних пошкоджень, порушень ізоляції кабелів, ослаблених з'єднань та сторонніх предметів у зоні обробки. Особлива увага приділяється фіксації заготовки, кріпленню інструмента в цанговому затискачі шпинделя та роботі кінцевих вимикачів. Робоча зона повинна бути очищена від стружки та пилу, робочий стіл – вільний від предметів, що можуть потрапити під портал або інструмент.

Під час роботи забороняється виконувати будь-які дії у зоні переміщення порталу, торкатися шпинделя або заготовки під час обертання інструмента, а також проводити очисні або вимірювальні операції без повної зупинки верстата. Оператор знаходиться поза траєкторією можливого вильоту стружки та використовує захисні окуляри. Одяг повинен бути щільно зафіксований, без вільних елементів, які можуть бути захоплені обертовими частинами. Забороняється втручатися у роботу електронних блоків або здійснювати підключення/відключення кабелів при ввімкненому живленні.

Електробезпека забезпечується за рахунок захисного заземлення корпусних елементів, використання цілісних ізольованих кабелів та підключення верстата через автоматичний вимикач. Блок живлення, контролер та силова електроніка мають бути розташовані в закритій зоні, недоступній для попадання стружки, вологи та охолоджувальної рідини. Монтаж та ремонт

електричної частини допускається виконувати лише при повному відключенні живлення.

Забороняється проводити обробку матеріалів із підвищеним пилоутворенням або легкозаймистих матеріалів без контролю режимів різання та достатньої вентиляції. У разі появи стороннього шуму, підвищених вібрацій або запаху перегріву верстат негайно необхідно зупинити. Для аварійного відключення використовується кнопка екстреної зупинки, яка знаходиться у прямій досяжності оператора.

Після завершення обробки подається команда на зупинку шпинделя та повернення в початкову позицію. Після повної зупинки інструмента виконується очищення робочої зони за допомогою щітки або пилососа. Забороняється використовувати стиснене повітря для очищення зони різання, оскільки це сприяє розповсюдженню дрібних абразивних частинок та потраплянню їх у напрямні. Після очищення верстат відключається від живлення.

Дотримання зазначених вимог забезпечує безпечну експлуатацію настільного фрезерного верстата, знижує ризик травматизму та продовжує ресурс механічних і електронних підсистем обладнання.

5.3. Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка верстата

Вартісна оцінка виконана з метою визначення фактичної собівартості виготовлення дослідного зразка настільного фрезерного верстата та встановлення питомих витрат на основні конструктивні вузли. Розрахунок оснований на ринкових цінах комплектуючих.

До складу собівартості входять витрати на виготовлення механічної частини, систему приводів, електроніку, вузол шпинделя, а також витратні та кріпильні елементи. Механічна частина включає профільну алюмінієву раму з елементів типу V-slot, лінійні напрямні SBR з опорними блоками, кульково-гвинтові передачі з комплектами опор, робочий стіл та піддон для збору СОЖ. Приводна частина складається з чотирьох крокових двигунів типу 57BYG250С,

гнучких муфт і кронштейнів. Шпиндельний вузол представлений мотор-шпинделем потужністю 500 Вт із комплектом кріплення. Система керування містить контролер FluidNC (ESP32), драйвери двигунів, блок живлення, вимикачі та електромонтажні елементи.

Орієнтовна структура витрат на комплектуючі наведена в узагальненому вигляді. Вартість профільних елементів рами становить близько 5000 грн. Комплект напрямних SBR на три осі – приблизно 5600 грн. Три кульково-гвинтові передачі типорозміру 1204 з опорами оцінюються у 8500 грн. Крокові двигуни 57BYG250C – 3200 грн за комплект. Шпиндельний вузол – 4900 грн. Система керування (драйвери, контролер, блок живлення та монтажні елементи) формує витрати близько 6500 грн. Додаткові монтажні матеріали та кріплення – 800...1000 грн.

Сумарна вартість комплектуючих в максимальній комплектації (4 осі, лазерна головка) становить близько 60 000 грн. Окремо враховуються витрати на складання та налаштування обладнання.

Таблиця 5.1

Назва виробу	Примітка (довжина для профілю)	Кількість, шт	Сума
V-slot 20x20	420	4	800 ₴
V-slot 20x40	173	2	350 ₴
V-slot 20x80	500	8	2400 ₴
V-slot 40x40	200	4	1200 ₴
Кутник 20x20		20	176 ₴
Сухар пазовий 20xM5		100	490 ₴
Кроковий двигун 57BYG250C 1.8Нм		4	3200 ₴
Драйвер крокового двигуна DM556		4	2600 ₴
6x CNC Controller for FluidNC		1	2000 ₴
Блок живлення 24В 25А 600Вт		1	1 749 ₴

Кінець таблиці 5.1

Назва	Примітка (довжина для профілю)	Кількість, шт	Сума
Мотор-шпиндель		1	4 900 ₴
Лазерна головка		1	5 111 ₴
Кнопка аварійної зупинки YJ139-LA38		1	120 ₴
Кінцевий вимикач V-156-1C25		4	100 ₴
Корпус для гайки ШВП SFU1204 (22мм)		4	680 ₴
Гвинт ШВП 1204		4	1 900 ₴
Гнучка кулачкова муфта 8x8 D20		4	880 ₴
Опора ШВП гвинта BF10		4	1 520 ₴
Опора ШВП гвинта BK10		4	2 200 ₴
Лінійні напрямні SBR10		4	2 982 ₴
Підшипник лінійний SBR10UU		12	2 652 ₴
Гайка КГП SFU 1204		4	2 800 ₴
Поворотна вісь з ремінною передачею		1	10 500 ₴
Віброопора OB-60 GB Pro M6		4	540 ₴
		Сумарно:	51 850 ₴

5.4. Розробка рекомендацій по подальшому удосконаленню верстата

Аналіз конструкції настільного фрезерного верстата та результати моделювання просторової жорсткості дозволяють визначити низку напрямів, у межах яких доцільне подальше удосконалення обладнання. Поліпшення можуть бути спрямовані на підвищення точності позиціонування, збільшення жорсткості несучих елементів, підвищення стабільності роботи шпинделя та розширення функціональних можливостей системи керування.

Підвищення жорсткості конструкції доцільно реалізувати через заміну напрямних типу SBR на профільні напрямні з вищими характеристиками жорсткості та меншою деформацією при поперечних навантаженнях. Встановлення збільшених за перерізом поперечок порталу або застосування суцільних з'єднувальних елементів дозволяє знизити прогини під дією сил різання, особливо у верхній частині рами. Використання демпфувальних підкладок між станинами та опорною поверхнею може зменшити передачу вібрацій і підвищити стабільність процесу обробки.

У приводній частині можливе впровадження двигунів зі зворотним зв'язком, зокрема крокових двигунів із встановленими енкодерами або компактних серводвигунів типорозміру NEMA 23. Це забезпечує компенсацію втрат кроків, стабілізацію переміщень та підвищення повторюваності.

У шпиндельному вузлі можливим напрямом удосконалення є встановлення шпинделя більшої потужності з розширеним діапазоном цанг (ER11/ER16), що підвищує стабільність різання при роботі з твердими матеріалами. Для збільшення ресурсу і зниження нагріву шпиндель може бути замінений на модель з водяним охолодженням. Перехід від ШІМ-регулювання до частотного перетворювача забезпечує точніше регулювання обертів і стабілізацію моменту при зміні навантажень.

У системі керування доцільним є розширення функцій контролю за робочими параметрами – температурою приводів та шпинделя, струмом

споживання та станом кінцевих вимикачів. Можливим удосконаленням є встановлення зовнішнього сенсорного модуля керування, що дозволяє працювати без підключення до ПК. Використання датчика контактного нульового базування (touch probe) спрощує калібрування інструмента та покращує точність позиціонування по осі Z.

Перспективним напрямом модернізації є інтеграція системи подачі змащувально-охолоджуючої рідини. Конструкція верстата вже містить піддон для збору ЗОР, що дозволяє реалізувати подачу рідини без істотних конструктивних змін. Встановлення форсунки з регульованою витратою та компактного насоса забезпечить охолодження зони різання, стабільний відвід стружки та підвищення ресурсу інструмента при обробці металів. Наявність готової системи відведення дозволяє реалізувати циркуляційний цикл подачі ЗОР і розширити технологічні можливості верстата без суттєвого ускладнення конструкції.

Зазначені заходи можуть виконуватися поетапно, без повного перегляду конструкції верстата. Комплексна модернізація окремих вузлів дозволяє підвищити технічний рівень обладнання, зменшити вплив деформацій на точність обробки та розширити область застосування верстата в навчальних і дослідницьких задачах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації виконано комплексне дослідження, спрямоване на створення та удосконалення настільного фрезерного верстата портального компонування з підвищеною жорсткістю, точністю та функціональністю. На основі проведеного аналізу сучасних тенденцій розвитку машинобудування та малогабаритних верстатів з ЧПК було сформовано технічні вимоги до нового зразка, визначено напрямки модернізації та обґрунтовано вибір ключових конструктивних рішень.

У роботі розроблено удосконалену конструкцію настільного фрезерного верстата на основі алюмінієвого профілю V-slot, що забезпечує модульність, ремонтпридатність та низьку собівартість. Запропонована конструкція доповнена двома робочими столами, можливістю встановлення четвертої поворотної осі та ручною зміною робочого органу (мотор-шпиндель / лазерна головка). Застосування кульково-гвинтових передач, лінійних напрямних та крокових двигунів високого моменту забезпечує необхідний рівень точності позиціонування та стабільності роботи.

Проведені розрахунки підтвердили правильність вибору режимів різання, параметрів приводів і гвинтових передач. Розроблена система керування на базі контролера FluidNC та драйверів DM556 забезпечує автономну роботу верстата, дистанційне керування через Wi-Fi та зручність налаштування. Обґрунтовано вибір мікрокроку, робочого струму двигунів, логіки кінцевих вимикачів і побудовано структурну схему електричних з'єднань.

У дослідницькому розділі виконано моделювання пружно-напруженого стану станини для двох варіантів її компоновки. Чисельні результати показали, що замкнена кубічна структура має суттєво більшу жорсткість порівняно з відкритою U-подібною конструкцією, що дозволяє зменшити прогини майже удвічі та знижує чутливість до скрутних навантажень. Отримані результати підтверджують правильність вибору остаточного конструктивного рішення.

У роботі наведено приклад налагодження верстата на реальну обробку деталі: створення САМ-програми, генерацію G-коду, передачу файлу на контролер через Wi-Fi та запуск обробки у веб-інтерфейсі. Демонстровано готовність системи керування до практичного застосування та можливість автономної роботи без постійно підключеного ПК.

Виконано вартісну оцінку виготовлення удосконаленого зразка, яка підтвердила економічну доцільність запропонованої конструкції та можливість її впровадження як у навчальний процес, так і у практичне використання в малих виробничих умовах. Розроблено рекомендації щодо подальшої модернізації – інтеграції системи подачі СОЖ, підвищення потужності шпинделя та встановлення додаткової осі обробки.

Отримані результати свідчать про технічну та наукову значущість роботи. Розроблений верстат має перспективи подальшого виготовлення та впровадження у лабораторію малогабаритного обладнання кафедри конструювання машин, а також планується до реалізації на підприємстві ТОВ «КБ «ЛОГІКА». Створена технічна концепція та результати дослідження можуть бути використані для подальшої оптимізації верстатних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3018-PROVer Semi Assembled CNC Router Kit. *SainSmart.com*. URL: <https://www.sainsmart.com/products/sainsmart-genmitsu-cnc-router-3018-prover-kit> (дата звернення: 18.11.2025).
2. Cheng L., Smith R. Digital Twin in Small CNC Machines // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2022. — Vol. 119. — P. 1401–1415.
3. CNC Router High-Z T-Series - 1a milling with best precision. *CNC-STEP.com - CNC Machine Manufacturer*. URL: <https://www.cnc-step.com/cnc-router/> (дата звернення: 18.11.2025).
4. Creality. *creality*. URL: <https://www.creality.com/products/creality-cp-01-3d-printer> (дата звернення: 18.11.2025).
5. Hesselbach J., Huang S. Micro-Milling Machine with Parallel Kinematics // *Precision Engineering*. — 2020. — Vol. 66. — P. 180–192.
6. Hutter M., Hoffmann M. Sensor-Based Compensation Systems for Precision Micro Machines // *Mechatronics*. — 2020. — Vol. 74. — P. 102–114.
7. Kim J., Ishii K. Piezoelectric Actuator-Based Micro CNC Milling Machine // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. — 2021. — Vol. 31(9). — P. 095005.
8. Lee J.H., Choi S. Smart Desktop CNC Machine for Engineering Education // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21(15). — P. 5142.
9. Snapmaker - Best 3D Printer, Laser Engraver, CNC Carver for Sale. *Snapmaker*. URL: <https://shop.snapmaker.com> (дата звернення: 18.11.2025).
10. Yadav R., Patel N. Use of Additive Manufacturing in Small-Scale Machine Tool Structures // *Procedia Manufacturing*. — 2020. — Vol. 48. — P. 91–98.
11. Zhao W., Wang Y. AI-Driven Adaptive Control in Compact CNC Systems // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2023. — Vol. 70(4). — P. 4123–4135.

12. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: В 3-х частинах. За ред. Ю.М. Кузнєцова /автор Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Кіріченко А.М. та інші. Кіровоград, 2003. — ч.1 — 422с.
13. Віброопора OB-60 GB Pro / D=60 / M6x85 - купити за найкращою ціною в Україні від заводу-виробника "Компанія "GB TRADE" (ГБ ТРЕЙД)" - 1822877495. "Компанія "GB TRADE" (ГБ ТРЕЙД)" - виробник віброопор, кабельканалів та інших запчастин для обладнання та техніки. URL: <https://gb-trade.com.ua/ua/p1822877495-vibroopora-pro-d60.html> (дата звернення: 18.11.2025).
14. Горун П.М., Слободян І.Й. Розробка конструкцій настільних фрезерних верстатів із ЧПК // Вісник НУ «Львівська політехніка». — 2022. — № 3. — С. 56–62.
15. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. – Електронні текстові дані – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/50c7ca2b-c60b-4db9-bd53-738420847db4/content> (дата звернення: 18.11.2025).
16. Кириченко О. С. Промислові революції та теоретичне узагальнення тенденцій розвитку / О. С. Кириченко // Вісник Одеського національного університету. Серія : Економіка. - 2019. - Т. 24, Вип. 3. - С. 37-40. - URL: https://library.krok.edu.ua/media/library/category/statti/kyrychenko_0009.pdf (дата звернення: 18.11.2025).
17. Кінцеві опори ШВП ВК-BF10 (ID#2045914493), ціна: 1081 ₴, купити на Prom.ua. URL: <https://prom.ua/ua/p2045914493-kintsevi-opori-shvp.html> (дата звернення: 18.11.2025).

18. Костенко В.М., Бурлака С.П. Оптимізація конструкцій малогабаритних верстатів для навчальних цілей // Вісник НТУ «ХПІ». — 2021. — № 48. — С. 47–54.
19. Кроковий двигун 57BYG250C 1.8 Нм. URL: <https://cnc-market.in.ua/products/23744326> (дата звернення: 18.11.2025).
20. Кузнецов Ю.Н. Пирамидальные каркасные компоновки станков с параллельной кинематикой на модульном принципе. / Ю.Н. Кузнецов , Г.Е. Деневиц , Д.А. Дмитриев , В.Б. Фиранский //Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник праць. – Краматорськ, вип. №24, 2009. – 348 с. С.126-132
21. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування // Зб. наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції «Вища освіта - 2006». – К.; НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. – с. 45-55.
22. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І., Гао Сінмінь Технологічне оснащення фрезерних верстатів: проектування, теорія, практика: Монографія-Луцьк: Вежа-Друк, 2023.-292 с.ISBN 978-966-940-449-7
23. Настільний фрезерний верстат з ЧПК Сокіл 3040. Верстат з ЧПК для бізнесу та майстерні - CNC Machines. *CNC Machines*. URL: <https://cncmachines.com.ua/uk/product/sokol-3040/> (дата звернення: 18.11.2025).
24. Опорна напрямна SBR10*1000L. URL: <https://3dtrade.net/uk-ua/parts/p2959.html> (дата звернення: 18.11.2025).
25. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с., URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/268924262.pdf> (дата звернення: 18.11.2025).
26. Поворотна вісь з ремінною передачею 1:4. URL: <https://cnc-market.in.ua/products/0105444> (дата звернення: 18.11.2025).

27. Потужний лазер для різання гравіювання 40 Вт 450 нм LT-40W-A-Gold (ID#1738790769), ціна: 5192.25 ₪, купити на Prom.ua. *prom.ua*. URL: <https://prom.ua/ua/p1738790769-moschnyj-lazer-dlya.html> (дата звернення: 18.11.2025).
28. Ривак, Н. 2022. Світові тенденції технологічної трансформації машинобудівної промисловості. Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки. 1, 29 (квітень 2022), 76–86. DOI: <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2022-01-76-86> (дата звернення: 18.11.2025).
29. Степаненко О.О. Синтез малогабаритних фрезерних верстатів з комп'ютерним керуванням. Автореферат дис. канд. техн. наук. -К.:2014.-14с.
30. Технічна документація на малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування мод. НФПФЗ-01
31. Фреза кінцева 8 мм Z-4 P6M5 ТБ з циліндричним хвостовиком. Захищена сторінка. URL: <https://metalorez.com.ua/ua/p1437527343-freza-kontsevaya-r6m5.html> (дата звернення: 18.11.2025).
32. Фрезерний верстат JET JMD-X1L. URL: <https://jet-ukraine.com.ua/ua/frezernyy-verstat-jet-jmd-x1l> (дата звернення: 18.11.2025).
33. Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК \"SMART Light\" URL: <https://smarcnc.in.ua/frezerniy-verstat-chpk-smart-lite-400x600.html> (дата звернення: 18.11.2025).
34. ШВП 1204 700 мм купити. Ціна на ШВП 1204 700 мм в Києві та Україні в компанії Mtech. *MTech*. URL: <https://mtech.com.ua/uk/product/shvp-1204-700-mm/> (дата звернення: 18.11.2025).
35. Шпиндель OEM 500 Вт для ЧПУ верстата + хомут + БП з регулятором обертів URL: <https://rozetka.com.ua/ua/161333999/p161333999/> дата звернення: 18.11.2025).
36. 6x CNC Controller. URL: http://wiki.fluidnc.com/en/hardware/official/6x_CNC_Controller дата звернення: 18.11.2025).

37. Autodesk Inventor Software | Get Prices & Buy Official Inventor 2026. Access Denied. URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview> (дата звернення: 18.11.2025).
38. Autodesk Inventor CAM Software | Get Prices & Buy Official Inventor CAM 2025. Autodesk | 3D Design, Engineering & Construction Software. URL: https://www.autodesk.com/products/inventor-cam/overview?us_oa=dotcom-us&us_si=9cc63e2c-269c-4744-9921-d918aeaf818c&us_st=inventor%20cam&us_pt=INVCAM (дата звернення: 18.11.2025).

ДОДАТОК А. Технічне завдання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконавчий директор
ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

П.П. Бусол

09 2025р.



ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на проектно-конструкторську роботу

«СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НАСТІЛЬНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА
ПОРТАЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ»

Замовник:

Виконавчий директор
ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

П.П. Бусол

Технічний директор

А.С. Комков

Виконавець:

Завідувач кафедри КМ

Ю.М. Данильченко

д.т.н., інженер, професор кафедри КМ

Ю.М. Кузнецов

Студент II курсу групи МК-41 мп

І.Р. Кобець

Київ 2025

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Повна назва розробки та її умовне позначення

«Універсальний настільний 4-х координатний верстат»

1.2 Назви підприємств розробника та замовника системи та їх реквізити

Замовник: ТОВ "КБ "ЛОГІКА"	Виконавець: Кафедра конструювання машин КПІ ім. Ігоря Сікорського
адреса: 09113, Київська обл. м. Біла Церква, вул Січневий прорив, 43 В	адреса: 03056, м.Київ, Берестейський проспект, 37, корпус 1, кімната 232

1.3 Порядок оформлення та пред'явлення замовникові результатів робіт

По закінченню роботи передається: кресленик загального вигляду, специфікація, 3D-модель розробленого верстату, результати теоретичних або експериментальних досліджень верстата.

2. МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ

2.1 Мета створення розробки

Розробити конструкцію універсального настільного 4-х осьового верстату.

2.2. Вихідні дані:

- оброблюваний матеріал – дерево, пластик, текстоліт, бронза, алюміній, кольорові метали, друковані плати
- розміри робочої зони – не менше 300x300x80 мм;
- виконувані функції – фрезерування, лазерне гравіювання.

3. ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Середовище розробки 3D моделей та креслеників – Autodesk Inventor.
Кресленики виконати згідно технічних вимог підприємства.
Система ЧПК – типу CNC.

4. ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Етап та його зміст	Термін виконання	Результат
1. Розробка концептуальної моделі верстата: визначити компоновання, принцип дії та базові вузли. Створити попередню 3D-модель основних елементів конструкції (рама, портал, робочий стіл, приводні системи)	14.09.2025	3D-модель верстата в середовищі Autodesk Inventor
2. Конструювання вузлів та створення робочої 3D-моделі: розробити деталізовану 3D-модель верстата з урахуванням габаритних обмежень, типу ЧПК, та вибраних матеріалів.	28.09.2025	3D-модель верстата в середовищі Autodesk Inventor
3. Розрахунково-аналітичні або експериментальні дослідження: Провести попереднє дослідження напружено-деформованого стану верстата.	12.10.2025	результати попередніх досліджень напружено-деформованого стану
4. Оформлення та передача результатів роботи замовникові: Підготувати комплект конструкторської документації відповідно до вимог підприємства	25.10.2025	кресленик загального вигляду, специфікацію, повну 3D-модель верстата, результати досліджень і короткий технічний опис.

5. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті виконання проектно-конструкторської роботи очікується отримання:

- Конструктивної 3D-моделі настільного фрезерного верстата порталного компоновання з ЧПК, виконаної в середовищі Autodesk Inventor.
- Комплекту технічної документації, що включає кресленик загального вигляду, основні вузли та специфікацію відповідно до вимог підприємства.
- Обґрунтованих теоретичних розрахунків або експериментальних даних, що підтверджують працездатність розробленої конструкції.
- Аналітичного опису конструктивних особливостей верстата та його функціональних можливостей.
- Рекомендацій щодо подальшого впровадження розробки або її доопрацювання у рамках магістерської дисертації.

6. МАТЕРІАЛИ, ЩО НАДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

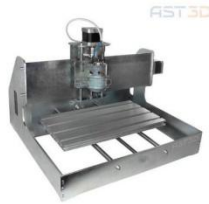
- кресленик загального вигляду розробленого верстату
- специфікація
- 3D-модель розробленого верстату
- результати попередніх досліджень напружено-деформованого стану

7. ПОРЯДОК РОЗГЛЯДУ ТА ПРИЙМАННЯ РОБОТИ

Результати роботи передаються по акту приймання робіт.

ДОДАТОК Б. Малогабаритне обладнання з ЧПК

«Малогабаритне обладнання з ЧПК» Верстати портального компонування з рухомим столом



ЧПУ фрезерний верстат AST3D 2418 RIO



SainSmart Genmitsu 3018-PRO Ver



Mini CNC Router 1310

Верстати портального компонування з рухомим порталом



Міні фрезерний верстат з ЧПК "CNC-90-50 mini"



"Simple" Фрезерний верстат з ЧПУ 400×600×100

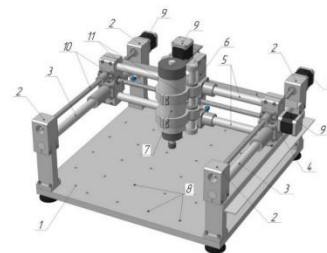


CNC Router of the High-Z T-Series

Багатофункціональне обладнання з ЧПК



Фрезерний гравірувальний верстат із ЧПК "SMART Light"



Настільний фрезерний верстат НФПФ3-01

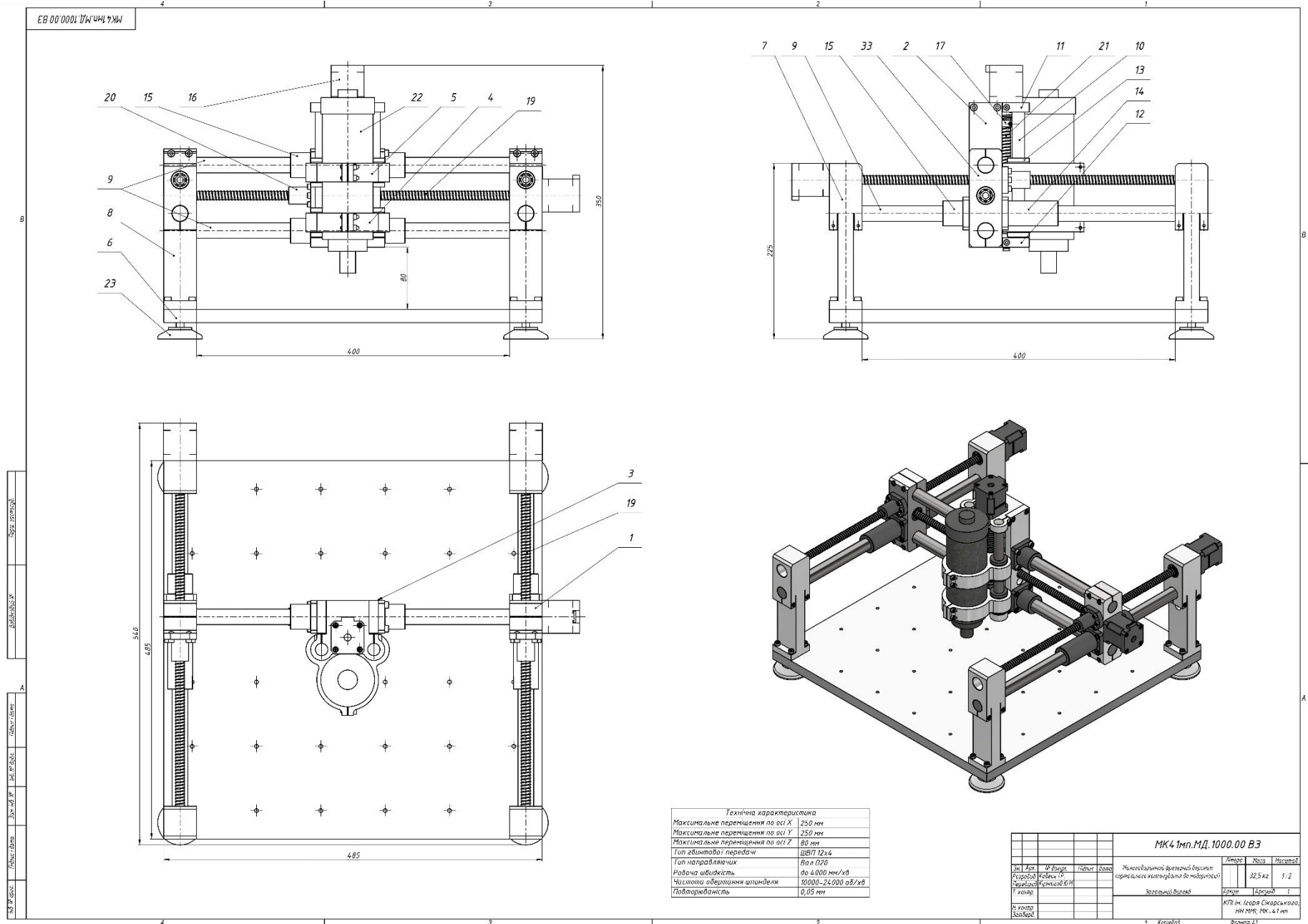


Фрезерний верстат JET JMD-X1L

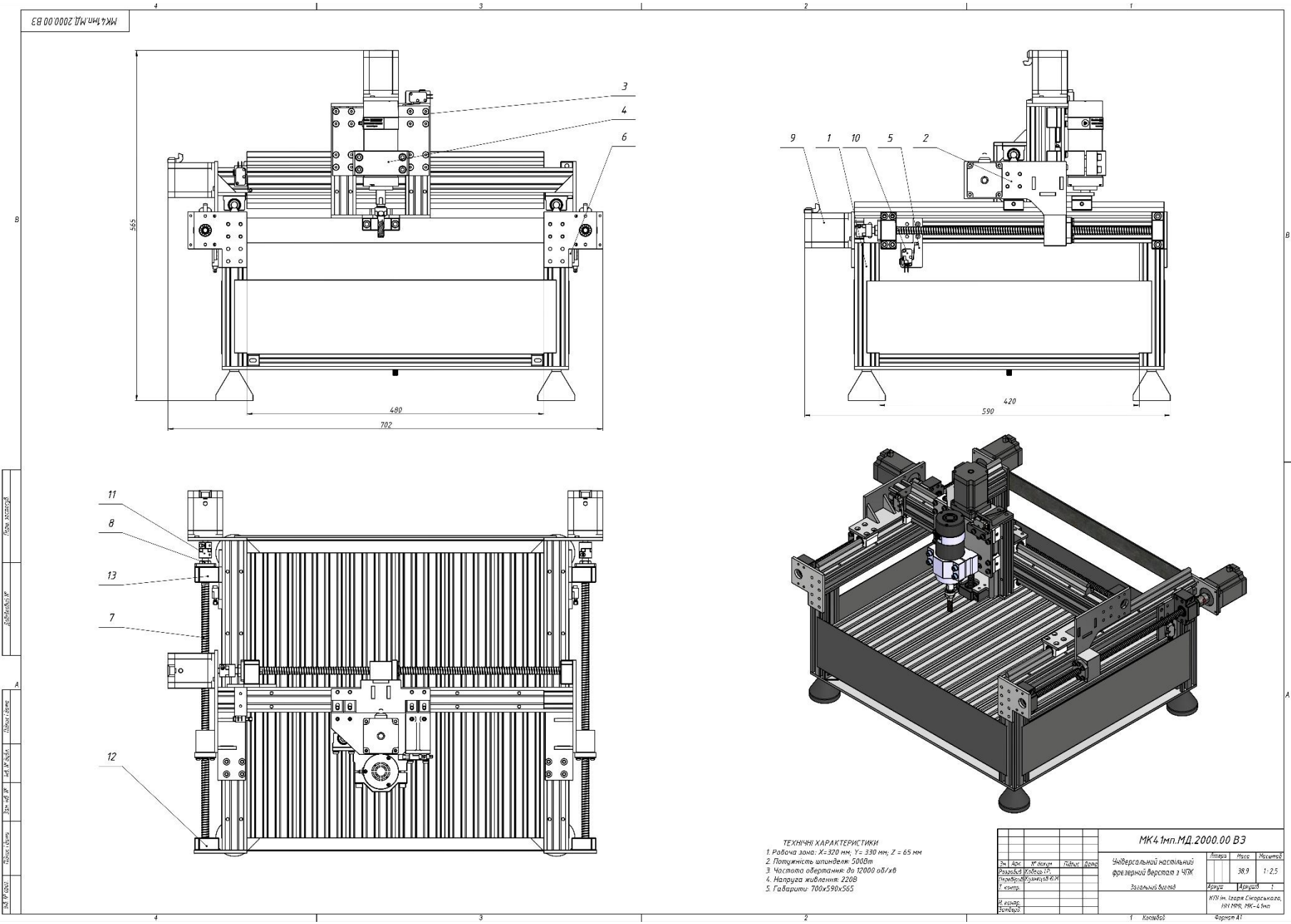
Виконав Кобець І.Р. _____

Перевірив Кузнецов Ю.М. _____

ДОДАТОК В. Малогабаритний фрезерний верстат порталного компонування до модернізації



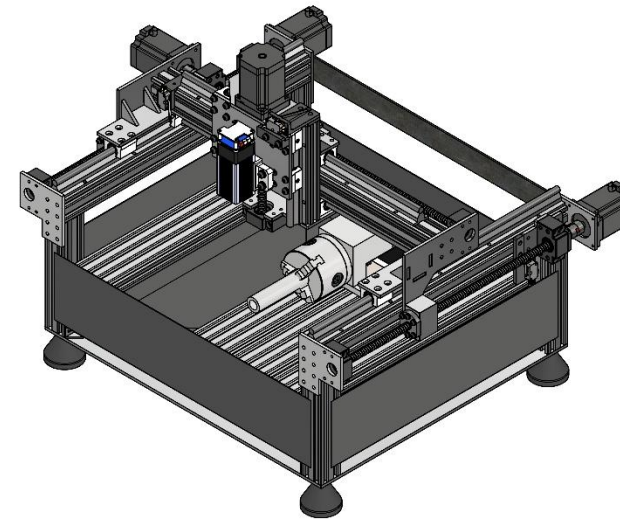
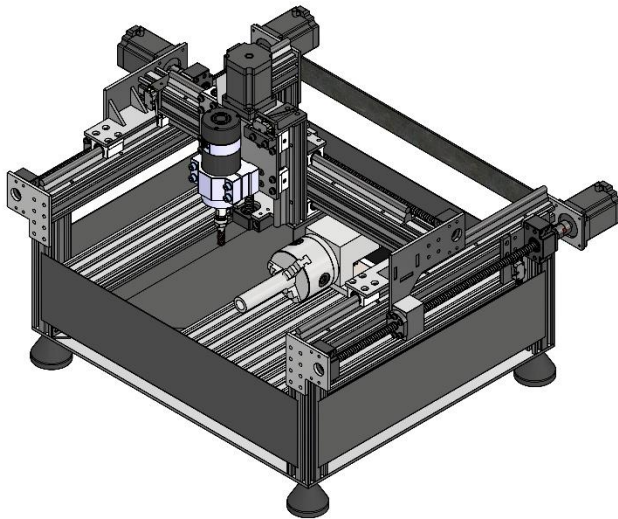
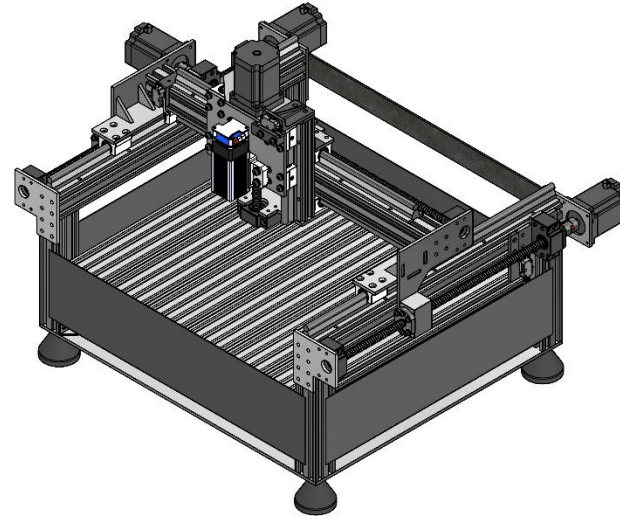
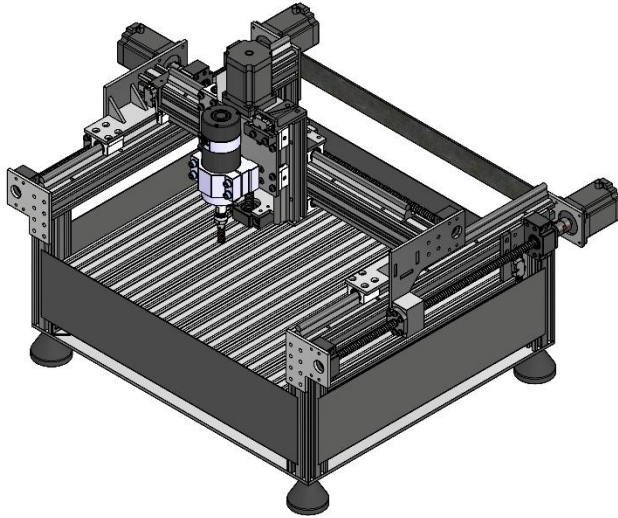
ДОДАТОК Д. Загальний вигляд настільного фрезерного верстата портального компонування після модернізації



**ДОДАТОК Е. Специфікація настільного фрезерного верстата порталного
компонування після модернізації**

Формат Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	При- мітка
			<u>Документація</u>		
A1		МК4 1мп.МД.2000.00 ВЗ	Кресленник загального вигляду	1	
			<u>Складальні одиниці</u>		
A4	1	МК4 1мп.МД.2100.00	Станина	1	
A4	2	МК4 1мп.МД.2200.00	Портал	1	
A4	3	МК4 1мп.МД.2300.00	Картека Х	1	
A4	4	МК4 1мп.МД.2400.00	Каретка У	1	
			<u>Деталі</u>		
БК	5	МК4 1мп.МД.2000.01	Кріплення кінцевика ліве	1	
БК	6	МК4 1мп.МД.2000.02	Кріплення кінцевика праве	1	
АЗ	7	МК4 1мп.МД.2000.03	Гвинт У	2	
			<u>Стандартні вироби</u>		
	8		Гайка шестигранна ДСТУ EN ISO 4032:2022 - M10	2	
МК4 1мп.МД.2000.00					
	Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата
Інв. № ориг.	Розробив		Кобець І.Р.		
	Перевірів		Кузнєцов Ю.М.		
	Н.контр				
	Затверд.				
			Універсальний настільний фрезерний верстат з ЧПК		
			Копював		
			Формат А4		
			Літера		
			Аркуш		
			Аркуші		
			1		
			2		
			КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ, МК-4 1мп		

ДОДАТОК Ж. 3D-вигляд модернізованого верстата

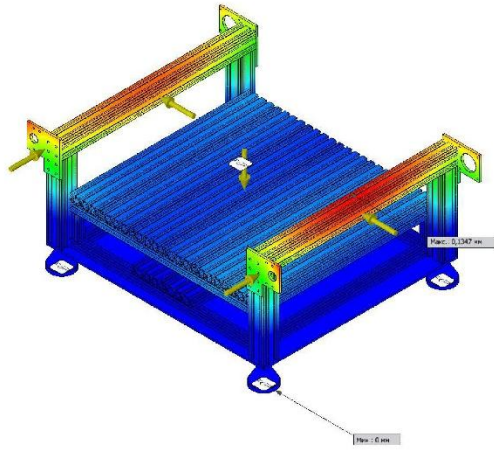


ДОДАТОК К. Результати моделювання пружно-напруженого стану несучої системи верстата

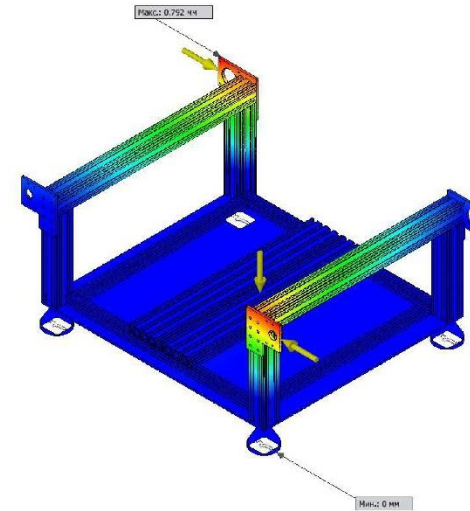
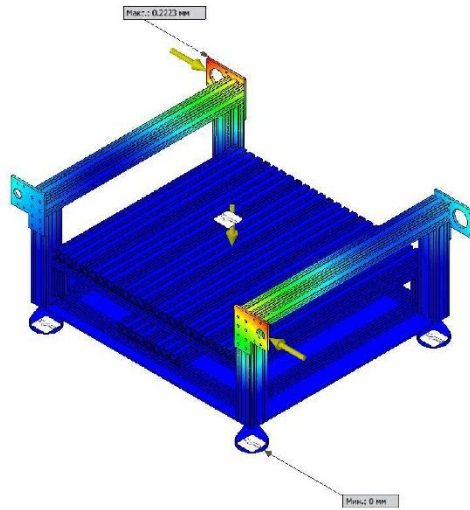
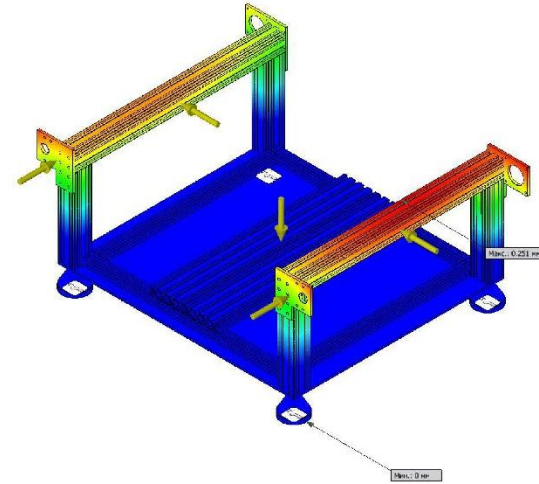
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНО-НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НЕСУЧОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КУБІЧНОЇ ТА U-ПОДІБНОЇ КОМПОНОВОК

Мета моделювання: оцінити вплив геометричної форми станини на жорсткість конструкції при дії сил різання

Кубічна схема (замкнута рама)



U-подібна схема (відкрита рама)

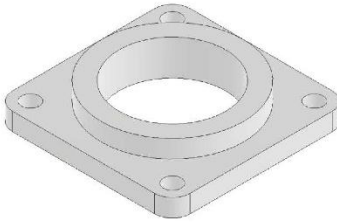


Виконав: Кобець І.Р. _____
Перевірив: Кузнецов Ю.М. _____

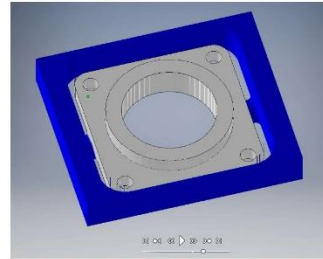
ДОДАТОК Л. Приклад налагодження верстата на обробку деталі

ПРИКЛАД НАЛАГОДЖЕННЯ ВЕРСТАТА НА ОБРОБКУ ДЕТАЛІ

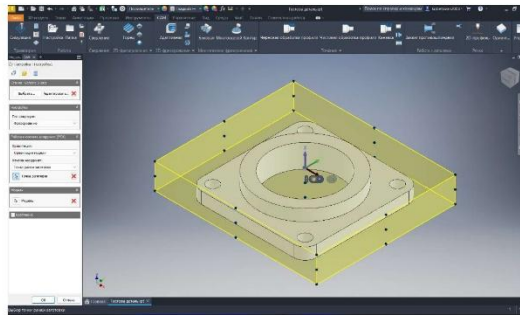
1. 3D-модель оброблюваної деталі



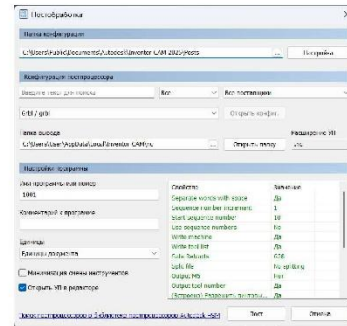
4. Відрізання деталі від заготовки за допомогою стратегії «2D-контур»



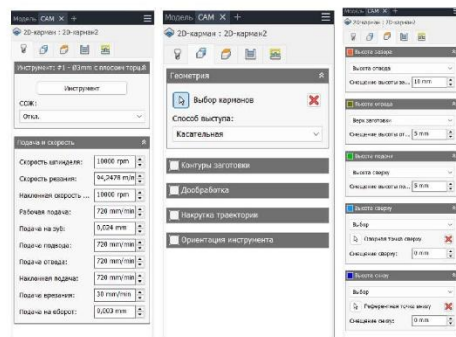
2. Створення заготовки



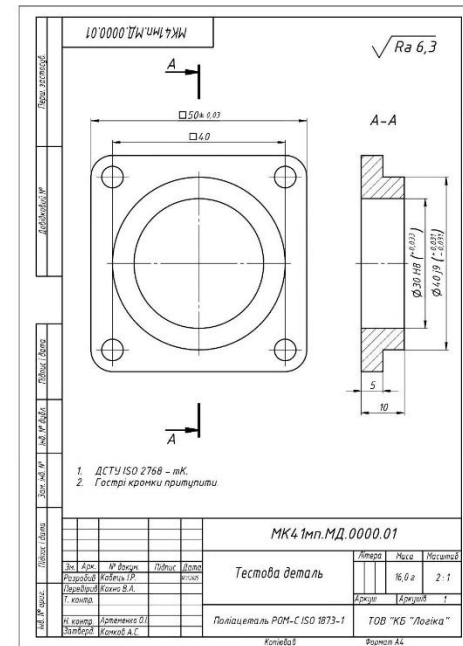
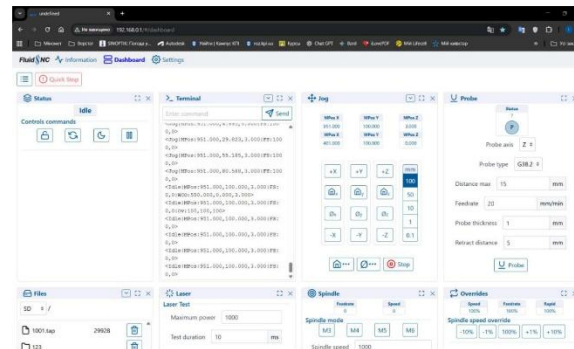
5. Експорт NC-файлу



3. Вибір і налаштування стратегії обробки



6. Запуск NC-файлу через веб-інтерфейс верстата



Виконав: Кобень І.Р. _____

Перевірив: Кузисцов Ю.М. _____

ДОДАТОК М. Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка

Вартісна оцінка виготовлення удосконаленого зразка

Назва	Примітка	Кількість, шт	Ціна	Сума	Посилання
V-slot 20x20	420 мм	4	193.12 грн/м	800 ₴	https://alumarket.com.ua/uk/stanochnyj-profil-20x20-v-slot
	480 мм	4			
V-slot 20x40	173 мм	2	330.76 грн/м	350 ₴	https://alumarket.com.ua/uk/stanochnyj-profil-20x40-v-slot
V-slot 20x80	500 мм	8	596.90 грн/м	2 400 ₴	https://alumarket.com.ua/uk/stanochnyj-profil-20x80-v-slot
V-slot 40x40	200 мм	4	506.36 грн/м	1 200 ₴	https://alumarket.com.ua/uk/stanochnyj-profil-40x40-v-slot
	500 мм	2			
	574 мм	1			
Кутник 20x20		20	8,80 ₴	176 ₴	https://altd.com.ua/product/kutovij-ziednuvach-20h20-dlja-verstatnogo-p/
Сухар пазовий 20xM5		100	4,90 ₴	490 ₴	https://altd.com.ua/product/suhar-pazovij-20hm5-paz-6mm/
Кроковий двигун 57BYG250C 1.8Нм		4	800,00 ₴	3 200 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/23744326
Драйвер крокового двигуна DM556		4	650,00 ₴	2 600 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/2556201
6x CNC Controller for FluidNC				2 000 ₴	https://www.elecrow.com/6x-cnc-controller-for-fluidnc.html
Кнопка аварійної зупинки YJ139-LA38		1	120,00 ₴	120 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24591592
Кінцевий вимикач V-156-1C25		4	25,00 ₴	100 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/31838122
Блок живлення 24В 25А 600Вт		1	1 749,00 ₴	1 749 ₴	https://prom.ua/ua/p2449974254-blok-pitaniya-24v.html
Мотор-шпиндель		1	4 900,00 ₴	4 900 ₴	https://rozetka.com.ua/ua/161333999/p161333999/
Лазерна головка		1	5 111,00 ₴	5 111 ₴	https://rozetka.com.ua/ua/363623739/p363623739/
Гайка ШВП SFU 1204		4	700,00 ₴	2 800 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24116166
Корпус для гайки ШВП SFU1204 (22мм)		4	170,00 ₴	680 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24587994
Гвинт ШВП 1204	2x 500 мм 1x 600 мм 1x 200 мм	4	950 грн/м	1 900 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24052113
Гнучка кулачкова муфта 8x8 D20		4	220,00 ₴	880 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/31072015
Опора ШВП гвинта BF10		4	380,00 ₴	1 520 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24152354
Опора ШВП гвинта BK10		4	550,00 ₴	2 200 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/24152282
Лінійні напрямні SBR10	500 мм - 2 шт 175 мм - 2 шт 485 мм - 2 шт	3	994,00 ₴	2 982 ₴	https://gp-tech.com.ua/ru/lineynye-valy-i-pidshipniki/tsilindrichnij-val-na-opori/napryamnyy-liniynyy-val-na-opori-sbr10-1050mm
Підшипник лінійний SBR10UU		12	221,00 ₴	2 652 ₴	https://gp-tech.com.ua/ru/lineynye-valy-i-pidshipniki/linijni-pidshypanyky/sbr10uu-pidshypanyk-korpus
Поворотна вісь з ременною передачею		1	10 500,00 ₴	10 500,00 ₴	https://cnc-market.in.ua/products/0105444
Віброопора OB-60 GB Pro M6		4	135,00 ₴	540,00 ₴	https://surl.li/trpht
Загальна сума:				51 850 ₴	

Виконав: Кобець І.Р. _____

Перевірив: Кузнецов Ю.М. _____

ДОДАТОК Н. Робочі креслення оригінальних деталей верстата

$\sqrt{Ra\ 6,3}$ ($\sqrt{\quad}$)

МК4 Інв.МД.2000.03

Гвінт Y		Масштаб	Маса	Матеріал
		0,4	2:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1204		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Твердість робочих поверхонь: воріжок качання HRC 59-62
3. Шорсткість робочих поверхонь: воріжок качання Ra 0,8 мкм
4. Клас точності воріжок качання: С7
5. Матеріал: Сталь 45 ДСТУ 1809:2015
6. Гострі кромки притупити
7. Невказані фаски 0,5x45°

$\sqrt{Ra\ 6,3}$

МК4 Інв.МД.2310.01

Верх каретки		Масштаб	Маса	Матеріал
		18,5 г	1:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1202		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Невказані радіуси R1
3. Гострі кромки притупити

$\sqrt{Ra\ 6,3}$

МК4 Інв.МД.2310.03

Низ каретки		Масштаб	Маса	Матеріал
		62,3 г	1:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1202		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Невказані радіуси R1
3. Гострі кромки притупити

$\sqrt{Ra\ 6,3}$

МК4 Інв.МД.2400.01

Плита робочого органу		Масштаб	Маса	Матеріал
		222,7 г	1:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1202		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Невказані радіуси R1
3. Гострі кромки притупити

$\sqrt{Ra\ 6,3}$

МК4 Інв.МД.2100.03

Кріплення двигуна Y		Масштаб	Маса	Матеріал
		74,6 г	1:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1202		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Радіуси зчирлення R1
3. Гострі кромки притупити

$\sqrt{Ra\ 6,3}$

МК4 Інв.МД.2300.02

Кріплення двигуна Z		Масштаб	Маса	Матеріал
		101,7 г	1:1	
Алгоритм: алгоритм КІТІ 1202		КІТІ Ін. Ігоря Сікорського, НН МНУ, МК-4 Інв.		

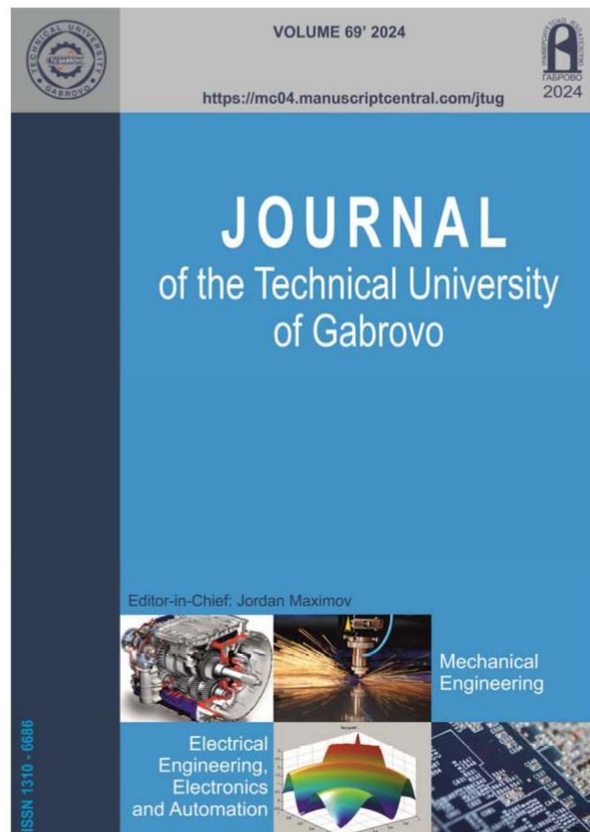
Категорія: Форма:

1. ДСТУ ISO 2768 – як
2. Невказані радіуси R1
3. Гострі кромки притупити

ДОДАТОК II. Оpubлікована стаття в «Journal of the Technical University of
Gabrovo»

Author's personal copy

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Technical University of Gabrovo. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository.



FOUR COORDINATE FLOORING LAYOUT OF PORTAL COMPOSITION

Yuryi Kuznetsov*, I.R. Kobets

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 June 2024

Accepted 1 August 2024

Keywords:

desktop milling bench, screw drive, coordinate movement drives, aggregate-modular principle, core program, modernization, module

<http://doi.org/10.62853/OXBF6930>

ABSTRACT

The article highlights the relevance and formulates the problem of creating small-sized workbenches with computer hardware, inspecting the data generators and the design of such workbenches, and proposing options for a table-top workbench with a portal layout. The example of the preparation of a folding part shows the procedure for breaking up the ceramic program.

© 2024 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

1. FORMULATION OF THE PROBLEM

Machine tool construction, as a key branch of mechanical engineering, plays an important role in the development of industry and national economies. In today's changing world, increasing competition, rapid changes in the technological landscape and the general transition to the digital industry present a number of complex tasks and opportunities to machine-building enterprises. The development of industry and its sectoral structure determine the state of the industrial and technological level of the country's economy, the efficiency of its production, stability, sustainability of development and economic independence of the state [5]. The modern progress of production technologies is constantly developing, requiring engineers and scientists to constantly search for new solutions and technologies to increase the efficiency and automation of production processes. This requires the creation of a modern laboratory research base in the educational process [7,9]. In the conditions of limited financing of higher education, it is advisable to manufacture small-sized desktop machines with computer control, which can be used both for the educational process and at enterprises for the production of small parts. Among the prospects for the development of mechanical engineering and, in particular, machine tool construction, the following can be noted [1,2]: 1) increase in processing productivity; 2) improving the quality of manufactured products; 3) reduction of costs and raw and energy resources; 4) reduction of the share of human physical labor; 5) facilitation of human intellectual work; 6) expansion of technological capabilities of the equipment. To achieve the above goals, it is necessary to implement the following recommendations [3]: optimize existing production

facilities, automate and involve advanced digital technologies to improve work processes; accelerate the implementation of technological innovations and innovation processes; to raise the qualification level of mechanical engineering workers. At the same time, scientists and entrepreneurs should continue researching the process of developing and implementing new technologies in mechanical engineering, because the use of modern technologies is becoming a necessity, which prevents the risks of losing relevance in the market of modern industry.

2. THE MAIN TASK AND THE OBTAINED WORK RESULTS

The purpose of the work is to analyze known small-sized machines and create a new one with enhanced functionality. In the modern market of tools and equipment for small and medium production, there are many manufacturers specializing in small-sized machines. This equipment is characterized by high mobility, compactness and ease of use. On the market of small-sized CNC machines, you can find such companies as PP "ANDIS-TECHNO", CNC Machines, Raptor CNC, AST3D. The "SMART Light" CNC milling engraving machine (Fig. 1) from SmartCNC is equipped with a touch screen and an autonomous controller (can work without connecting to a PC) and is perfect for working with all types of wood and soft metals. The machine is made of aluminum profile. SBR20 support shafts and SBR20UU bearings are used as guides, which ensure high accuracy and smooth movement. A ball screw pair (BSP) is used as the Z axis drive [10].

The CNC MACHINES company is a manufacturer of the Sokil 3040 CNC 3-coordinate milling machine (Fig. 2), designed for processing 2D and 3D models, as well as

* Corresponding author. E-mail: info@zmok.kiev.ua

bodies of rotation (with the 4th axis module installed). This model is characterized by high accuracy and increased processing speed, thanks to the rigid frame made of aluminum alloys. A 1.5 kW brushless motor-spindle with liquid cooling allows you to perform tasks without interruption, 24 hours a day. The machine can perform such operations as sheet material cutting, sampling, slot milling, engraving, 3D relief milling, drilling, laser engraving, rotary body milling.

Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd. is a leader in the production of consumer 3D printers on the world market [11]. The latest device Creality CP-01 (Fig. 3) with interchangeable heads is designed for 3D printing, laser engraving and milling. Each module has a universal connector and is easily replaced, and in the event of a power loss, the CP-01 has protection to continue work where it left off.

Today, you can find desktop milling machines with the following layout schemes: Vertical layout (Fig. 4). In this scheme, the machine has a vertical column on which a spindle with a drill or milling cutter is located. Such machines are equipped with a movable cross table with T-shaped grooves for installation and fixation of the workpiece, vice or other device. This scheme ensures compactness, stability and processing accuracy. Vertical machines are well suited for drilling holes or milling on vertical surfaces. The working area can be limited, making it less suitable for processing large parts.

Portal arrangement (Fig. 5), where the spindle moves along the portal (frame), which supports horizontal movement along the X and Y axes. This scheme allows for a large working space and high precision processing of large parts. Machines of this type can be with a movable portal (Fig. 5) or with a movable table (Fig. 6).



Fig. 1. "SMART Light" CNC milling engraving machine



Fig. 2. "Sokol 3040" from CNC MACHINES



Fig. 3. Creality CP-01 3D printer



Fig. 4. JET JMD-X1L milling machine



Fig. 5. CNC Router of the High-Z T-Series

In a moving gantry machine, the work tool (such as a milling cutter or other cutting tool) moves along horizontal directions on a gantry structure that supports its movement. The portal has large dimensions and allows processing large parts or large work areas. In machines with a moving table, the working tool is located on a rigid portal, and the working table, on which the processed parts are located, moves along horizontal directions. The movable table

allows for easy positioning and machining of parts, and the gantry provides stable support for the work tool.

Compact drilling and milling machines are noted for their mobility as they are easy to move around, making them ideal for small workshops or garages. They are also impressively versatile, capable of performing a variety of machining operations, including drilling, milling, cutting and other operations, yet are compact, making them ideal for confined spaces.

However, few manufacturers develop table-top milling machines that provide multi-functionality, which consists in the ability to quickly and easily replace the motor-spindle with a 3D printer print head or a laser head for sheet material cutting or engraving.

3. MACHINE DESIGN

After a thorough analysis of a significant amount of data, a patent study of similar machines and a detailed study of their design [4, 6, 8], the authors designed a desktop machine with a portal layout in various versions (Fig. 7).

The supporting frame is made of a machine-made aluminum profile of the V-slot type. This greatly simplifies and reduces the cost of the design, since such elements are standard and if any element of the frame breaks, it can be easily replaced. The machine contains two work tables. The upper one is intended for the processing of sheet material and small-sized parts, the lower one is for installing machine equipment on it (dividing head, vice) and processing larger parts. This makes it possible to process a fairly wide range of parts with a small movement of the spindle along the Z axis.

When using the lower table, several central sections of the upper table should be dismantled, and since the table consists of several profiles V-slot 20x80, then dismantling does not cause significant problems. SBR type linear guides are used as guides, which have much greater rigidity compared to ordinary round guides.



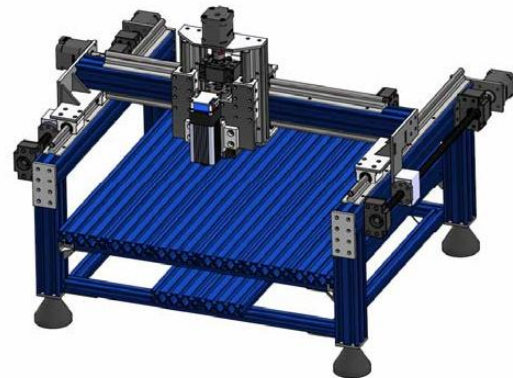
Fig. 6. SainSmart Genmitsu 3018-PROVer

Coordinate movements are carried out due to ball-screw transmissions (BSP). It should be noted that in this type of equipment, the use of a sliding screw-nut transmission is not rational, since a significant amount of chips is formed during the operation of the machine. And the sliding nut has no protection against external dirt, unlike the KGP nut. Bearings for screw pairs are manufactured by TBI MOTION (Taiwan) using radial thrust bearings manufactured by NSK. If you attach the screw directly to the stepper motor, the shaft of the KGP can move along the axis, which will not ensure accuracy. Using bearing

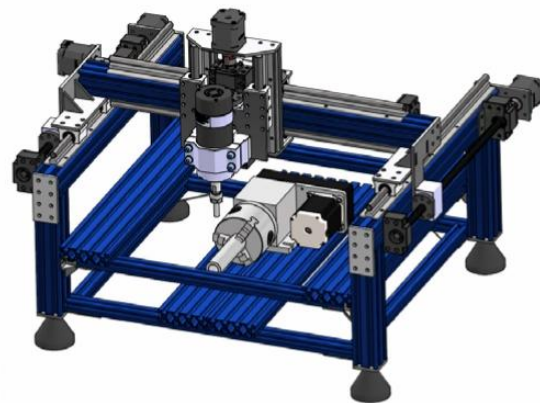
supports, you can significantly reduce the backlash of the entire transmission. The front support consists of two bearings and a tightening screw, and the rear support consists of one bearing that can slide in the housing. The weight of the machine after modernization is 30 kg. The working body has an increased range of movement along the axes: X – 340 mm, Y – 330 mm, Z – 65 mm. The created machine has a number of significant advantages compared to previous models.



a)



b)



c)

Fig. 7. Variants of the created machine: a) - milling machine; b) - laser machine; c) - milling 4-coordinate machine

4. ADJUSTING THE MACHINE

Autodesk software was used to create the control program, namely Inventor 2024 and PowerMill 2024. First,

a 3D model of the part is created using Inventor 2024, which must then be loaded into PowerMill 2024 to create the control program. For example, the processing of the chess piece - the king (Fig. 8) is done.

PowerMill supports various 3D model file formats. The most common is the STEP format. The part model is loaded into the program for subsequent creation of the control program. Processing on a machine with 4 axes will take place in several stages. First, rough processing of one half of the part is performed (separation occurs along the fourth rotary axis), then the workpiece is turned 180° and the other half is processed. Finishing takes place without separating the part. Let's consider in more detail the steps for creating a control program. After loading the model file in PowerMill, it is necessary to create a workpiece (Fig. 9) and a local coordinate system in which the X axis coincides with the rotary axis A of the machine, and the Z axis coincides with the Z axis of the machine (Fig. 10).

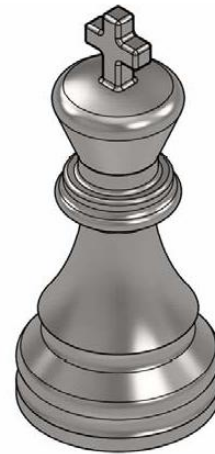


Fig. 8. Part for processing on the designed machine

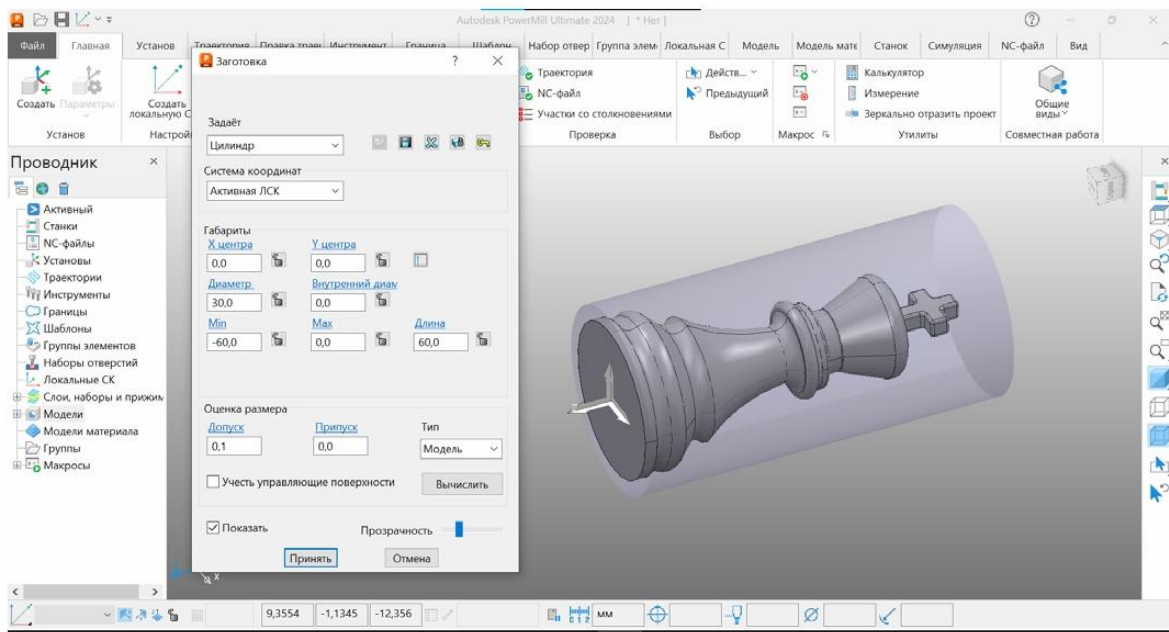


Fig. 9. Creation of a workpiece

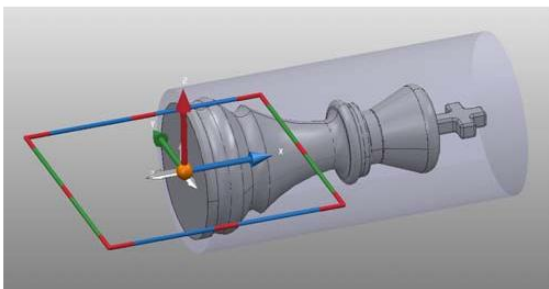


Fig. 10. Local coordinate system

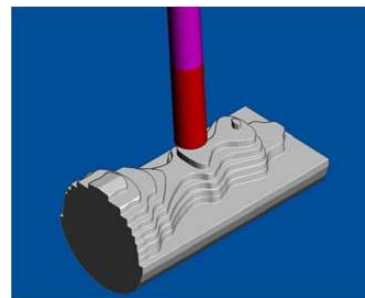


Fig. 11. The result of the first part of the rough processing

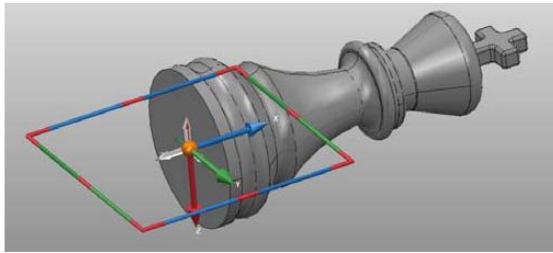


Fig. 12. Coordinate system for rough milling of the second half of the part

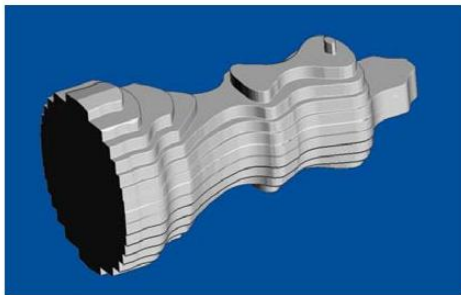


Fig. 13. Detail after rough milling

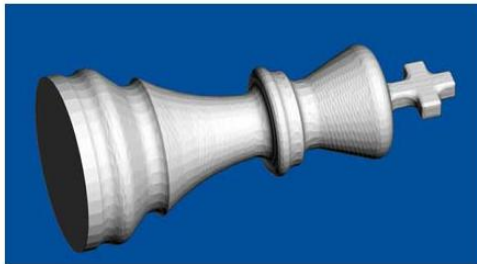


Fig. 14. Detail after finishing milling

The next step is to create a processing path. The "3D model selection" strategy is used for rough processing. With this method of processing, milling of the main material takes place and the workpiece takes on an approximate appearance to the required one (Fig. 11). The next step is to configure the selected milling strategy. In this window, the coordinate system in which the processing is performed, the strategy of tool feeding and withdrawal, processing restrictions, tool parameters, cutting modes, and much more can be configured. After all the settings, the system generates a trajectory along which the working body will move during the processing of the part. PowerMill makes it possible to simulate the execution of the control program.

The second half of the part is processed in a similar way. For this, a copy of the previously established local coordinate system and a processing strategy are created. The coordinate system is rotated 180° around the X axis (Fig. 12), I leave all other settings unchanged.

As a result, we will get a part after rough processing on both sides (Fig. 13).

The created control programs for roughing and finishing must be saved in an NC file in which the G-code will be placed. Finishing will be carried out using a "4-axis" strategy, in which the A-axis is constantly rotating and the workpiece moves in the YZ plane. In this way, processing is performed as if in a spiral. Tool parameters, cutting modes, etc. are also adjusted for this processing method. Further, all actions are performed similarly to the above example of creating a control program for rough processing. As a result, we have a completely ready control program for processing the part. The result of the program simulation is shown in Fig. 14.

5. CONCLUSION

The developed universal desktop 4-coordinate machine tool with extended functionality has significant scientific and technical potential and practical value for modern mechanical engineering. It can be effectively used in the educational process and in production when manufacturing complex parts of small sizes.

REFERENCES

- [1] Kryzhanivskiy V.A., Kuznetsov Yu.M., Kirichenko A.M. and other. Aggregate and modular technological equipment: In 3 parts. Under the editorship Yu.M. Kuznetsova, Kirovolhrad, Part 1 (2003) 422 p.
- [2] Kuznetsov Yu.M., Salenko O.F., Kharchenko O.O., Shchetynin V.T. Technological equipment from the ChPK: mechanisms and equipment, "Point" publication (2014) 500 p.
- [3] Kuznetsov Yu.M., Prydalnyi B.L., Gao Xinmin Technological equipment of milling machines: design, theory, practice: Monograph-Lutsk: Vezha-Druk (2023) 292 p. ISBN 978-966-940449-7
- [4] Kuznetsov Yu.M., Kryvchuk Yu.T. Directed genetic synthesis of desktop milling machines, XIX – XX MNPC "Mechanical engineering through the eyes of young people: progressive ideas - science - production", November 25-26, 2020, Sumy, Sumy State University (2020) 103-106
- [5] Kuznetsov Yu.M. Current state, prospects of development and production of metal-cutting machines in Ukraine / AINU News 1 (44) (2011)
- [6] Kuznetsov Yu.N., Haydaenko Yu.V., Kryvchuk Yu.T. Modeling of variants of a small-sized milling machine with a portal layout (English), International scientific and technical conference UNITECH'19, Gabrovo (Bulgaria) 2 (2019) 255-258
- [7] Kuznetsov Yu.M., Stepanenko O.O. Desktop milling machines controlled by a computer, Technological complexes, Lutsk 1 (2010) 72–77
- [8] Stepanenko O.O., Manzhola M.Yu., Kuznetsov Yu.M. Study of the effect of layouts of desktop milling machines with CNC on the quality of parts processing, Bulletin of ChDTU, Series "Technical Sciences", Chernihiv, 2 (2015) 78-83
- [9] Stepanenko O.O. Synthesis of small-sized milling machines with computer control. Abstract of the thesis. Ph.D. technical of science (2014) 14p.
- [10] <https://smartcnc.com.ua/shop/frezernyj-gravirovalnyj-stanok-s-chpu-smart-light-4060>
- [11] Creality, <https://www.creality.com/>

ДОДАТОК Р. Акт передачі до впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконавчий директор
ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

П.П. Бусол

" 03 " 11 2025р.

АКТ ПЕРЕДАЧІ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ

" 03 " 11 2025р.

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ "КБ "ЛОГІКА", та представники НН ММІ КПП ім. Ігоря Сікорського завідувач кафедри Конструювання машин проф. Данильченко Ю.М., керівник проекту проф. Кузнецов Ю.М. та студент гр. МК-41мп магістерського рівня освіти (освітня програма «Конструювання та дизайн машин») Кобець І.Р. підписали цей акт і засвідчуємо, що представниками НН ММІ КПП ім. Ігоря Сікорського передані, а представниками ТОВ "КБ "ЛОГІКА" прийняті для розгляду щодо можливого впровадження на ТОВ "КБ "ЛОГІКА" результати магістерської дисертації Кобця Івана Руслановича на тему «Створення і дослідження настільного фрезерного верстата порталного компонування» в частині розробки обладнання, що дозволить оброблювати деталі невеликих розмірів, в дрібносерійному виробництві.

Розроблена конструкція може бути корисною при остаточному обранні варіанту підвищення техніко-економічної ефективності виробництва.

Зі свого боку, кафедра Конструювання машин не викладатиме матеріали магістерської дисертації Кобця І.Р. для загального доступу.

Від ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

Виконавчий директор

П.П. Бусол

Технічний директор

А.С. Комков

Від НН ММІ КПП

ім. Ігоря Сікорського

В.р. завідувача кафедри КМ

О.Ф. Саленко

Керівник проекту, проф. кафедри КМ

Ю.М. Кузнецов

Студент II курсу гр. МК-41мп

І.Р. Кобець

ДОДАТОК С. Акт приймання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконавчий директор
ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

П.П. Бусол

20 22 рр.



АКТ ПРИЙМАННЯ

проектно-конструкторської роботи

*«СТВОРЕННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НАСТІЛЬНОГО ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА
ПОРТАЛЬНОГО КОМПОНУВАННЯ»*

В результаті виконання робіт з розробки конструкції універсального настільного 4-х осьового верстату, виконавець надав:

- кресленик загального вигляду розробленого верстату
- специфікація
- 3D-модель розробленого верстату
- результати попередніх досліджень напружено-деформованого стану

Результати роботи планується реалізувати для багатоосьової обробки деталей на підприємстві.

Замовник:

Виконавчий директор
ТОВ "КБ "ЛОГІКА"

П.П. Бусол

Технічний директор

А.С. Комков

Виконавець:

В.о. завідувача кафедри КМ

О.Ф. Саленко

д.т.н., інженер, професор кафедри КМ

Ю.М. Кузнецов

Студент II курсу групи МК-41мп

І.Р. Кобець