

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет конструювання та дизайну

УДК 681.5

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету

конструювання та дизайну

Зіновій РУЖИЛО

“ ” 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

надійності техніки

Андрій НОВИЦЬКИЙ

“ ” 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРНОГО
ВЕРСТАТУ**

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Освітня програма Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

д.т.н, професор _____

Вячеслав ЛОВЕЙКІН

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доц . _____

Зіновій РУЖИЛО

Виконав

Олександр СЕНТИЩЕВ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет конструювання та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
надійності техніки

к.т.н., доц. _____ Андрій НОВИЦЬКИЙ

“ ____ ” _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
СЕНТІЩЕВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Освітня програма Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
РЕЖИМІВ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 29 ” грудня 2023 р. № 2399 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.04.26

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз фрезерних верстатів
2. Розробка конструкції ЧПК фрезерного верстата по дереву
3. Дослідження технологічних режимів фрезерного ЧПК верстата
3. Охорона праці
4. Техніко економічне обґрунтування

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ ____ ” _____ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Зіновій РУЖИЛО

Завдання прийняв до виконання _____ Олександр СЕНТІЩЕВ

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки, що містить реферат, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Обсяг роботи складає 93 сторінок, 3 сторінки списку використаних джерел. Дана робота містить 38 рисунків і 14 таблиць.

У першому розділі здійснено аналіз конструктивних та функціональних особливостей фрезерних верстатів, класифікацію видів фрезерування, проаналізовано нюанси верстатів з ЧПК для деревообробки, їхні сильні та слабкі сторони, типи фрез та характеристики деревини, що мають вплив на процес обробки. Також представлено аналіз існуючих конструкцій ЧПК-верстатів.

Другий розділ присвячено проектуванню власної конструкції фрезерного верстата з числовим програмним керуванням для обробки деревини, з рухомою порталною конструкцією (Moving Gantry). Розглянуто складові частини станини, напрямних, механізму переміщення та вузлів кріплення. Особливу увагу приділено вибору способу керування, моделюванню компонентів та їх техніко-економічному обґрунтуванню.

У третьому розділі проведено експеримент з метою з'ясування впливу обертів шпинделя, швидкості подачі інструменту та глибини різання на якість отриманої поверхні при обробці деревини різних порід. Досліджено вплив на матеріали: сосну, дуб, вишню, тополю, МДФ та фанеру. Для проведення експерименту було обрано три види фрез: конусні, кінцеві та радіусні. З метою візуалізації та аналізу результатів були створені графічні зображення та таблиці, які наочно демонструють залежність якості обробки від обраних режимів різання. Здійснено порівняльний аналіз показників точності обробки та загальної ефективності процесу при різних значеннях параметрів.

У четвертому розділі зосереджено увагу на безпеці праці. Тут було проаналізовано небезпеки, пов'язані з експлуатацією фрезерних верстатів, а також представлено рекомендації щодо безпечної організації робочого місця. Окрему

увагу приділено засобам індивідуального захисту оператора, вимогам пожежної безпеки та заходам для уникнення аварійних ситуацій.

У п'ятому розділі було проведено економічну оцінку витрат, пов'язаних з обробкою заготовок. Визначено вартість кожної операції, беручи до уваги витрати на електроенергію, фрези, амортизаційні відрахування та сировину. Здійснено порівняння витрат між традиційними та оптимізованими режимами роботи. Обчислено термін окупності верстата та продемонстровано економічну виправданість використання розроблених режимів.

Ключові слова: ЧПК, фрезерування, деревина, технологічні режими, точність, економічна ефективність, верстат, оптимізація, інструмент.

РЕФЕРАТ	1
ЗМІСТ	3
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ	7
1.1. Загальна характеристика фрезерних верстатів	7
1.2. Принцип роботи	9
1.3. Різновиди фрезерних верстатів	10
1.3.1. Горизонтально і вертикально-фрезерні верстати	11
1.3.2. Поздовжньо-фрезерні, карусельно-фрезерні та барабанно-фрезерні верстати	14
1.3.3. Копіювально-фрезерні верстати	17
1.4. Фрезерні верстати з ЧПК	18
1.4.1. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки металів	25
1.4.2. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки каменю	29
1.4.3. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки деревини	33
1.5. Сфери застосування фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини	34
1.6. Переваги та недоліки фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини	35
1.7. Різновиди деревини та їх характеристики, які впливають на процес обробки.	36
1.8. Різновиди фрез та їх використання в деревообробці	36
1.9. Параметри технологічних режимів фрезерування деревини	37
1.10. Аналіз фрезерних верстатів	37
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК	40
2.1. Призначення фрезерних верстатів з ЧПК в деревообробці	40
2.2. Розробка ЧПК фрезерного верстата по дереву	41
2.3. Система керування ЧПК верстатом	54

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЧПК ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА ПО ДЕРЕВУ	59
3.1. Вибір об'єкта дослідження, матеріалів та інструменту, підготовка експерименту	59
3.2. Дослідження впливу швидкості обертання, подачі та глибини різання на якість поверхні	61
3.3. Аналіз ефективності різних режимів обробки при роботі з твердими та м'якими породами деревини	63
3.4. Оцінка точності обробки та порівняльний аналіз отриманих результатів	66
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	69
4.1. Розгляд потенційних загроз і факторів ризику, пов'язаних з використанням верстатів з ЧПК	69
4.2. Забезпечення оператора необхідними засобами індивідуального захисту та заходи безпеки при фрезеруванні деревини	73
4.3. Вимоги до організації робочого місця оператора ЧПК верстата	74
4.4. Пожежна безпека та заходи запобігання аварійним ситуаціям в деревообробних цехах	76
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	78
5.1. Визначення собівартості обробки деревини на ЧПК фрезерному верстаті	78
5.2. Порівняльний аналіз ефективності традиційних та оптимізованих методів фрезерування	82
5.3. Розрахунок витрат на інструмент та енергоспоживання	84
5.4. Економічна доцільність впровадження оптимізованих технологічних режимів	86
ВИСНОВКИ	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	91

ВСТУП

Актуальним викликом для сучасних підприємств стає впровадження передових технологій, що прискорюють виробничі процеси. Оновлення та модернізація існуючого обладнання або розробка нового є одним зі способів вирішення цього питання. Проте, не всі компанії мають змогу інвестувати у переоснащення старих машин, оскільки це може виявитись ресурсномістким завданням.

Деревообробка відіграє ключову роль у різноманітних сферах, від виробництва меблів та будівництва до створення декоративних елементів. Сучасне виробництво ставить високі вимоги до якості, продуктивності та загальної ефективності. Досягти цього допомагає впровадження передових технологій, зокрема, фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Використання ЧПК дозволяє автоматизувати операції, підвищити точність виготовлення деталей, мінімізувати людський фактор та оптимізувати витрати на виробництво.

Фрезерування деревини на верстатах з ЧПК – один з найбільш розповсюджених методів механічної обробки матеріалу. Завдяки програмованому керуванню та гнучкості налаштувань оператор може досягти високої якості обробки поверхні, чітко дотримуватися заданих геометричних параметрів виробу і скоротити кількість відходів. Вибір оптимальних технологічних режимів фрезерування має вирішальний вплив на кінцеву якість продукту, продуктивність процесу та тривалість служби інструменту.

Актуальність даного дослідження підкреслюється потребою у розробці та оптимізації технологічних режимів фрезерування деревини, що сприятиме покращенню якості обробки, зниженню виробничих витрат та підвищенню ефективності роботи ЧПК верстатів. Оптимізація параметрів різання допоможе зменшити знос інструменту, знизити споживання електроенергії та забезпечити стабільну роботу обладнання. **Метою** даної магістерської роботи є дослідження впливу технологічних параметрів фрезерної обробки деревини на верстатах з ЧПК для визначення оптимальних режимів роботи, що гарантуватимуть високу якість продукції та економічну ефективність виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

- провести аналіз конструктивних особливостей та принципів роботи фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини;
- розробити конструкцію фрезерного ЧПК верстата по дереву;
- виконати експериментальні дослідження з метою визначення оптимальних параметрів фрезерування;
- розробити рекомендації щодо вибору технологічних режимів обробки деревини;
- оцінити економічну доцільність впровадження оптимізованих режимів фрезерування.

Об'єктом дослідження є процес фрезерної обробки деревини на верстатах з ЧПК. Предметом дослідження є технологічні режими обробки та їх вплив на якість поверхні, продуктивність та економічну ефективність процесу.

Методи дослідження включають в себе аналіз науково-технічної літератури, теоретичне моделювання, експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання технологічних процесів, математичний аналіз отриманих результатів та оцінку економічної ефективності оптимізованих режимів роботи.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні технологічних режимів фрезерування деревини на верстатах з ЧПК шляхом комплексного аналізу впливу параметрів обробки, застосування сучасних методів оптимізації та розробки рекомендацій щодо вибору режимів роботи для досягнення найкращих результатів.

Практична значущість дослідження визначається можливістю застосування отриманих результатів в деревообробному виробництві для підвищення його ефективності, зниження витрат та покращення якості продукції.

Отже, дослідження технологічних режимів фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини є важливим напрямком розвитку сучасного деревообробного виробництва, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності продукції, автоматизації виробничих процесів та раціональному використанню ресурсів.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ

1.1. Загальна характеристика фрезерних верстатів

Класичній фрезерній технології – вже близько 200 - 210 років. А перші прототипи фрезерних верстатів з'явилися на початку XIX століття, приблизно в 1810-1818 роках. І застосовувалися вони для обробки металевих деталей з метою створення рівних поверхонь і пазів. З кожним новим десятиліттям дана технологія невпинно розвивалася. І на сьогоднішній день, фрезерні верстати – один з найпопулярніших різновидів металообробних машин, що активно використовуються на виробництвах для механічної обробки різних матеріалів. Вони дають змогу здійснювати операції фрезерування, свердління, розточування, нарізання різьби та інші види обробки поверхонь деталей. Через свою універсальність та високу точність, фрезерні верстати знайшли широке застосування в різних секторах промисловості, зокрема в машинобудуванні, авіаційній, космічній, деревообробній, медичній та багатьох інших галузях.

Головний робочий орган фрезерного верстата є різальний інструмент – фреза, що здійснює обертальний рух, у той час заготовка може бути як нерухомою, так і рухатися в різних площинах. Це дозволяє створювати деталі складної геометрії з високою точністю та якістю обробленої поверхні. Конструкція верстата включає верстатний стіл, шпиндельний вузол, привід подачі та систему керування, котрі гарантують необхідну стабільність та ефективність обробки матеріалів.

Сучасні фрезерні верстати класифікуються за кількома ключовими типами, виходячи з особливостей їх конструкції та цільового призначення. Найбільш поширеними є вертикальні, горизонтальні, консольні, безконсольні, спеціалізовані та універсальні верстати. Вертикальні фрезерні верстати, зокрема, оснащені шпинделем, розміщеним перпендикулярно до столу, що сприяє ефективній обробці поверхонь з високою точністю. Горизонтальні фрезерні верстати, навпаки, мають

шпиндель, розташований паралельно до робочого столу, що робить їх чудовими для обробки довгих деталей та виконання фасонного фрезерування.

Особливо слід відзначити верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які стали ключовим елементом сучасного виробництва. Завдяки автоматизованому контролю процесу фрезерування, ці верстати значно збільшують ефективність виконаних робіт та мінімізують роль людського фактора гарантуючи повторюваність операцій з мінімальними похибками. Фрезерні верстати з ЧПК використовують комп'ютерні програми для управління переміщенням інструменту та заготовки, що дає змогу обробляти складні деталі без необхідності ручного втручання оператора.

Матеріали, які піддаються фрезеруванню, суттєво розрізняються в залежності від функціональності конкретного верстата. Металеві деталі, серед яких: сталь, чавун, алюміній, бронза та латунь, піддаються обробці на високопродуктивних промислових верстатах з підвищеною жорсткістю конструкції та високооборотними шпинделями. Деревообробні фрезерні верстати дозволяють виконувати різьблення, вибірку пазів, формування профілів та декорування виробів з масиву деревини, фанери, ДСП або МДФ. Окрім того, існують вузькоспеціалізовані фрезерні верстати, призначені для роботи з пластмасами та композитними матеріалами.

Однією з визначних особливостей фрезерних верстатів є їхня здатність забезпечувати високу точність та швидкість обробки матеріалу. Важливими чинниками, що впливають на якість кінцевих продуктів, є частота обертання шпинделя, швидкість подачі ріжучого інструменту, ступінь жорсткості конструкції верстата та надійна система фіксації заготовки. Застосування передових систем подачі мастильно-охолоджувальної рідини дає змогу покращити якість обробки, збільшити строк експлуатації інструменту та зменшити вплив температурного навантаження на компоненти верстата.

Розвиток технологій, що лежать в основі виготовлення фрезерних верстатів, відкриває нові можливості для появи інтелектуальних систем. Ці системи використовують штучний інтелект, методи машинного навчання та різноманітні

сенсорні технології, аби оптимізувати процеси обробки матеріалів. Застосування подібних рішень веде до збільшення ефективності виробництва, зменшення витрат на обслуговування та покращення контролю над якістю кінцевого продукту. Автоматизовані фрезерні комплекси з легкістю інтегруються в загальну систему управління підприємством, що відчутно спрощує виробничі процеси та позитивно впливає на точність обробки.

На мою думку, в найближчі роки розвиток фрезерних верстатів спрямовуватиметься на збільшення швидкості та точності обробки деталей, оптимізацію споживання енергії, впровадження екологічно чистих технологій, а також інтеграцію з цифровими системами управління виробництвом. У зв'язку з цим, фрезерні верстати й надалі відіграватимуть ключову роль у сучасній промисловості та сприятимуть випуску високотехнологічної продукції.

1.2. Принцип роботи

Так як, фрезерні верстати – це ключова складова сучасного виробництва, що гарантує високу точність та продуктивність при обробці різноманітних матеріалів, ми як інженери повинні розуміти принцип їхньої роботи. Він ґрунтується на обертанні різального інструменту, що зветься фрезою. Вона зрізає тонкий шар матеріалу з фіксованої на столі заготовки. Такий метод дає змогу виготовляти деталі найрізноманітніших форм з надзвичайною точністю та з бездоганною якістю поверхні.

Основними елементами фрезерного верстата є станина, яка слугує фундаментальною опорою всієї конструкції, надаючи верстату міцність та стабільність у процесі роботи. Її часто виготовляють з чавуну, що допомагає мінімізувати вібрації. Колона, закріплена на станині, розміщена вертикально та підтримує решту механізмів верстата. Всередині колони нерідко містяться механізми, які регулюють висоту шпинделя. Шпиндель, обертальний компонент, утримує та приводить у дію фрезу; його орієнтація – горизонтальна або вертикальна

– залежить від типу верстата. Робочий стіл є платформою, на якій фіксується заготовка. Він здатний пересуватися в різних площинах, що забезпечує точне позиціонування деталі відносно фрези. До того ж, важливу роль відіграють механізми подачі, які контролюють переміщення заготовки або інструмента під час обробки, використовуючи ручне або автоматичне керування.

Принцип роботи фрезерного верстата охоплює кілька фаз. Спочатку виконується підготовчий етап, під час якого заготовка фіксується на робочому столі за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, лещат або затискачів. Далі обирається відповідна фреза, яку встановлюють у шпиндель. Наступний крок – налаштування параметрів обробки, що включають швидкість обертання шпинделя, швидкість подачі та глибину різання. Ці параметри залежать від матеріалу заготовки та виду фрези.

Після цього починається безпосередній процес обробки: шпиндель починає обертати фрезу, яка поступово видаляє матеріал з заготовки. Робочий стіл або шпиндель переміщується згідно з встановленими налаштуваннями, забезпечуючи необхідну траєкторію руху фрези відносно заготовки.

По завершенні обробки виконується контроль якості, який передбачає перевірку відповідності деталі заданим розмірам та якості поверхні. За потреби проводиться додаткова обробка або коригування параметрів.

1.3. Різновиди фрезерних верстатів

Фрезерні верстати поділяються на горизонтально-фрезерні, вертикально-фрезерні, поздовжні, карусельні, барабанні, копіювальні, шпонково-фрезерні тощо.

Кожен з цих видів володіє власними особливостями та застосовується для опрацювання деталей відповідних форм і розмірів. Приміром, горизонтально-фрезерні верстати знайшли застосування для обробки довгих та громіздких деталей, тоді як вертикально-фрезерні верстати ефективно справляються з плоскими поверхнями та складними контурами. Карусельні верстати розраховані на обробку

великих деталей, а копіювальні верстати гарантують виготовлення деталей за наявними зразками. Завдяки різноманітності конструкцій, фрезерні верстати активно задіяні в різних галузях промисловості, забезпечуючи точність та якість обробки.

1.3.1. Горизонтально і вертикально-фрезерні верстати

Диференціація фрезерних верстатів за горизонтальним та вертикальним типом ґрунтується на положенні шпиндельної осі в просторі.

На рисунку 1.1 зображено зовнішній вигляд консольного горизонтального фрезерного (горизонтально-фрезерувального) верстата. Шпиндель 1 розташований в горизонтальній площині. Стіл 5 закріплено на каретці 6, котра, в свою чергу, розміщена на консолі 7. На верхній частині станини 4 закріплений хобот 2 з підвісками 3, що слугують для підтримки оправ, на яких фіксуються фрези. Стіл може рухатись вздовж власної поздовжньої осі, разом з кареткою переміщується в поперечному напрямку, а разом з консоллю – у вертикальному. Якщо верстат оснащено поворотною системою, котра дозволяє йому обертатися на $\pm 45^\circ$, тоді його називають універсально-фрезерним.

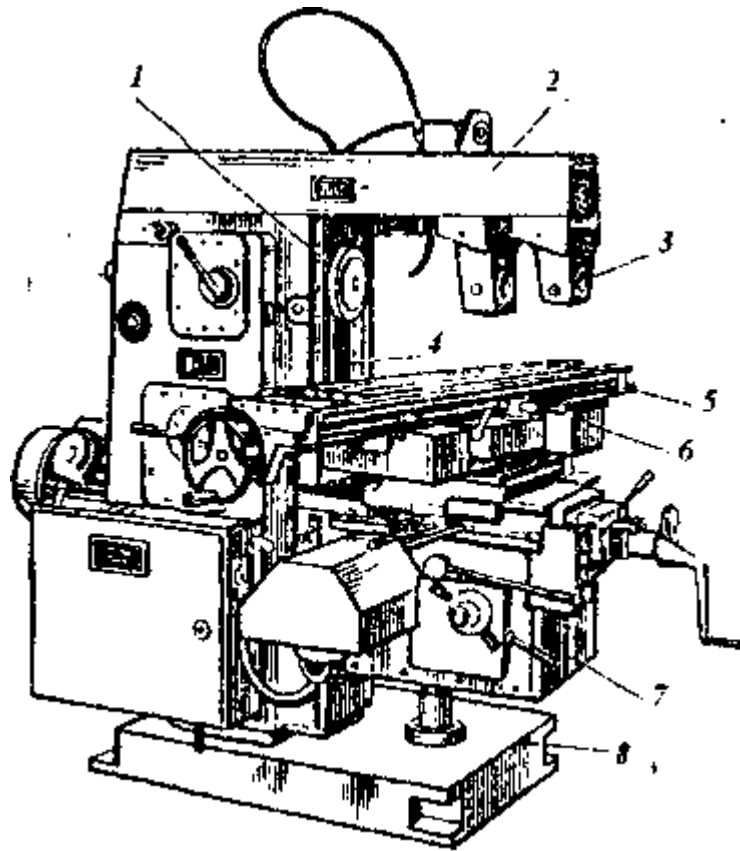


Рис. 1.1. Горизонтально-фрезерний верстат

Розміри робочої площини цих верстатів коливаються від 200x800 до 400x1600 мм, залежно від конкретної моделі. На стіл можливо встановити заготовки заввишки до 350-400 мм та обробляти їх по довжині від 400 до 1000 мм. Верстати передбачають поперечне переміщення столу в межах 160-320 мм та вертикальне переміщення в діапазоні 300-400 мм.

На рис. 1.2 показано зовнішній вигляд вертикально-фрезерного верстата. Такі верстати зазвичай оснащені шпindelною головкою 2, яка має можливість обертатися навколо горизонтальної осі. Вертикальні фрезерні верстати не мають хобота, отже, на них операції виконуються виключно з використанням фрез з консольним закріпленням.

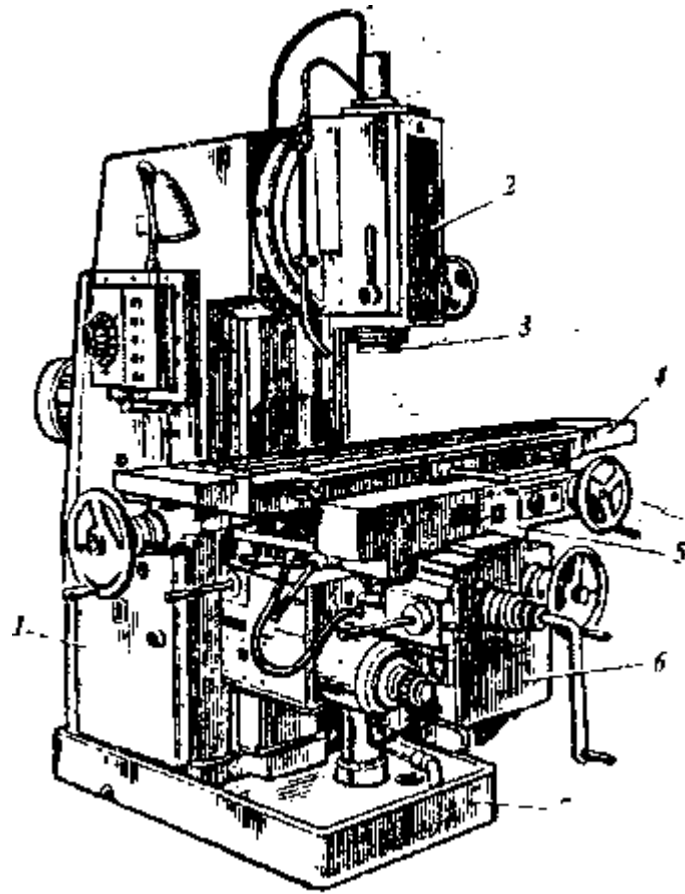


Рис. 1.2. Вертикально-фрезерний верстат

Розміри столів у цих верстатів аналогічні тим, що зустрічаються у верстатах з горизонтальним фрезеруванням. Характеристики переміщення столів, а також інші технічні показники, ідентичні.

Для обробки великогабаритних деталей використовуються безконсольні вертикально-фрезерні верстати (верстати з хрестоподібним столом). Вони оснащені поворотною шпindelьовою головою, а стіл може рухатися в поздовжньому та поперечному напрямках. Ці верстати вирізняються підвищеною жорсткістю, більшою потужністю та швидкістю.

Розміри столів коливаються від 250x630 до 1000x2500 мм, що дає змогу обробляти поверхні деталей розмірами від 250x500 до 1000x2000 мм.

1.3.2. Поздовжньо-фрезерні, карусельно-фрезерні та барабанно-фрезерні верстати

Поздовжньо-фрезерні верстати сконструйовані для обробки великогабаритних заготовок. Існують як одно-, так і двостійкові моделі. На рисунку 1.3 представлено двостійковий поздовжньо-фрезерний верстат.

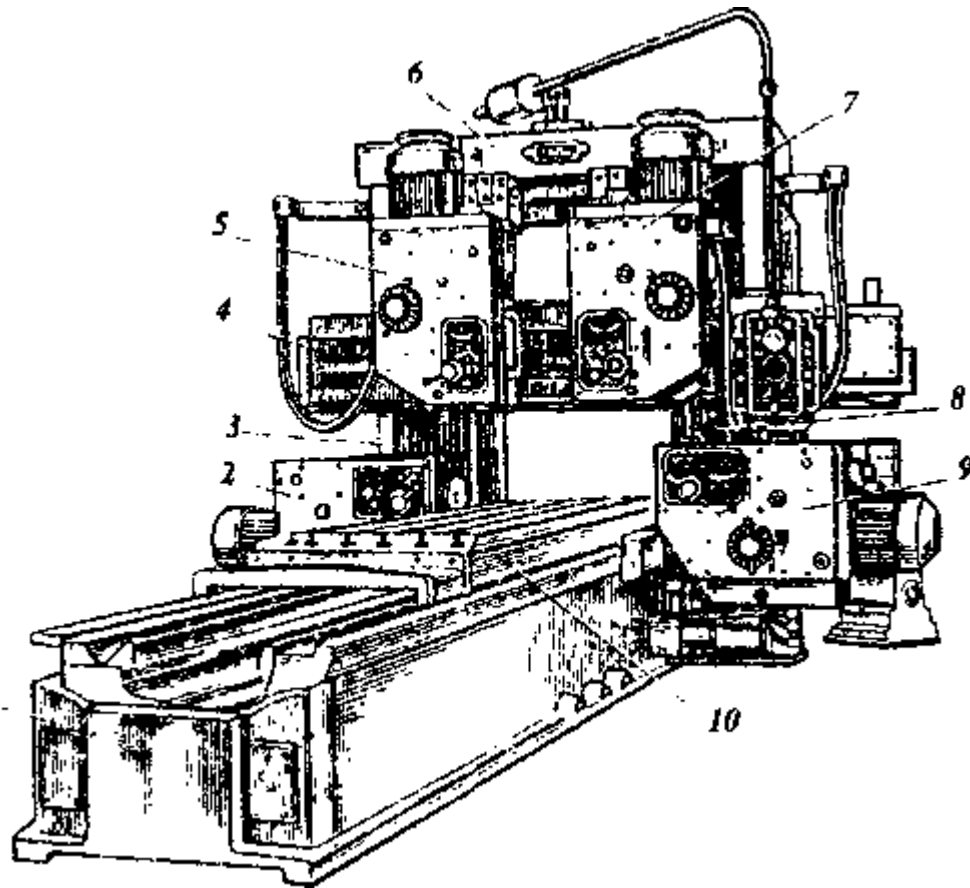


Рис. 1.3. Поздовжньо-фрезерний верстат

На станині 1 закріплені стійки 3 та 8, котрі з'єднані між собою балкою 6. Траверса 4 може рухатися по направляючих стійках. На траверсі розташовано дві фрезерні головки 5 та 7 з вертикальними шпинделями. Головки мають можливість переміщатися по направляючих стійках, де також змонтовано дві горизонтальні шпиндельні головки 2 та 9; фрезерні головки є поворотними. Деталь, що підлягає обробці, фіксується на столі 10, котрий має лише поздовжнє переміщення. Столи верстатів серійного виробництва сягають розмірів від 2500x8000 мм і більше, що

дозволяє обробляти деталі вагою до 65 т. Для обробки великогабаритних та важких деталей виготовляють унікальні поздовжньо-фрезерні верстати, які можуть обробляти деталі до 150 т, наприклад, ротори турбогенераторів.

Карусельно-фрезерні та барабанно-фрезерні верстати належать до обладнання безперервної дії. Обробка на них відбувається завдяки постійному обертанню каруселі (або барабана), на яких закріплені заготовки, що підлягають обробці.

Карусельно-фрезерний верстат (див. рис. 1.4) обладнаний круглим столом (каруселлю) 1, вісь якого розташована вертикально. Фрези закріплюються у двох шпинделях 2 фрезерної головки 3. Монтаж та демонтаж деталей виконуються з позиції завантаження без зупинки верстата, що позитивно впливає на продуктивність. Ці верстати широко використовуються у масовому виробництві.

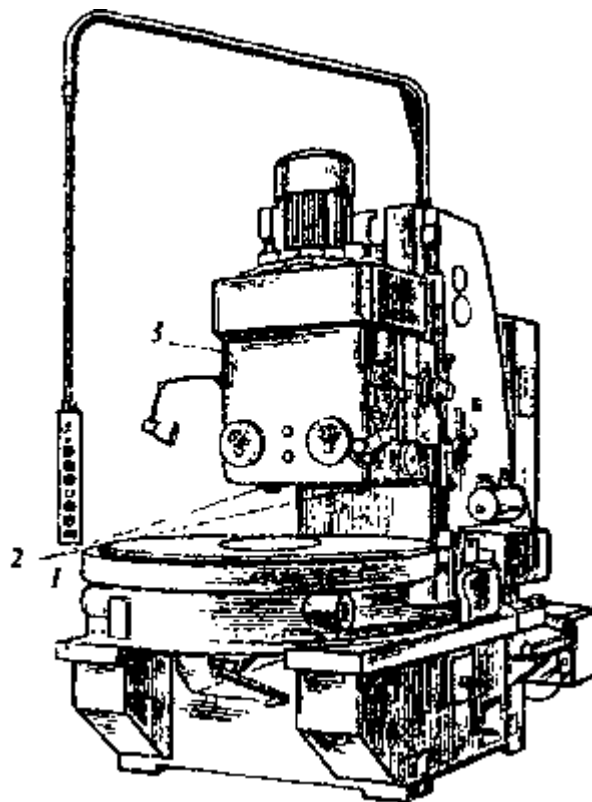


Рис. 1.4. Карусельно-фрезерний верстат

Барабанно-фрезерні верстати, подібно до карусельно-фрезерних, створені для роботи у великосерійному виробництві. Конструктивна особливість цих верстатів – шестигранний барабан діаметром від 500 до 2000 мм, вісь якого розміщена

горизонтально (рис. 1.5). На гранях барабана 4 фіксуються заготовки 6. Обертання барабана регулюється для досягнення необхідної швидкості подачі. Барабан надійно закріплений на валу 3. Кожна з двох торцевих поверхонь заготовки проходить послідовну обробку двома фрезерними головками 6, які розташовані на стійках 2. Завантаження заготовок та вивантаження готових деталей здійснюється без зупинки верстата.

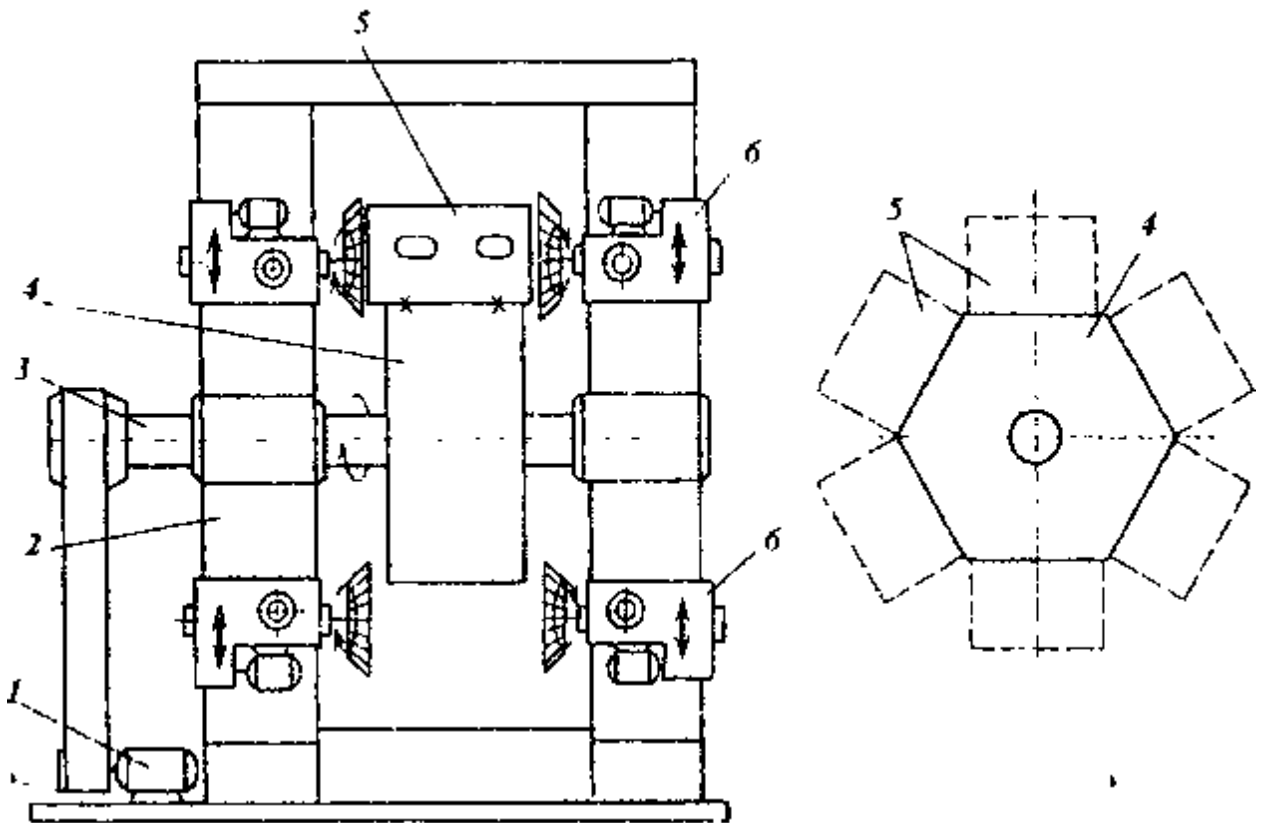


Рис. 1.5. Схема обробки деталей на барабанно-фрезерному верстаті

1.3.3. Копіювально-фрезерні верстати

Принцип дії копіювально-фрезерного верстата полягає в тому, що переміщення робочого органу верстата, на якому закріплена фреза, жорстко синхронізоване з рухом чутливого елемента (щупа, зонда) копіювального пристрою, траєкторію якого задає профіль копіра.

Для виконання простих фрезерних операцій, таких як гравіювання написів, орнаментів на штемпелях, табличках, шкалах та подібне, застосовують пантографно-копіювальні верстати (рис. 1.6). Оброблювану деталь фіксують на столі I верстата, а фрезу – у шпинделі 2. Копір розміщують на столі. Одна ланка пантографа 3 сполучена зі шпинделем, а інша – зі щупом. Пантограф одним з'єднувачем змонтований на станині 4. Під час пересування щупа по поверхні копіра шпиндель з інструментом відтворюватиме на поверхні заготовки, що обробляється, форму, що відповідає поверхні копіра. Масштаб копіювання варіюється, змінюючи взаємовідношення плечей важелів, що зв'язані з щупом та шпинделем.

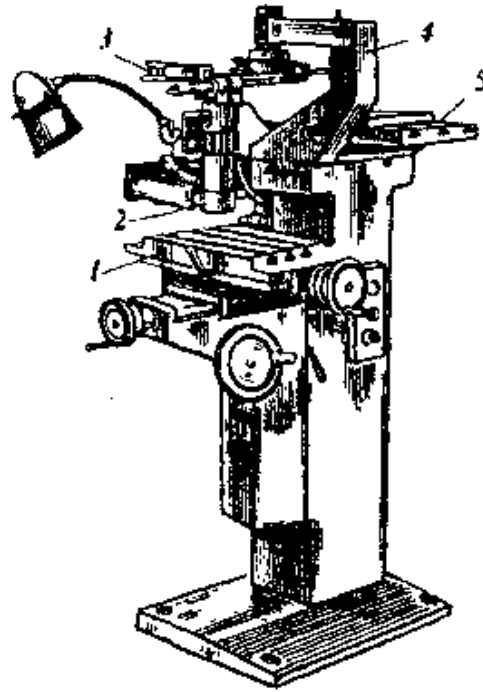


Рис. 1.6. Копіювально-фрезерний верстат

Для механічної обробки великогабаритних деталей з геометрично складними формами, як-от прес-форми, матриці штампів та подібне, застосовують копіювально-фрезерні верстати з числовим програмним управлінням (рис. 1.7).

Цей верстат дозволяє виконувати фрезерування, свердління та розточування. На столі 1, що обладнаний системою поздовжнього переміщення, розміщуються стійки 2 для фіксації оброблюваної деталі та копіювального пристрою. На шпиндельній бабці 3 змонтовано трикоординатний вимірювально-керуючий

механізм 4. Верстат забезпечує відтворення заданого профілю з точністю в межах 0,08-0,12 мм, а також дозволяє досягти шорсткості обробленої поверхні $R_a = 3,2$ МКМ.

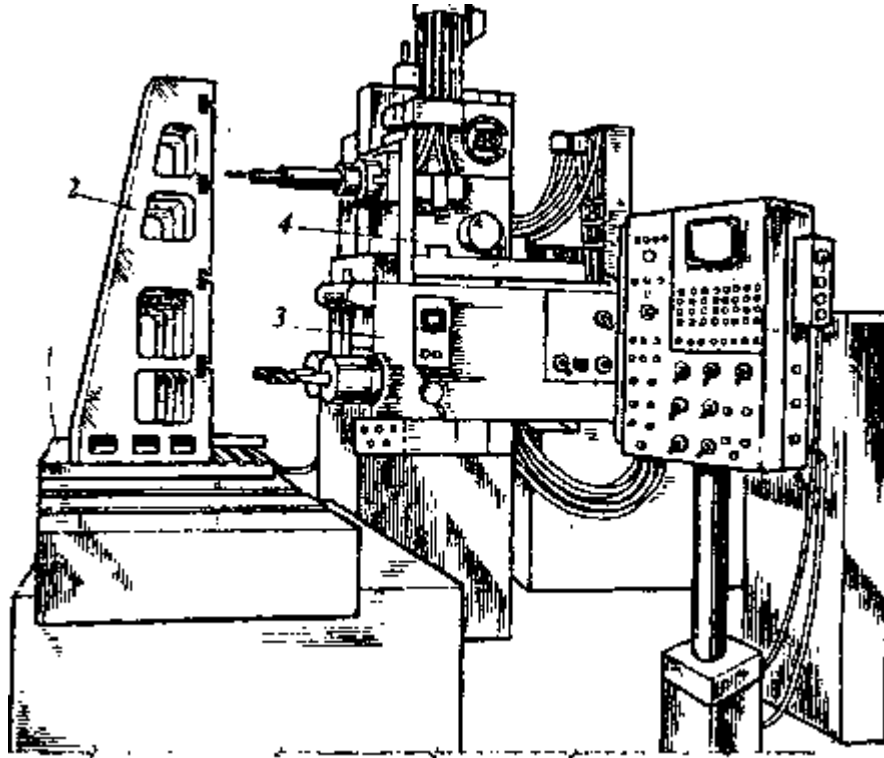


Рис 1.7 Копіювально-фрезерний верстат з числовим програмним керуванням

1.4. Фрезерні верстати з ЧПК

Розглянувши звичайні механічні фрезерні верстати, ми плавно переходимо до верстатів з ЧПК. Що взагалі собою являє верстат із ЧПК? Це можуть бути моделі різних верстатів, що мають вбудоване програмне керування. Яке автоматизує різні технічні операції та проведення розрахунків.

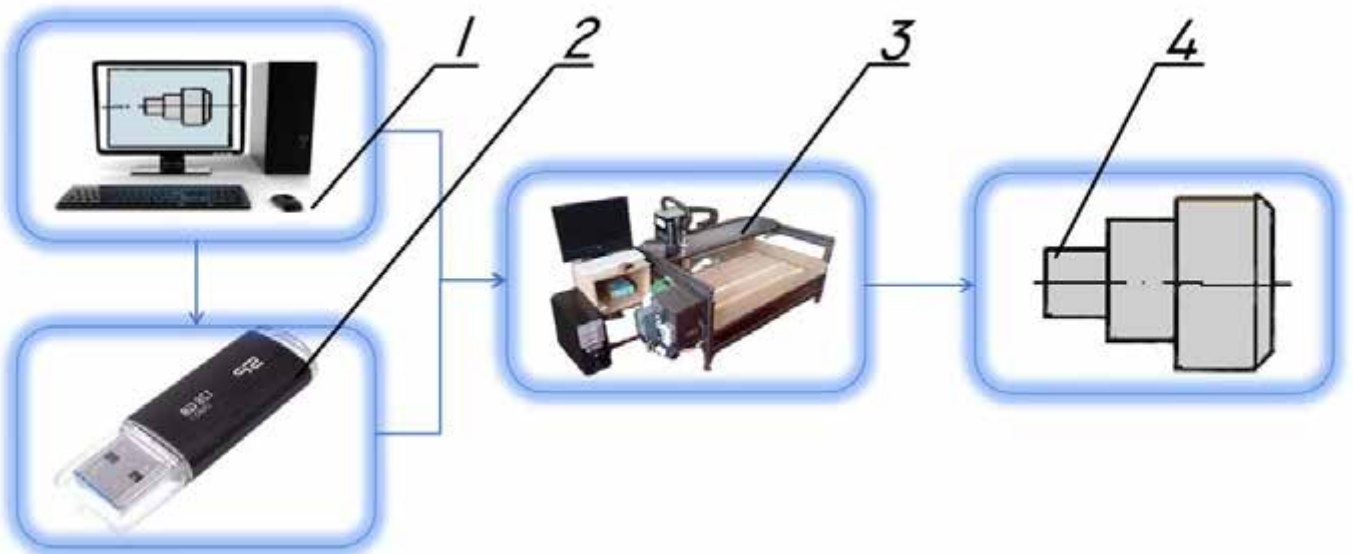
Як можна позиціонувати ЧПК верстат у виробництві? Дана система автоматично приводить у рух фрезерувальні інструменти в повній згоді з її програмною установкою. ЧПК – розшифровується, як числове програмне керування, походить від CNC (англ. Computer numerical control) – комп'ютеризована система керування, яка зчитує командні інструкції спеціалізованої мови програмування

(наприклад, G-код) і керує приводами метало-, дерево- чи пластмасообробних верстатів та верстатним оснащенням.

Спочатку була створена система NC. В її основі контролю за системою лежали жорсткі схеми, в яких управління здійснювалося за допомогою перемикачів і різних штекерів. Програма мала зберігатися на окремих носіях – перфокартах, магнітних стрічках тощо.

Вже сучасна система CNC, яку в нас позначають як ЧПК, має власну операційну систему. І обробкою процесів у ній займається мікропроцесор, що має вбудовану оперативну пам'ять. Ви можете програмувати дану систему як із зовнішнього носія, завантаживши на флеш-карту програму, так і під'єднати її до комп'ютерної мережі підприємства, а також за їхньою допомогою здійснювати управління системою.

Схема роботи з даними верстатами дуже проста (див. рис. 1.8.).



- 1- G – код з 3д-моделі, що створений на комп'ютері, який напряму підключений до верстата.
- 2- Файловий носій з G-кодом.
- 3- Верстат з ЧПК
- 4- Готова деталь

Рис. 1.8. Структурна схема автоматичного керування верстатом з ЧПК

Для програмування систем з ЧПК використовується спеціальна мова, описана документом стандарту ISO 6983.

Як взагалі працюють фрезерні ЧПК верстати? Якщо дивитися загалом, то сучасні, дорогі триосьові фрезерні верстати (див. рис. 1.9.) в собі містять: шпиндель, стіл, НМІ (людино-машинний інтерфейс), контролер, магазин інструментів, серводвигун, кулько-гвинтова передача та інші конструктивні опорні компоненти. Також до стандартних трьох осей (X, Y, Z) додається 4 вісь, що дає змогу виконувати більш складні операції. А основний принцип роботи верстата з ЧПК майже не відрізняється від традиційної фрезерної обробки. Шпиндель, що обертає ріжучий інструмент, який, у свою чергу, ріже матеріал.



Рис. 1.9. Конструктивні елементи сучасних фрезерних верстатів

Як я вже говорив НМІ (Human-Machine Interface) – це інтерфейс людина – машина, що дозволяє оператору взаємодіяти з пристроями, машинами або

системами. Дана система перекладає малюнок або команду на машинно-зрозумілу мову та надсилає її контролеру. Який в свою чергу точно контролює серводвигун. Користуючись кульково-гвинтова передача і напрямою, серводвигун переміщує стіл або шпиндель у певне місце, що запрограмовано, в заданий час. Потім заготовка розрізається для створення потрібної форми. В магазині інструменту зберігається найрізноманітніший ріжучий інструмент. Під час обробки деталі на цьому ЧПК верстаті, шпиндель автоматично може замінити фрезу. Цією дією скорочується час при заміні інструменту та збільшується продуктивність роботи. Є кілька видів магазинів інструменту для верстатів. Найбільш розповсюджений для фрезерних верстатів – це лінійний магазин, в якому ріжучий інструмент розташований в ряд. Також деякі верстати комплектуються з барабанним магазином, який має кругову конструкцію та надає швидкий доступ до інструменту. Та ланцюговий тип магазину, перевага такого типу це його місткість, він може зберігати в собі десятки інструментів. Деякі недорогі ЧПК фрезерні верстати не мають магазину інструменту, що вимагає ручної зміни інструменту

В чому полягає точність фрезерних верстатів з ЧПК? На рисунку 1.10 показано основні елементи керування верстатом з ЧПК, що містять: інтерфейс людина-машина (комп'ютер) – 1, контролер – 2, підсилювач – 3, енкодер – 4, двигун – 5, кульково-гвинтову передачу – 6, направляючу рейку – 7.



Рис. 1.10. Основні елементи керування верстата з ЧПК

Енкодер, може точно вимірювати кут обертання двигуна. Точність різних енкодерів також може бути різною. Як правило, точність енкодера що використовується на фрезерних верстатах з ЧПК, становить від сотих до мільйонних часток кола. Отож, контролер дозволяє точно керувати обертанням двигуна до потрібного кута, з можливістю досягнення точності в кілька сотих тисячних обертів. Контролер, підсилювач, енкодер та двигун формують контур із замкненим керуванням. У цьому контурі відбувається порівняння заданої команди (необхідний кут) із фактичним результатом (реальний кут), після чого проводиться коригування до досягнення відповідності. Таким чином, ця система демонструє надзвичайну точність, де не лишається місця для помилок.

Вся система керування ЧПК по суті є напівзамкненою, адже не всі елементи безпосередньо відправляють дані назад у режимі реального часу. Контролер використовує інформацію від енкодера, що дає змогу визначити поточне положення рухомих вузлів, зокрема кулькового гвинта та напрямних рейок, проте це не завжди відповідає фізичному положенню в системі з абсолютною точністю. У випадку

замкненого контуру управління, сигнал зворотного зв'язку з кодера застосовується для коригування положення, але механічні вади, наприклад, в кулькових гвинтах або напрямних рейках, здатні впливати на точність.

Відтак, точність цього конкретного розділу системи значною мірою залежить від механічних складників (кулькових гвинтів, напрямних рейок, підшипників та інших механізмів), а також від зносостійкості й міцності цих вузлів, що загалом впливає на точність функціонування верстата.

Причина чому кулькові гвинти знаходять широке застосування в верстатах з ЧПК полягає в їхній винятковій ефективності та мінімальному коефіцієнту тертя. Особливість конструкції кулькових гвинтів полягає у використанні кульок, які функціонують як своєрідні «підшипники». Це суттєво зменшує тертя, порівняно з традиційними гвинтами, що в свою чергу сприяє досягненню високої точності переміщення. Така точність є ключовим фактором для верстатів, де важлива найвища точність позиціонування.

Точність роботи цієї системи визначається можливістю кулькових гвинтів досягати точності в межах кількох мікрон. Крім того, високоточні серводвигуни та системи зворотного зв'язку, обладнані енкодерами, забезпечують безперервний контроль над фактичним положенням компонентів верстата. Контролер постійно співставляє задану позицію з фактичною, коригуючи рух у реальному часі. Цей процес гарантує точне позиціонування та стабільну роботу.

Повторюваність рухів відіграє не менш важливу роль, визначаючи якість роботи верстата. Завдяки точним механічним елементам і системі з замкнутим контуром управління, система має здатність з високою точністю повертатися до заданого положення, що є критично важливим для виконання високоточних операцій, таких як фрезерування, свердління чи токарна обробка.

Таким чином, використання кулькових гвинтів у верстатах з ЧПК не лише гарантує високу точність, але й забезпечує ефективність та надійність роботи, що є необхідним для досягнення максимальних результатів у виробництві.

Під час механічної обробки металу виникає значна сила опору, яка прямо впливає на точність обробки. Один з головних факторів, котрі гарантують високу точність, – це жорсткість та міцність конструкції верстата. Чим більшою є маса машини, тим краще показники її жорсткості та стійкості в процесі роботи. Важливу роль відіграє ширина напрямних, адже чим вона більша, тим вищі їх твердість та жорсткість, що покращує точність обробки.

Не варто забувати, що конструктивна міцність всієї машини також відіграє важливу роль. Вона забезпечує опір різноманітним навантаженням, які виникають під час обробки матеріалів. Окрім цього, на точність обробки впливають й інші фактори, такі як людський чинник, точність вимірювальних інструментів, коливання температури заготовки та інструментів у процесі обробки, зношення інструментів та інші варіації, які можуть виникнути в реальних умовах експлуатації.

Враховуючи всі ці аспекти, сучасні фрезерні верстати з ЧПК здатні забезпечувати точність обробки до 0.01 мм, що є досить високим показником для багатьох виробничих процесів, де необхідна висока точність.

Що таке верстат з ЧПК, коли зіставити його з рештою технологій виробництва? Верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) пропонують багато корисних властивостей. Найперше, за допомогою систем ЧПК, процес обробки стає повністю автоматичним, а отже, зростає точність обробки. Ті, хто обізнаний з тим, що таке фрезерування, усвідомлюють, наскільки критичною є точність обробки металу для загальної якості кінцевого виробу. Завдяки автоматизації, роль людини в процесі виготовлення стає меншою. Відповідно, верстати ЧПК допомагають зменшити кількість бракованої продукції, а також помітно збільшують продуктивність усього підприємства. Таким чином, через подвійну перевагу – швидкості та якості обробки металу, верстати з ЧПК багаторазово примножують ефективність виробничого процесу.

1.4.1. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки металів

Фрезерування у металургії – один з найбільш комплексних процесів обробки заготовок. Щоб гарантувати найвищу якість готової продукції, граничну точність та максимальну ефективність, необхідно не лише, щоб оператор верстата володів високою кваліфікацією, але й щоб обладнання було передовим. Саме фрезерні верстати з ЧПК (числовим програмним керуванням) дозволяють досягти таких показників. Вони також сприяють не тільки поліпшенню якості фрезерувальних операцій, а й значному збільшенню продуктивності.

Ось декілька ключових видів фрезерної обробки на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПК), які сьогодні є найпоширенішими:

Фрезерування.

Це один з різновидів робіт, що виконуються на фрезерному верстаті, використовується як для обробки площин (див. рис. 1.11), так і для надання форми тілам обертання. Залежно від орієнтації деталей, розрізняють універсальне, горизонтальне та вертикальне фрезерування. Ця методика знаходить застосування в приладобудуванні, автомобільній промисловості та інших галузях.



Рис. 1.11. Процес фрезерування на сучасному ЧПК верстаті

Гравіювання.

Тип обробки, що застосовується до дерев'яних та металевих деталей і поверхонь, супроводжується створенням на поверхні деталі візерунка, малюнка або напису шляхом видалення певного шару матеріалу (див. рис. 1.12). Методика широко використовується в різних сферах: від компаній-підрядників, що наносять серійні номери на деталі, до малих підприємств, що виробляють таблички, вивіски та іншу рекламну продукцію.



Рис. 1.12. Процес гравіювання на сучасному ЧПК верстаті

Фрезерування пазів, канавок, уступів.

Різновид фрезерної обробки заготовок, під час якого виконуються різні види фрезерування для створення в заготовках пазів, канавок і уступів (виямок різного типу) для отримання необхідних деталей (див. рис. 1.13).



Рис. 1.13. Процес фрезерування пазів

Відрізання, розрізання та прорізування заготовок фрезою.

Ще один популярний напрямок робіт на фрезерному верстаті. У цьому випадку фрезерна обробка металу на верстатах з ЧПК виконується кількома способами. Відрізання передбачає відділення частини матеріалу від цілого елемента. Розрізання полягає у повному розділенні заготовки на кілька частин. Прорізування реалізується шляхом формування пазів у заготовці (див. рис. 1.14).



Рис. 1.14. Процеси різання дисковими фрезами

Розточування отворів

Збільшення діаметру отворів (див. рис. 1.15) також можливе на фрезерному верстаті. Цей процес може бути виконаний як для глухих, так і для наскрізних отворів. Методика застосовується у виробництві авіаційної техніки, машинобудуванні, виробництві побутової техніки та електроніки, а також підрядниками під час обробки різних заготовок на замовлення.

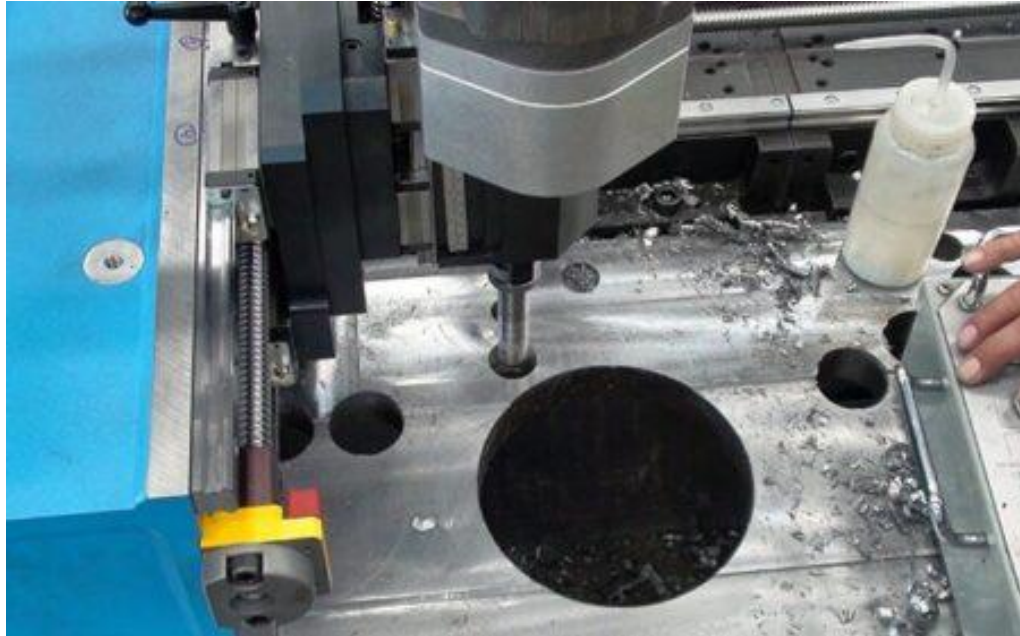


Рис.1.15. Процес розточування отворів

Не зважаючи на тип робіт, загальний процес фрезерування деталей на верстаті з ЧПК розгортається поетапно:

Оператор верстата проводить аналіз поставленого завдання. Це може включати ознайомлення з технічною документацією, вибір відповідного програмного алгоритму з наявних у пам'яті верстата та його налаштування. В процесі коригування оператор має змогу змінювати основні параметри обробки заготовки, починаючи від типу операції (свердління, обточування тощо) і закінчуючи параметрами їх виконання (наприклад, корекція глибини глухого отвору).

Виконується підбір фрез, які будуть задіяні в процесі. Їх встановлюють на обладнання. Деякі фрезерні верстати з ЧПК обладнані автоматизованою системою заміни фрез. В спрощених версіях обладнання заміна фрез здійснюється оператором вручну між циклами обробки заготовки.

Потім оператор надійно фіксує заготовку на станині.

Після цього на панелі керування (блоці управління) запускається програма для обробки заготовки, і система в автоматичному режимі, керуючись заданими параметрами і налаштуваннями, виконує фрезерувальні операції.

На кожному етапі та в кожному циклі взаємодії фрези із заготівлею за точністю процесу слідкує оператор верстата.

По закінченні роботи оператор, дотримуючись прийнятих процедур роботи з обладнанням, забирає оброблені деталі, проводить очищення та вимикає фрезерний верстат, приводить до ладу робоче місце та вимикає обладнання в безпечному режимі.

Загалом процес обробки деталей та заготовок на фрезерному верстаті з ЧПК виглядає таким чином. Проте, залежно від внутрішніх стандартів роботи з деталями та специфіки виконуваних задач, етапи роботи на обладнанні можуть трохи відрізнитися від описаної вище послідовності.

1.4.2. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки каменю

Фрезерні верстати з числовим програмним управлінням (ЧПК) для обробки каменю являють собою передове устаткування, що гарантує високоточну, продуктивну та автоматизовану обробку природного та штучного каменю. Ці верстати застосовуються для розпилювання, гравіювання, фрезерування, полірування та свердління матеріалів, зокрема мармуру, граніту, кварцу, піщанику, нефриту, сланцю тощо.

Основними компонентами таких верстатів є потужні шпинделі (зазвичай з водяним охолодженням), які забезпечують необхідну потужність для обробки

твердих матеріалів. Переміщенням інструменту керує система ЧПК, що дає можливість досягати високої точності та повторюваності обробки. Для зменшення зношення інструменту та попередження перегріву використовується система водяного охолодження, що додатково сприяє зменшенню утворення пилу.

Ретельно розглянемо конструкцію фрезерувального верстата по каменю та граніту на прикладі верстата «РПК-1015», фірми «CNC Machines» (див.рис. 1.16).



Рис. 1.16. Фрезерний верстат з ЧПК по каменю та граніту «РПК-1015»

Він має робочу поверхню з розмірами 1500 x 1000 мм, що дозволяє вільно обробляти кам'яні породи натурального та штучного походження. На ньому встановлений безколекторний шпиндель з рідинним охолодженням потужністю 3200 Вт. Та швидкістю обертання до 24000 об/хв. Також його можна обладнати шпинделем потужністю 5500 Вт. Даний верстат має точність позиціонування до 0.08 мм, що дозволяє виготовляти сувенірну продукцію та проводити детальну 3д обробку глибоких рельєфів (див.рис.1.17 а). Він обладнаний рідинним охолодженням фрези (див.рис. 1.17 б) і системою очищення та рециркуляції, що

дозволяє працювати цілодобово. Керується верстат системою МАСНЗ. Та має безліч додаткових функцій.

Застосування даних ЧПК верстатів охоплює різні галузі, включаючи виробництво кухонних стільниць, облицювальних плит, пам'ятників, декоративних елементів та архітектурних деталей. Використання таких верстатів дозволяє досягати високої якості обробки, зменшувати витрати матеріалів та підвищувати продуктивність виробництва.



а)



б)

Рис. 1.17. а) – обробіток глибок рельєфів; б) – рідинне охолодження фрези;

Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) для обробки каменю зазвичай мають міцну сталеву конструкцію, яка забезпечує високу стабільність під час роботи і зменшує вібрації, що особливо важливо при обробці твердих матеріалів. В якості приводу на таких верстатах застосовуються серводвигуни або високоточні крокові двигуни, які гарантують плавність руху і точність позиціонування інструменту. Для переміщення робочих елементів використовуються лінійні напрямні типу HIWIN і гвинтові передачі TBI, що забезпечує точність руху у всіх осях (див.рис.1.18).

Шпиндель є одним із ключових елементів верстата, і зазвичай має потужність від 3,2 до 9 кВт, що дозволяє ефективно обробляти навіть дуже твердий камінь. Для

захисту інструменту від перегріву та зносу широко використовується система водяного охолодження, яка також допомагає контролювати утворення пилу під час обробки. Робоча зона фрезерних верстатів варіюється залежно від моделі і може бути відносно компактною, наприклад 600×1200 мм, або великою – понад 3000×2000 мм для обробки великогабаритних плит.

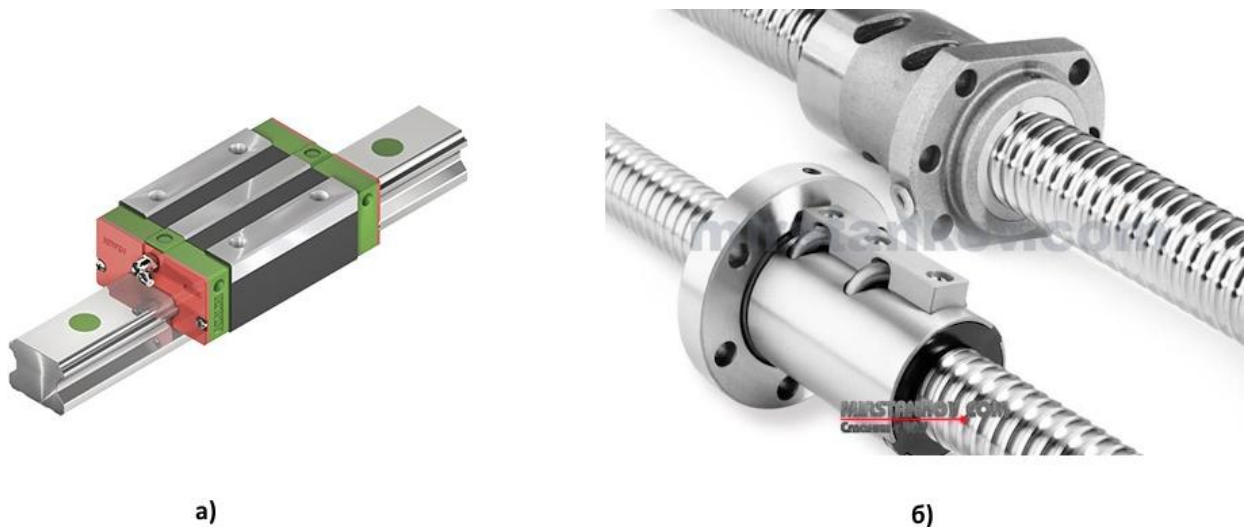


Рис. 1.18. а) – лінійні напрямні типу HIWIN; б) – гвинтові передачі TBI.

Системи керування зазвичай базуються на контролерах DSP або програмних рішеннях на базі Mach3, що дозволяє легко програмувати та контролювати процес обробки без необхідності постійного втручання оператора. Швидкість холостого ходу може досягати 36 м/хв, що значно підвищує загальну продуктивність обладнання. Деякі моделі можуть бути оснащені подвійними шпинделями або додатковими опціями, такими як автоматична зміна інструменту чи вбудовані сканери для роботи з нерівними поверхнями. Всі ці характеристики роблять фрезерні верстати з ЧПК для каменю потужними, точними та універсальними машинами, що підходять як для масового виробництва, так і для створення унікальних декоративних виробів.

1.4.3. Фрезерні верстати з ЧПК для обробки деревини

Також без допомоги фрезерних верстатів з ЧПК не можливо обійтися в сучасному деревообробному виробництві. Автоматизація та висока точність цих верстатів забезпечують ефективну та якісну обробку деревини з мінімальними затратами ручної праці. Так як деревообробка не рідко потребує обробіток складних геометричних форм було створено багато типів верстатів. Тривісні, чотири- та п'ятиосьові установки, дозволяють обробляти складні контури багатогранних поверхонь та елементів складної форми без необхідності частої зміни положення заготовки (див. рис. 1.19.). Завдяки цьому знижується ймовірність помилок, скорочується виробничий цикл та підвищується стабільність якості виготовлених деталей.



Рис. 1.19. 4-х осьовий фрезерний ЧПК верстат з поворотним шпинделем Javelin 1325
dwa (117)

1.5. Сфери застосування фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини

Різні типи фрезерних верстатів з ЧПК активно застосовуються у меблевій промисловості. виготовлення фасадів, різних каркасних елементів та декоративних вставок не обходяться без сучасного верстата. Також при будівництві для обробки віконних рам, дверей, каркасів та різних елементів внутрішнього оздоблення будівлі. Але досить значне поширення вони отримали у виробництві музичних інструментів (див. рис. 1.20). Саме тут вимагається досить висока точність обробки деревини та стабільність форм. Якщо взяти до уваги гітари, то такі елементи як: корпус, гриф, накладка грифа, резонансна дека – все це виготовляється на фрезерних ЧПК верстатах. З допомогою ЧПК за витримується ідеальна форма та глибина вкладання ладів, місце під звукознімачі, внутрішні отвори тощо. Завдяки автоматизації вдається досягти стабільної геометрії, що важливо для налаштування інструментів.



Рис. 1.20. Використання фрезерного верстата Наас для різьблення по дереву в гітарах.

Також дані верстати активно застосовують у сферах художнього різьблення, при створенні рекламних та виставкових стендів, а також створенні прототипів та розробці індивідуальних дизайнерських рішень. Саме універсальність цих верстатів дозволяє легко адаптуватися до вимог замовника та номенклатури продукції.

1.6. Переваги та недоліки фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини

Як я вже не одноразово говорив основними перевагами фрезерних верстатів з ЧПК є висока точність, автоматизованість процесу та економія часу на переналаштування обладнання. Вони дозволять значно зменшити людський фактор, що особливо важливо при високоточному або серійному виробництві. Завдяки комп'ютерному керуванню значно підвищується ефективність використання матеріалів, що зменшить витрати на виробництві. Не можу не відзначити фактор покращення умов праці, тому що оператор здебільшого здійснює контроль за процесом, а не безпосередньо приймає в ньому участь.

Незважаючи на свої численні переваги дані верстати мають і певні недоліки, які варто враховувати при їх впровадженні в деревообробне виробництво.

Найперше, варто відзначити значні витрати - і на саме устаткування, і на його подальший супровід. Ці верстати вимагають операторів з високою кваліфікацією та знанням програмування, що створює труднощі з підбором кадрів.

Вразливість до пилу, вологи та смол деревини здатна спричинити перебої в функціонуванні електроніки та механізмів. Не виключені помилки у процесі програмування або моделювання, що призводить до браку.

До того ж, тверді сорти деревини прискорюють зношення ріжучого інструменту. Верстати залежать від безперебійної подачі електроенергії та стабільної роботи програмного забезпечення, без чого виробництво може зупинитися.

1.7. Різновиди деревини та їх характеристики, які впливають на процес обробки

Вибір параметрів фрезерування значною мірою залежить від фізико-механічних характеристик деревини. Тверді породи, як-от дуб, бук чи ясен, вимагають знижених швидкостей різання та ретельного підбору подачі, аби уникнути перегріву інструменту та псування поверхні. М'які породи, як-от сосна або ялина, обробляються швидше, проте їх структура потребує врахування напрямку волокон. Вологість деревини також є критичним показником: за надмірної вологості виникає ризик налипання стружки, що знижує якість обробки та може спричинити поломку фрези. Такі характеристики, як наявність сучків, пористість та смолистість, також необхідно враховувати при плануванні процесу.

1.8. Різновиди фрез та їх використання в деревообробці

Для забезпечення оптимальних результатів обробки, необхідно застосовувати фрези, які точно відповідають поставленим технологічним вимогам. До найчастіше вживаних належать: циліндричні фрези, призначені для формування плоских поверхонь, кінцеві фрези, які використовують для створення пазів та отворів, фасонні (профільні) фрези, що ідеально підходять для виготовлення декоративних елементів, а також комбіновані фрези, розраховані на багатоетапну обробку. Матеріал виготовлення фрези та її геометричні параметри безпосередньо впливають на чистоту обробленої поверхні, швидкість виконання роботи та тривалість експлуатації інструменту. Високоякісні фрези, оснащені твердосплавними пластинами, гарантують стабільну роботу навіть при обробці щільних порід деревини.

1.9. Параметри технологічних режимів фрезерування деревини

Оптимальні технологічні показники фрезерування залежать від ключових факторів: швидкість різання, подача, глибина обробки та оберти шпинделя. Для обробки деревини необхідно дотримуватися правильного співвідношення між цими параметрами, щоб уникнути таких небажаних ефектів, як підгорання, сколи або задирки. Збільшення швидкості різання може прискорити процес виробництва, проте призводить до швидшого зношування інструменту. Натомість, надто низька швидкість подачі знижує продуктивність і може викликати деформацію волокон деревини. Кожен вид деревини та фрези має власні рекомендовані значення цих параметрів, які слід враховувати для отримання стабільного і якісного результату обробки.

1.10. Аналіз фрезерних верстатів

На основі аналізу всієї (див. рис. 1.21) отриманої інформації була створена блок-схема різновидів фрезерних верстатів. Виходячи з неї можна сказати, що верстати з ЧПК являються основою сучасного високоточного виробництва. За їхньої допомоги можна забезпечити автоматизовану обробку матеріалів з мінімальним людським втручанням. Що в свою чергу стало відповіддю на зростаючі вимоги до точності та продуктивності сучасного обладнання, як в машинобудуванні так і в деревообробці, а також у багатьох інших галузях.

Якщо порівнювати фрезерні верстати з ЧПК зі звичайними. То верстати з комп'ютерним керуванням відкривають ширші горизонти виробництва завдяки інтеграції програмного управління, що гарантуватиме високу ступінь автоматизації. Завдяки використанню G-коду та 3D-моделей, система керує рухами ріжучого інструменту з точністю до мікрона. Високоточні серводвигуни, кульково-гвинтові передачі та енкодери дають змогу досягати точності обробки до 0.01 мм. Застосування системи замкнутого контуру управління забезпечує безперервне

коригування траєкторії інструмента у реальному часі, що особливо актуально при обробці складних контурів і деталей з високими вимогами до якості.

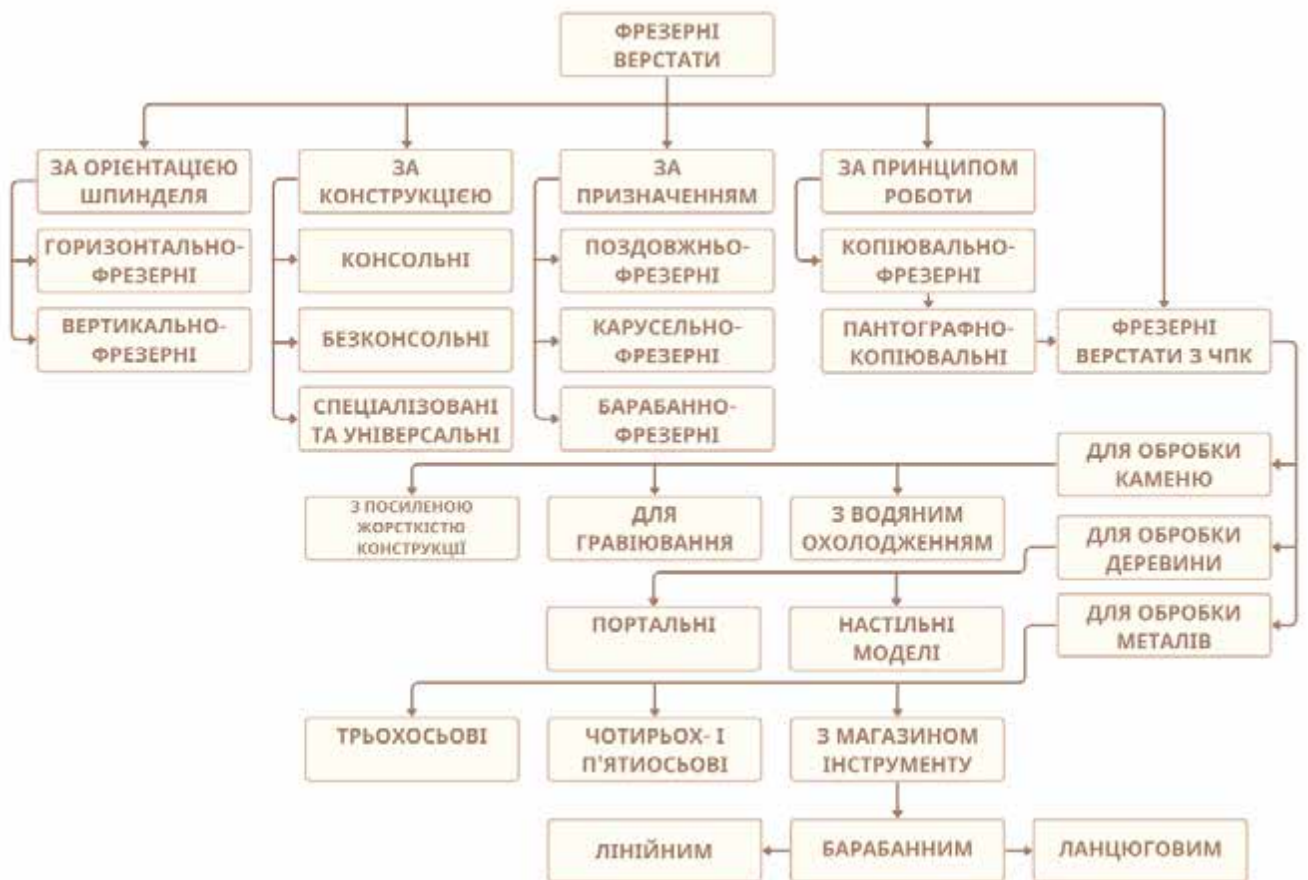


Рис. 1.21 Блок-схема різновидів фрезерних верстатів

Аналіз будови верстатів з ЧПК виявляє їхню комплексність інженерних рішень. До їхньої структури входять: НМІ (інтерфейс оператора), контролери, приводи, магазини інструментів (лінійні, барабанні чи ланцюгові), системи охолодження та видалення відходів. Слід відмітити п'ятиосьові системи, що дозволяють обробляти деталі в декількох площинах без перевстановлення заготовки, що пришвидшує виробництво та мінімізує ймовірність браку.

Важливу роль у збільшенні продуктивності відіграє використання фрезерних верстатів з ЧПК для обробки деревини. У цій сфері їх використовують для виробництва меблів, фасадів, декоративних деталей, музичних інструментів та

художніх виробів. Завдяки точності та надійності, такі елементи, як гриф або дека гітари, можуть виготовлятися серійно, зберігаючи високу якість.

У металообробці верстати з ЧПК демонструють надзвичайну універсальність, реалізуючи різноманітні процеси: від фігурного фрезерування до витонченого гравіювання та розширення отворів. Складність матеріалу та потреби у винятковій геометричній точності вимагають використання міцних станин, ефективних систем охолодження та потужних шпинделів.

Разом з цим, фрезерні верстати з числовим програмним управлінням мають і низку недоліків. Найбільш відчутними серед них є висока ціна самого обладнання, потреба у фахівцях з відповідною кваліфікацією, а також чутливість до наявності пилу, вологи та помилок у програмах. Обмеження можуть виникати також через перебої з електроенергією, фізичне зношування механічних частин або програмні помилки. Не втрачає актуальності питання технічного обслуговування та періодичного калібрування.

Підсумовуючи сказане, слід визнати, що фрезерні верстати з ЧПК стали незамінним компонентом сучасного виробництва. Ці верстати гармонійно поєднують точність, швидкість та безвідмовність, гарантуючи підприємствам конкурентну перевагу у будь-якій галузі промисловості. Майбутній розвиток цієї технології, особливо інтеграція штучного інтелекту, систем машинного зору та адаптивних систем керування, лише підвищить їхню важливість в реаліях індустрії 4.0.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

2.1. Призначення фрезерних верстатів з ЧПК в деревообробці

ЧПК верстати набули досить широкого значення в деревообробці. Їх активно використовують, як малі підсобні підприємства, так і меблеві фабрики. Відповідно під об'єми виробництва на ринок поставляють верстати різної потужності та різних розмірів. На даний час вони мають доступну ціну, тому кожна людина, що цікавиться обробіткою деревини може замовити верстат під власні потреби з потрібними габаритами.

Основне завдання такого типу верстата – це якісно та з великою точністю обробити певний масив деревини. Завдяки великому вибору інструменту, користувачам відкривається безліч напрямків застосування таких верстатів в деревообробці:

Можна зайнятися виготовленням меблів на замовлення. Від стільців та столів до шаф та полиць – ви зможете створювати будь-який вид меблів, що спадає на думку.

Тепер створення складних конструкцій та візерунків, не принесе для вас труднощів, як це було б з традиційними технологіями. Ним також можна виготовляти індивідуальні іграшки під замовлення. Від дерев'яних автомобілів та вантажівок до ляльок та фігурок – можна виготовити будь-яку іграшку за вашим задумом.

Також з допомогою даних верстатів створюють унікальні вивіски, ексклюзивні витвори мистецтва, музичні інструменти. Це лише деякі приклади того, що можна створити за допомогою деревообробного верстата з ЧПК.

2.2. Розробка ЧПК фрезерного верстата по дереву

Технічна характеристика верстата

Таблиця 2.1

№	Назва параметра	Значення	Одиниця виміру
1.	Тип верстата	Фрезерний з ЧПК (тип Moving Gantry)	-
2.	Кількість керованих осей	3	осі (X, Y, Z)
3.	Робоче поле (X × Y × Z)	900 × 600 × 120	мм
4.	Точність позиціонування	0.05	мм
5.	Повторюваність позиціонування	±0.02	мм
6.	Максимальна швидкість переміщення	3000	мм/хв
7.	Тип напрямних	Лінійні (Hiwin)	-
8.	Тип передач	ШВП (вісь Z), зубчаста рейка (X, Y)	-
9.	Тип двигунів	Крокові NEMA 24	-
10.	Тип шпинделя	Електрошпиндель з водяним охолодженням	-
11.	Потужність шпинделя	2,2	кВт
12.	Максимальна частота обертання шпинделя	24 000	об/хв
13.	Тип системи керування	Mach3	-
14.	Формат вхідних файлів	.tap, .nc, .gcode	-
15.		220	V

	Живлення верстата		
16.	Габарити верстата	1700 × 1000 × 907	ММ
17.	Маса	200	КГ

В таблиці 2.1. наведено технічні характеристики верстата. Також для створення верстата з ЧПК було розроблено структурну схему (див. рис. 2.1.). Вона визначає його основні вузли.

СТРУКТУРНА СХЕМА ЧПК ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА

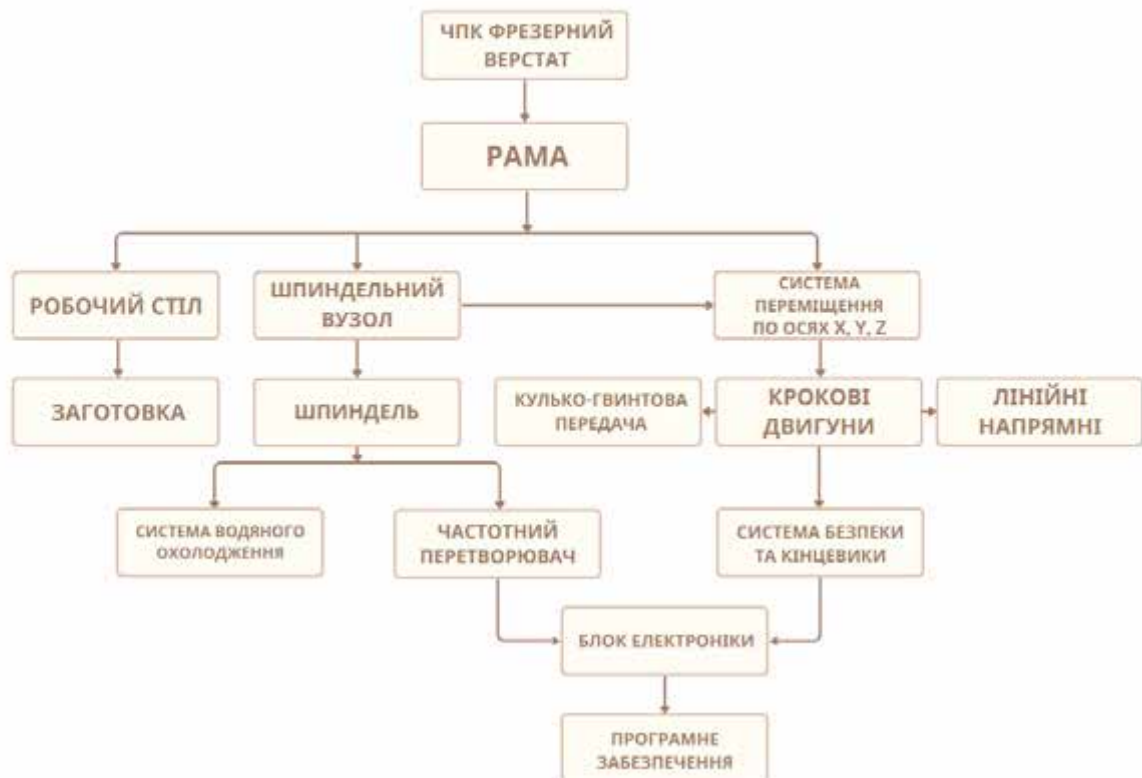


Рис. 2.1. Структурна схема ЧПК фрезерного верстата

Перш за все було розроблено несучу конструкцію, яка повинна забезпечувати жорсткість і стабільність усього верстата – раму. Вона має поглинати вібрації та навантаження, що виникають під час фрезерування заготовки. При виборі типу рами потрібно розуміти те, що вона впливатиме на жорсткість, точність, швидкість

обробки та вібраційну стабільність верстата. З існуючих різновидів рам ми обрали тип (Moving Gantry), тобто станина з рухомим порталом (див. рис. 2.2.).

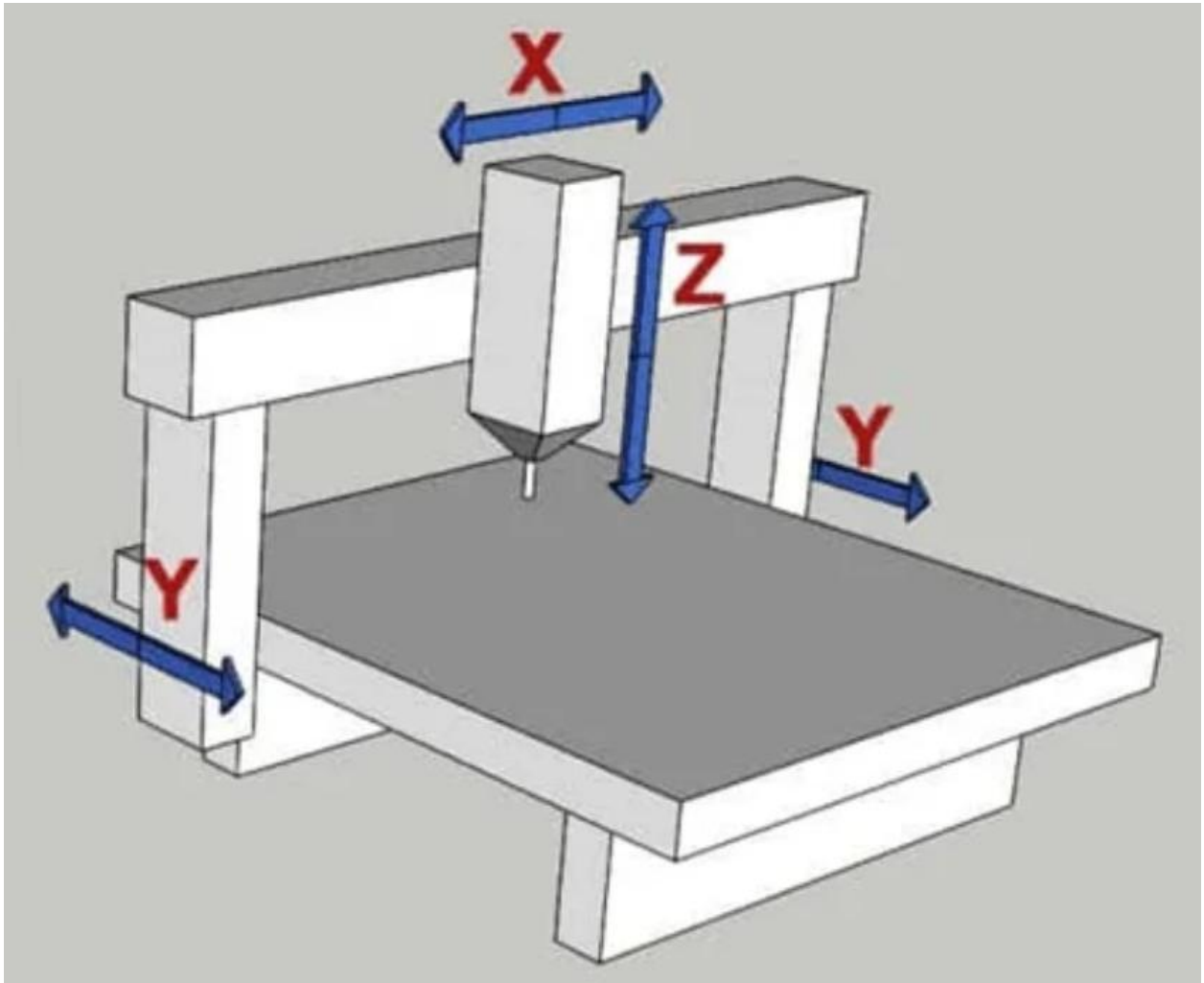


Рис. 2.2. Спрощений вигляд рами типу (Moving Gantry)

Такий вибір обумовлений необхідністю досягнення оптимального співвідношення між габаритами робочої зони, масогабаритними характеристиками, жорсткістю конструкції та вартістю виготовлення.

Конструкція рами доволі проста, на верстаті з рухомим порталом осі X та Z встановлюються на порталній балці, яка рухається вперед і назад по лінійних направляючих у напрямку Y вздовж столу. Шпиндельний модуль рухається з боку в бік у напрямку X вздовж порталу та вгору та вниз у напрямку осі Z. Заготовка

закріплена на стаціонарному столі. Усі три осі взаємозалежні та діють як єдине ціле. Двигуни осі Y та лінійні напрямні несуть дві інші осі.

Використання рами з рухомим порталом дозволяє реалізувати компактну, але водночас універсальну схему конструкції, яка забезпечить ефективну обробку великогабаритних дерев'яних заготовок без потреби в переміщенні самої деталі. Це дуже важливо для операцій фрезерування площини та глибини вибірки, що потребують стабільного базування деталі.

Для каркаса станини були використані зварні, сталеві профільні труби різних розмірів, які наведені в таблиці 2.2. Також для закріплення лінійних направляючих осі Y по ширині рами були розміщені швелери.

Елементи станини

Таблиця 2.2.

Елементи конструкції	Висота	Кількість
Профільна труба 50x50x5 мм.	500 мм.	4 шт.
Профільна труба 50x20x3 мм.	900 мм.	2 шт.
Профільна труба 50x20x3 мм.	1400 мм.	2 шт.
Профільна труба 50x20x3 мм.	1490 мм.	1 шт.
Профільна труба 40x40x5 мм.	900 мм.	2 шт.
Профільна труба 40x40x5 мм.	1400 мм.	2 шт.
Профільна труба 40x40x5 мм.	1420 мм.	1 шт.
Швелер сталевий 10П	1000 мм.	2 шт.

Елементи несучої конструкції рами були з'єднані методом напівавтоматичного зварювання. Сам процес зварювання проводився інверторним напівавтоматом фірми «РАТОН». Загальні габарити рами мають розмір 1500x1000x600 мм. 3Д модель станини зображена на рис. 2.3.

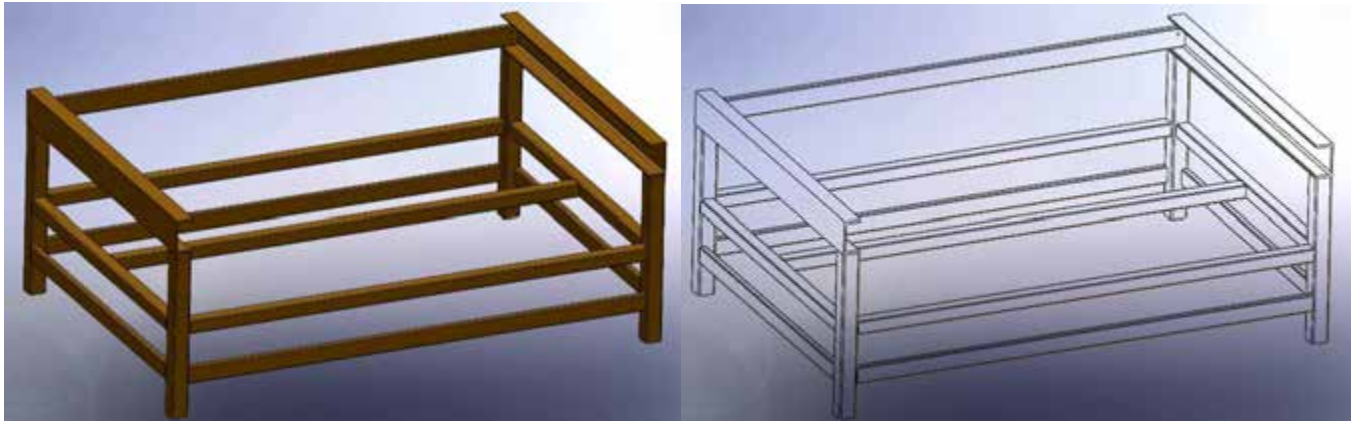


Рис. 2.3. Загальний вигляд станини

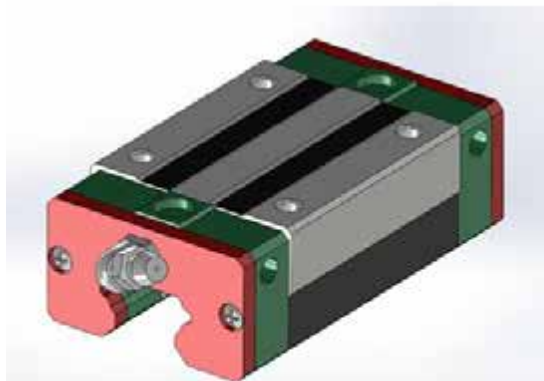
Наступним кроком після розробки моделі рами, була розробка порталу, який є несучим елементом для шпindelного вузла.

Конструкція порталу була також виготовлена з жорсткого профілю, що дозволяє зменшити вібраційні навантаження та забезпечити точне позиціонування інструменту в робочій зоні. Тому для переміщення порталу напрямні для осі Y розташовані по обидва боки станини, що підвищує симетрію навантаження та зменшує ризик перекосів. Для цього на розміщених швелерах були виконані технічні отвори з кроком 60 мм. від центру та нарізана різьба M5. Потім з допомогою гвинтів M5 x 16 були встановлені лінійні напрямні типу HGR20H фірми «HIWIN» (див. рис. 2.4.). Для переміщення порталу на направляючі симетрично встановлювалося по 2 каретки HGH 20CA тої ж фірми (див. рис. 2.5.). Також, щоб ЧПК система розуміла де закінчується лінійна напрямна в кінці кожної з них встановлені гвинти, а на рухомих модулях кінцевики. Якщо говорити коротко, то кінцевик – це, механічний перемикач (вимикач), який зупиняє процес руху, коли рухома частина механізму досягає певної точки або положення. Його основне призначення – контроль та обмеження руху.



Модель рейки	Розміри рейки мм							Гвинт для рейки мм	Маса кг/м
	W _r	H _r	D	h	d	P	E		
HGR15R-H	15	15	7,5	5,3	4,5	60	20	M4×16	1,45
HGR20R-H	20	17,5	9,5	8,5	6	60	20	M5×16	2,21
HGR25R-H	23	22	11	9	7	60	20	M6×20	3,21
HGR30R-H	28	26	14	12	9	80	20	M8×25	4,47
HGR35R-H	34	29	14	12	9	80	20	M8×25	6,30
HGR45R-H	45	38	20	17	14	105	20	M12×35	10,41
HGR55R-H	53	44	23	20	16	120	20	M14×45	15,08
HGR65R-H	63	53	26	22	18	150	20	M16×50	21,18

а)



б)



в)

Рис. 2.4. а) – технічні характеристики рейки; б) – каретка HGH 20CA; лінійна направляюча HGR20H.

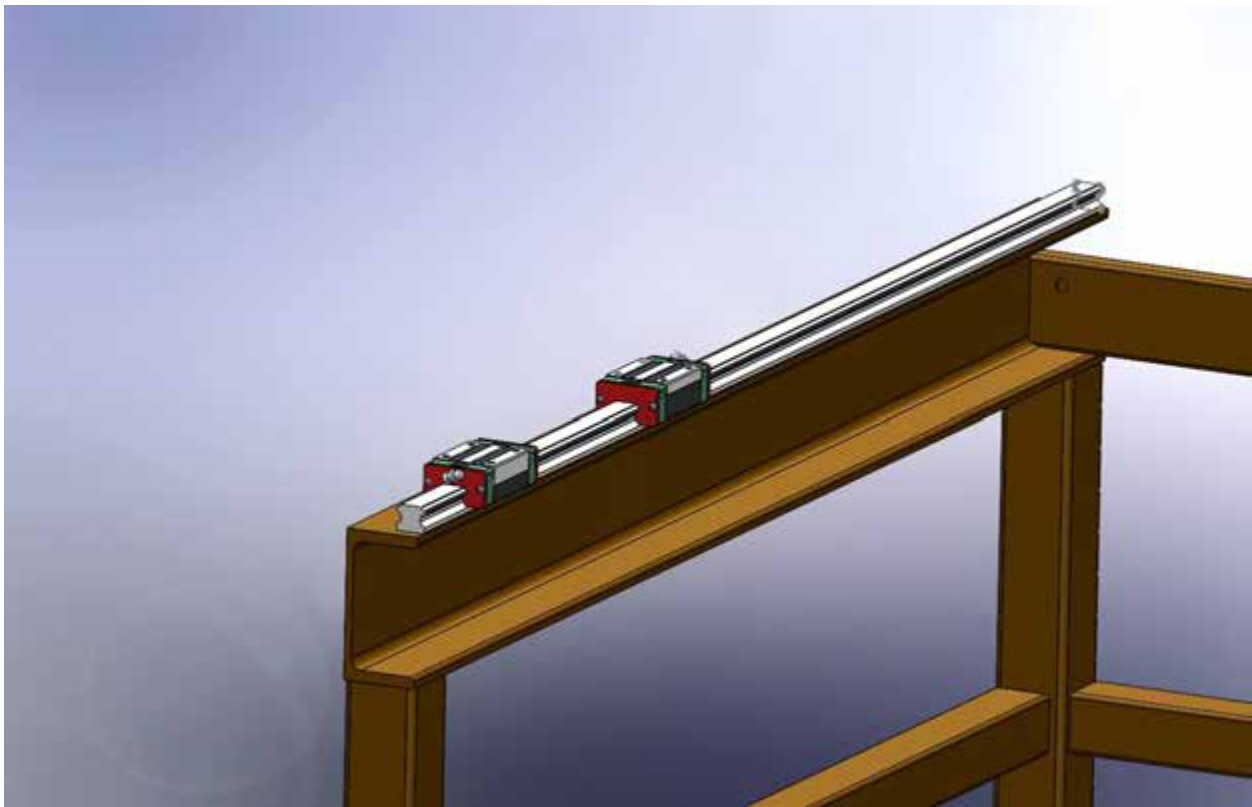


Рис. 2.5. Розміщення направляючих та кареток на 3д моделі верстата

Привід руху порталу реалізовано за допомогою крокових двигунів NEMA 24 (див. рис. 2.6.), встановлених з обох боків, синхронізованих через електронне керування. Вал двигуна обертає шестерню, яка в свою чергу робить переміщення по зубчастій рейці (див. рис. 2.7.). і таким чином обертальний рух перетворюється в прямолінійний поступальний рух і зміщує портал по осі Y. На корпусі з одної сторони приварюються перфоровані металеві кутики, а з іншої сторони робиться отвір у профільній трубі, для закріплення рейки з допомогою металевих шпильок з різьбою M8. Рейка має два отвори з різьбою куди вкручується шпилька та фіксується гайкою. Далі з одного боку рейки, шпилька проводиться через отвір в металевому кутику та фіксується гайками з обох боків кутика та контр гайкою. Аналогічна процедура проводиться на іншій стороні, і повторюється в загальному для обох рейок (див. рис. 2.8.). Щоб запобігти провисанню рейки під нею до станини приварені металеві кутики, які підтримують її.



Рис. 2.6. 3д модель двигуна NEMA 24

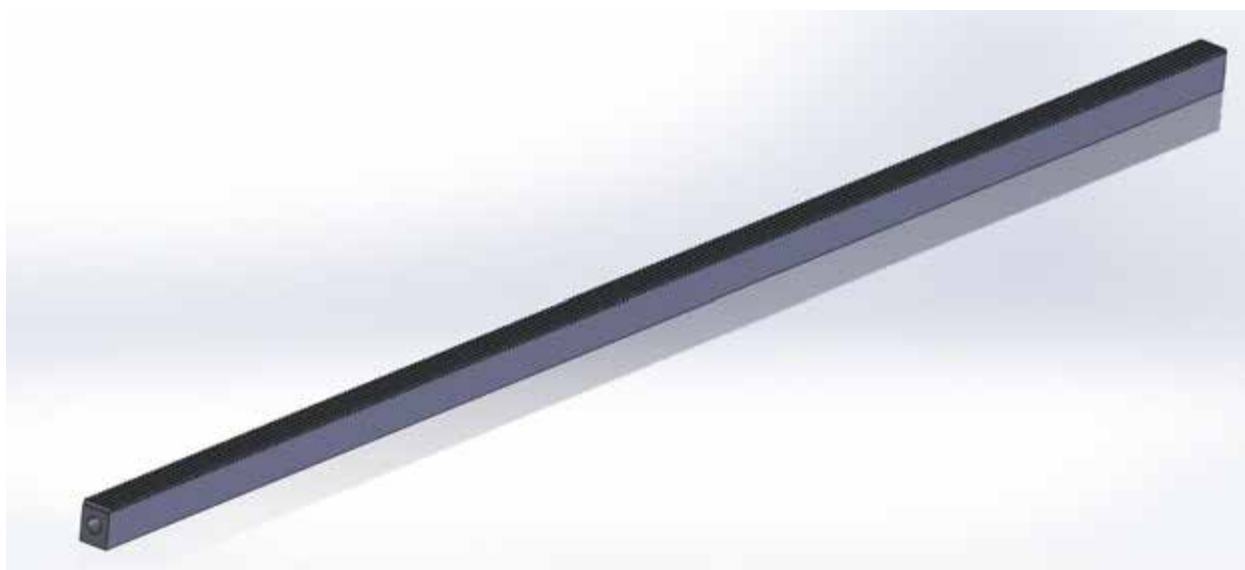


Рис. 2.7. Вигляд зубчастої рейки довжиною 800 мм.

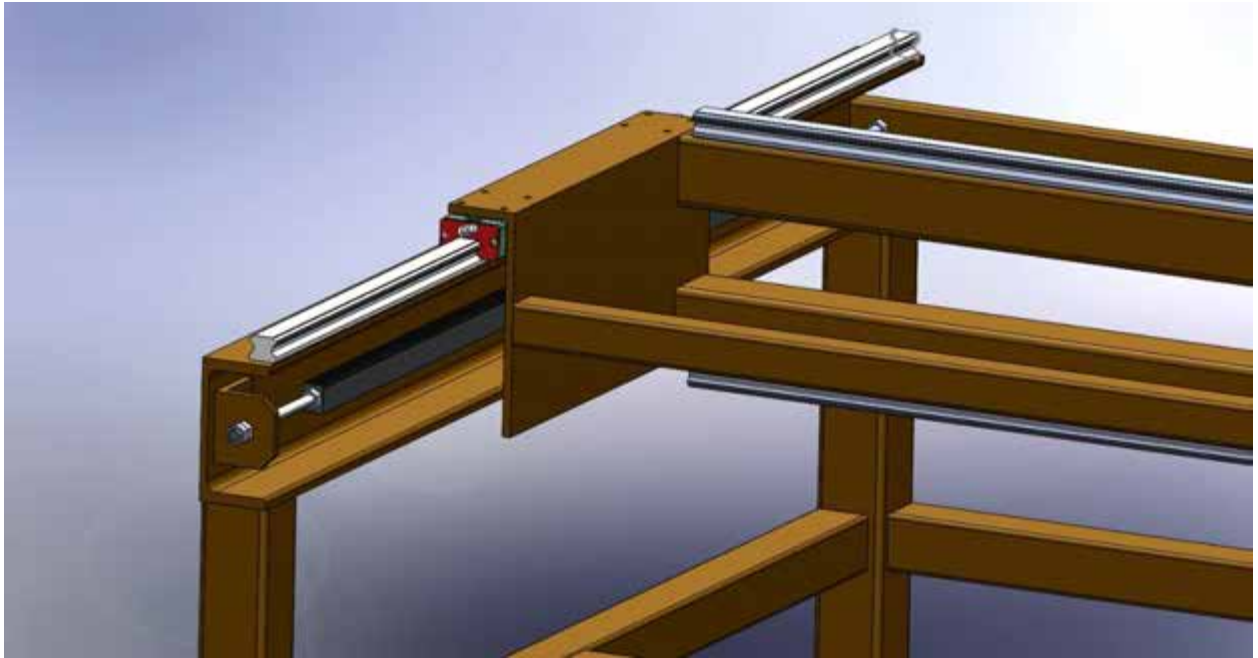


Рис. 2.8. Вигляд закріпленої рейки на 3д моделі верстата.

Розглянемо конструкцію порталу. Для неї ми використали набір таких елементів, що наведені в таблиці 2.3.

Елементи порталу

Таблиця 2.3.

Елементи конструкції	Висота	Кількість
Профільна труба 50x50x5 мм.	1364 мм.	2 шт.
Профільна труба 30x30x3 мм.	1364 мм.	1 шт.
Гнутий Г-подібний сталевий профіль 6 мм.	300x150x58 мм.	2 шт.
Лист алюмінію 3 мм.	1364x150	1 шт.
Кроковий двигун NEMA 24		2 шт.
Зубчаста рейка 1200 мм.		1 шт.

Після процесу зварювання між собою профільних труб та гнутого Г-подібного сталевого профілю, гвинтами М4 з циліндричною головкою монтуємо портал на каретки по осі Y. Також за вже відомим нам способом встановлюємо лінійні

направляючі та каретки для переміщення шпindelного вузла по осі X (див. рис. 2.9.).



Рис. 2.9. Вигляд 3д моделі рухомого порталу на станині верстата

До порталної рами приварюємо кронштейни для крокових двигунів та встановлюємо їх. Також монтуємо зубчасту рейку, по якій буде переміщуватися шпindelний вузол. Зашиваємо алюмінієвим листом простір між лінійними направляючими для естетичного вигляду верстата. До основної рами верстата з допомогою алюмінієвих заклепок кріпимо корпус для блоку електроніки та розміщуємо робочий стіл, який являє собою лист ДСП висотою 15 мм закріплений шурупами (див. рис. 2.10).

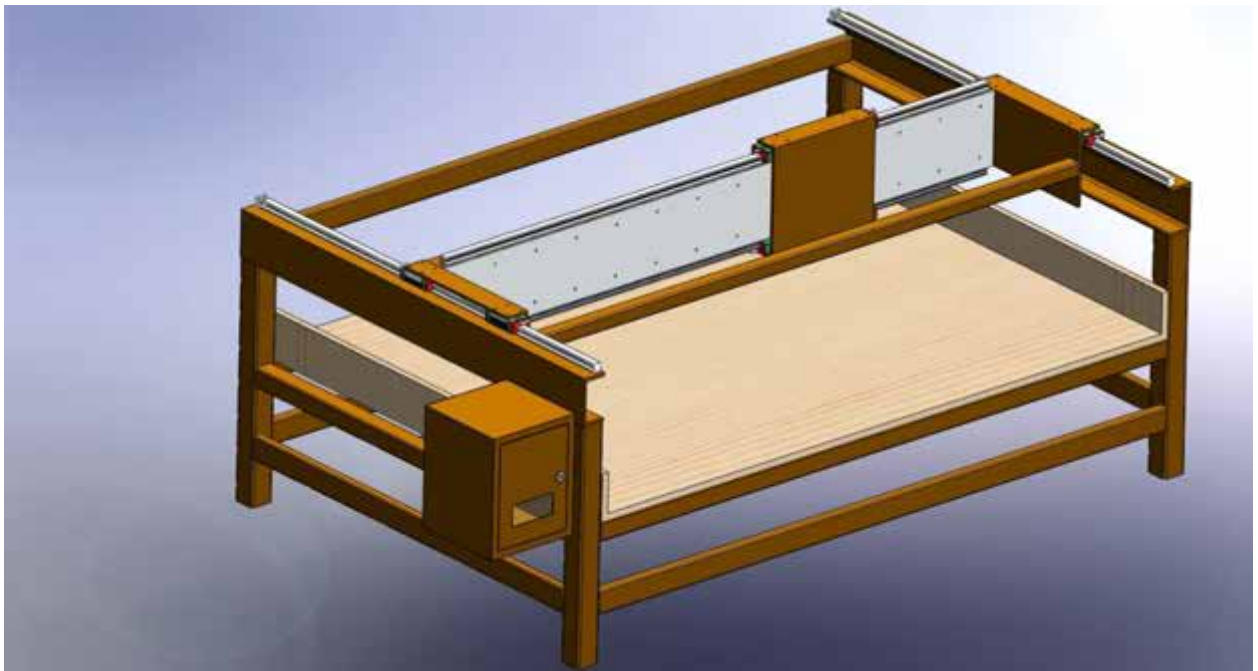


Рис. 2.10. Фінальний вигляд станини з порталом ЧПК верстата

Наступним кроком монтуємо шпindelний вузол, який складається з елементів наведених в таблиці 2.4.

Елементи шпindelного вузла

Таблиця 2.4

Елементи конструкції	Кількість
Гнутий U профіль 250x150x56x6 мм.	2 шт.
Гнутий Г-подібний профіль 195x150x56x5	1 шт.
Перфорована сталевая пластина 250x200x5	1 шт.
Перфорована сталевая пластина 206x200x10	1 шт.
Сталевий брусок 150x60x12	2 шт.
Сталевий брусок 120x60x12	2 шт.
КГП 1605 з токарною обробкою кінців 500 мм	1 шт.
Лінійна напрямна типу HGR20H 500 мм.	2 шт.
Каретка HGH 20CA	4 шт.
Шків	2 шт.

Кроковий двигун NEMA 24	2 шт.
Зубчаста шестерня	1 шт.
Привідний, зубчастий плоский пас	1 шт.
Корпус шпиндельного модуля	1 шт.
Шпиндель	1 шт.
Кріплення шпинделя	2 шт.

U-подібний профіль, який має товщину 6 мм. кріпимо на 4 каретки, що розмістили раніше по осі X, гвинтами прикручуємо лише нижню частину. На верх профілю кладемо перфоровану пластину, а поверх неї ставимо Г-подібний профіль і всі ці елементи скручуємо між собою з допомогою 8 гвинтів з різьбою M4. На фасадній частині цих профілів з відступами від лівого та правого країв на 25 мм. приварюємо чотири сталеві бруски, які будуть слугувати кріпленням для лінійних направляючих осі Z. Робимо примірку напрямних до брусків, намічаємо місця для отворів та просверджуємо їх. Потім нарізаємо різьбу та прикручуємо лінійні направляючі. Як я вже говорив, при такій роботі дуже важливо не допустити перекосів конструкції, бо в майбутньому – це буде грозити зносом кареток та неточному позиціонуванні, що в роботі такого верстата являється неприпустимою помилкою. Монтуємо по 2 каретки на кожну напрямну. На Г-подібний профіль прикручуємо кріплення валу кульково-гвинтової передачі, далі (КГП).

На перфоровану пластину з одного боку прикручуємо кріплення шпинделя, а з іншого кріплення гайки для КГП. Потім цю пластину разом з гвинтом встановлюємо на шпиндельний модуль. Відразу після цього можна прикріпити сам шпиндель та скріпити між собою болтами та гайками M10 дві частини кріплення шпинделя.

Один кроковий двигун монтуємо на пластину, він буде передавати крутний момент через шестерню на зубчасту рейку та переміщатиме шпиндельний модуль по осі X. А інший двигун вставляємо в кронштейн, який прикручений до Г-подібного профілю та з'єднуємо його з гвинтом. Крутний момент цього двигуна

буде передаватися від його валу на шків, який буде обертати плоский пас, а той в свою чергу обертає шків, що розміщений на гвинту. Таким чином буде забезпечений рух шпиндельного вузла по осі Z. Загальний вигляд верстата ви можете побачити на рис. 2.11.

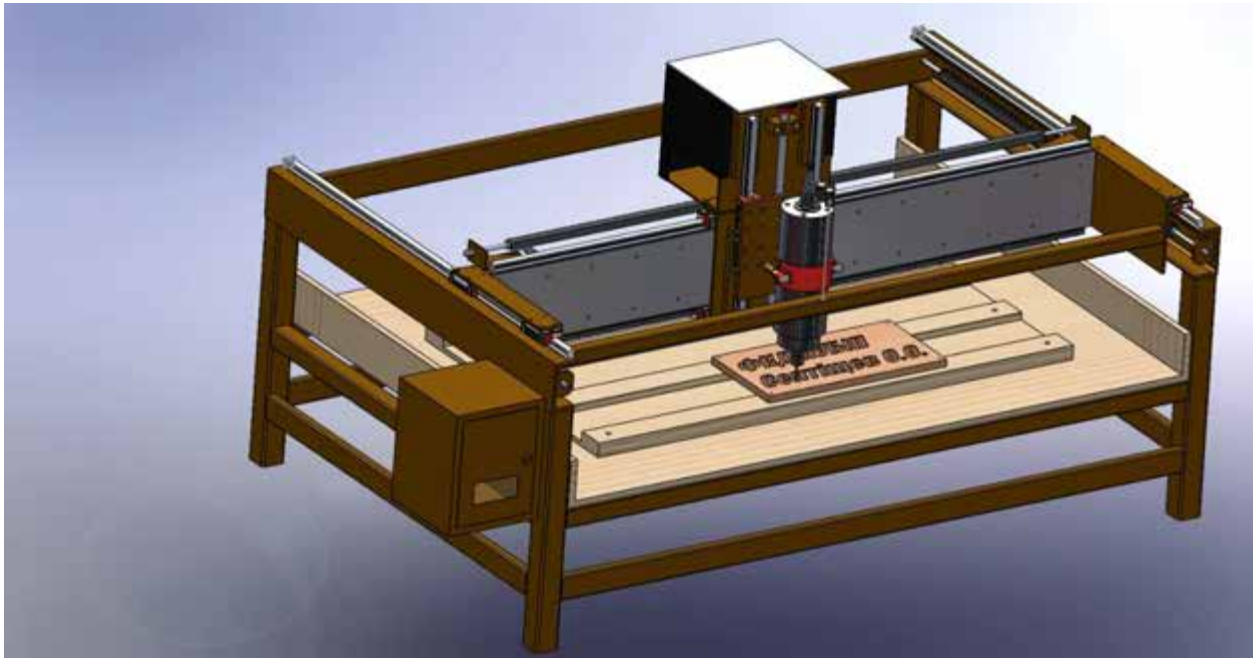


Рис. 2.11. Вигляд 3д моделі віртуального верстата та справжнього, відповідно.

Так як шпиндель яким ми обладнали даний верстат має водяне охолодження, то для цього окремо виведено резервуар наповнений водою. В нього поміщений

насос, а до шпинделя підведена система гнучких каналів через які вода проходить та повертається в резервуар таким чином охолоджуючи двигун. Також з метою безпеки всі електричні кабелі компактно проведені в гнучкий кабель канал та не заважають при роботі верстата.

Розміри робочої зони даного верстата наведені в таблиці 2.5.

Розміри робочої зони

Таблиця 2.5

Довжина	Ширина	Висота
1000 мм.	600 мм.	110 мм.

2.3. Система керування ЧПК верстатом

Тепер перейдемо до програмного керування даним верстатом. Оберти шпинделя керуються з допомогою частотного перетворювача(інвертора). Він оснащений цифровим управлінням, завдяки якому швидко можна змінювати величину напруги, частоту та керувати виходом. Максимальні оберти шпинделя 24000 об/хв. Заміну фрези оператор проводить вручну.

Для керування двигунами ЧПК верстата ми обрали доступну програму під назвою Mach 3. Дана програма має досить гнучкий інтерфейс та знаходиться у вільному доступі. Вона має як переваги так і недоліки.

Розпочнемо з переваг цієї програми керування. Перше це – те що дана програма фактично перетворює звичайний ПК на потужний та економічний контролер для верстата. Вона має доволі простий інтерфейс та гнучке налаштування. Інтерфейс має панелі з кнопками «Старт», «Пауза», «Зупинка», можна також працювати в режимі ручного керування(Jog) (див. рис. 2.12.). З її допомогою можна повністю налаштувати кроки на мм., швидкість та прискорення осей, інверсію напрямку. Можна створювати макроси, скрипти, ручні команди M-коду. Також вона відкриває, читає та виконує G-коди різних САМ-програм

(SolidCAM, Aspire, Fusion 360, ArtCam). Коди можна редагувати прямо в програмі. Також на моніторі ви зможете спостерігати за візуалізацією маршруту інструмента. Дана програма ліцензована, тому ви можете придбати собі ліцензію, якщо плануєте використовувати її в комерції. Вона купується один раз, довічна, прив'язка йде до користувача, а не до комп'ютера. Також можна завантажити демо версію з офіційного сайту, але вона буде мати певні обмеження. Виконуватиме не більше 500 рядків G-коду, обмежена функціональність деяких макросів та немає дозволу на комерційне використання. Але за сьогоднішніми мірками ліцензія є відносно недорогою.

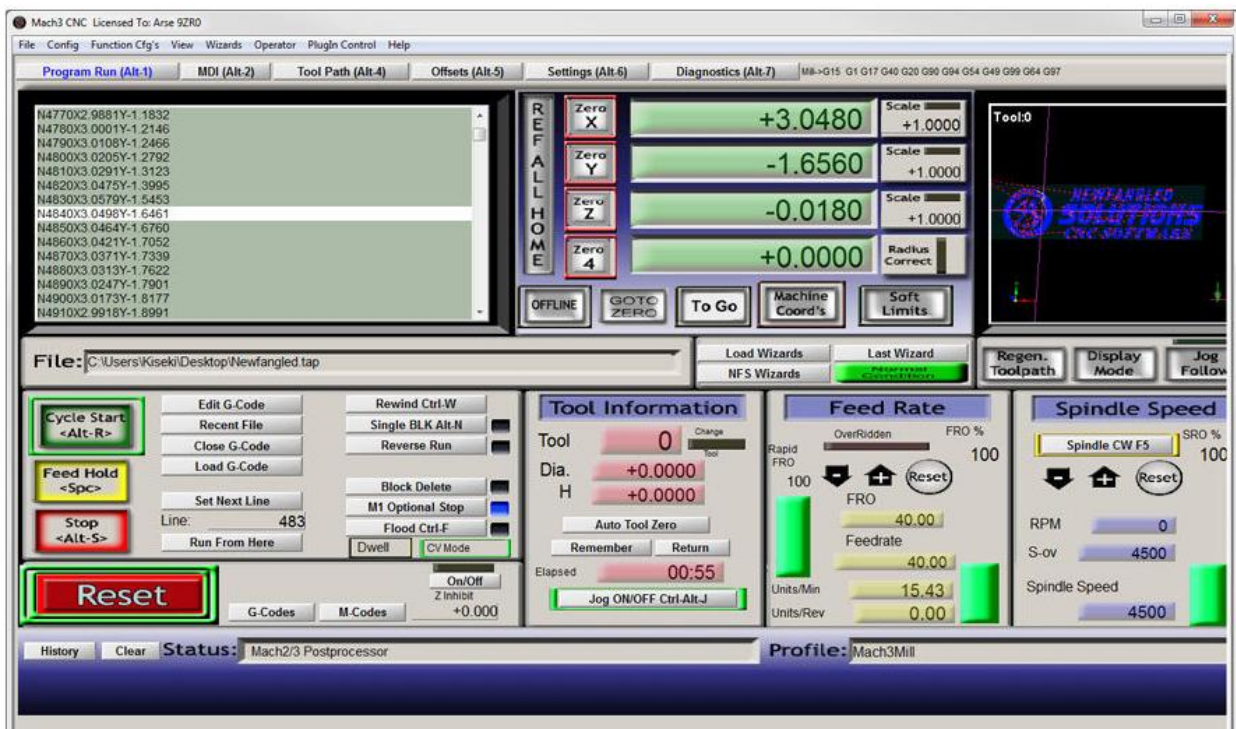


Рис. 2.12. Інтерфейс програми Mach3

До недоліків цього програмного забезпечення можна віднести те, що воно не працює напряму із сучасними операційними системами Windows(8, 10, 11). Mach 3 показує найкращу стабільність на ОС Windows XP/7, пряме керування відбувається через LPT порт підключений від комп'ютера до модуля керування ЧПК. Також хоч вона і має простий інтерфейс, але на сьогоднішній день він вже застарів, але це не

заважає їй досі триматися на ринку. Є новіший аналог Mach 4, але вона дорожча та складніша для розуміння.

Отже, Mach3 – це надійна, потужна і дуже гнучка програма керування, яка вже багато років залишається популярною на ринку створення ЧПК верстатів. Її можна повністю налаштувати під свої потреби без передплати за «бренд». Підтримка широкого спектру контролерів та простота інтерфейсу роблять її чудовим вибором, як новачкам, так і досвідченим користувачам.

Як взагалі відбувається робочий процес на даному ЧПК фрезерному верстаті? Спочатку розробляється 3д модель певного виробу. При розробці обов'язково враховуються технічні можливості верстата, а саме розміри робочої зони. Потім готову 3д модель потрібно завантажити в САМ програму яка створить G-code для її обробки. Ми використовуємо програму ArtCam 2008 року (див. рис. 2.13.).

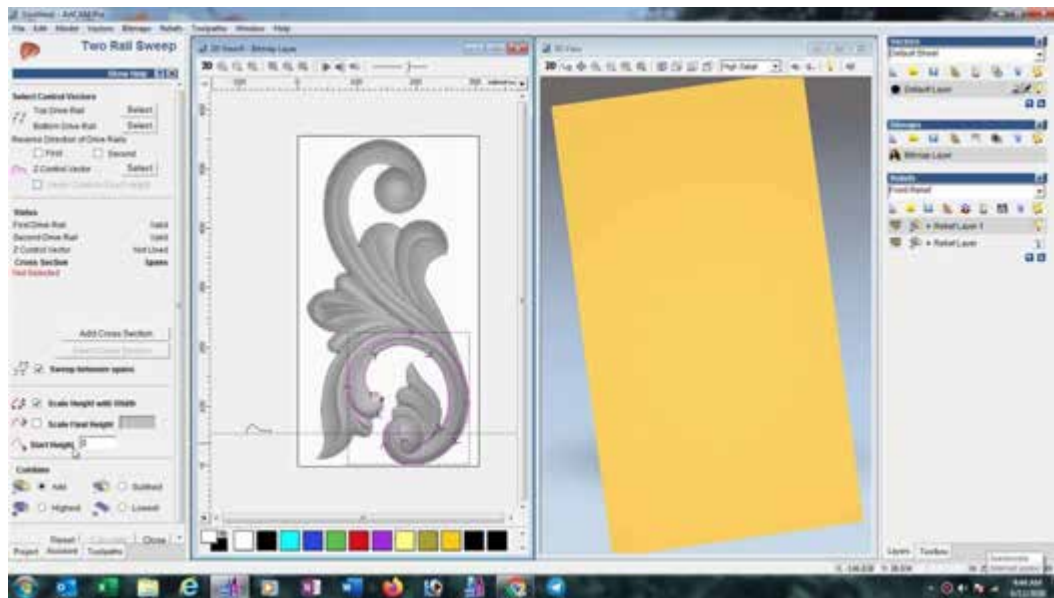


Рис. 2.13. Інтерфейс програми ArtCam 2008

Вона хоч вже і застаріла, але із поставленими завданнями справляється. В самій програмі ви виставляєте обмеження по 3д моделі та інші характеристики. Наприклад, ви маєте завдання створити дерев'яну табличку з назвою класу, розмірами 300x150мм.

Ви створили її 3д модель і задали вихідні розміри, далі просто зберігаєте її у форматі STL – це стандартний формат для 3д моделей. Потім файл в форматі STL імпортуєте до середовища програми ArtCam. Для цього потрібно в меню вибрати наступні кнопки: «File → Import → *3D model* → вибираєте .stl або інший підтримуваний формат».

Тепер доволі відповідальний момент, потрібно вказати розміри заготовки та визначити нульову точку. В нашому випадку заготовка буде більшою ніж сама 3д модель. Бо її потрібно жорстко, з допомогою шурупів, закріпити до дерев'яного столу. Тобто треба залишити місце під закріплення зазвичай ми накидаємо 20-25 мм від країв заготовки, щоб при обробці деталі фреза не зачепила шурупи.

Встановивши всі відповідні розміри заготовки ми визначаємо нульову точку, зазвичай обирається центр заготовки. Потрібно налаштувати траєкторію обробки. А саме обрати тип обробки чорнова або чистова. Та вказати фрезу, швидкість обертів шпинделя, подачу та глибину проходу за один раз.

Зазвичай для економії часу спочатку проводиться чорнова обробка заготовки з допомогою циліндричної фрези діаметром 6 мм. А потім чистова обробка конусною фрезою з малим діаметром. Чим менший діаметр фрези тим довше триватиме процес обробки, але якість буде кращою. Для дуже хорошої якості рекомендую проводити чистову обробку дерева в кілька етапів зі зменшенням діаметру конусної фрези. Так буде менша вірогідність «задирів» та сколів.

В самій програмі ви можете зробити власний магазин фрез в залежності від їхньої кількості у вашому арсеналі. Там вказуєте тип фрези, її розміри, матеріал з якого вона виготовлена та присвоюєте їй певну назву. Один раз провели таку процедуру і вже для наступної заготовки програма автоматично буде пропонувати вам створені «пресети» фрез.

Потім програма буде проводити розрахунок траєкторії для цього натискаємо: «Calculate Toolpath». Після того, як ArtCam проведе розрахунок ви можете візуально переглянути 3D-симуляцію.

Далі просто експортуємо готовий G-code на флешку. Для цього обираємо: «File → *Save Toolpath* → **Post Processor**» формат обираємо **Mach3 Arcs (mm)** або **Mach3 Inches**, залежно від одиниць вимірювання. У фіналі ви отримаєте файл з розширенням .tap (найбільш поширений), або .nc, .txt – вони також приймаються Mach3.

Далі запускаємо програму Mach3 в ній натискаємо: «File → *Load G-Code*» та обираємо .tap файл. Тепер потрібно встановити нульові координати на верстаті. Як це зробити?

Спочатку потрібно закріпити заготовку на робочому столі шурупами. Але перед тим як почати це робити рекомендую намітити місця для отворів олівцем, закріпити фрезу та запустити шпиндель. І безпосередньо ним в ручному режимі керування вирізати отвір під шуруп. Для чого така процедура? Просто в більшості випадках якщо почати закручувати шуруп в тонку заготовку вона може дати тріщину, тому краще перестрахуватися. Якщо дерев'яна заготовка має прямокутну форму то перетином діагоналей отримуємо її центр, намічаємо його олівцем. Далі в ручному режимі керування потрібно підвести шпиндельний модуль так, щоб середина фрези максимально точно розмістилася в намічений центр (ця процедура проводиться з вимкненим шпинделем). Після цього в програмі вказуєте, що це нульова координата, виставляєте число об/хв шпинделя, вмикаєте насос охолодження двигуна і запускаєте керуючу програму. Це дуже важлива процедура перед запуском ЧПК, бо саме з цієї точки інструмент почне виконання G-коду.

Отже підсумовуючи, можна сказати, що завдяки простоті та технологічності збірки, така конструкція верстата є поширеною в деревообробному ЧПК-обладнанні початкового та середнього рівня складності, зокрема в умовах дрібносерійного та індивідуального виробництва. До того ж, модульний принцип побудови дозволяє у перспективі розширити функціонал верстата, не змінюючи базову архітектуру.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ЧПК ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТУ ПО ДЕРЕВУ

3.1. Вибір об'єкта дослідження, матеріалів та інструменту, підготовка експерименту

Об'єктом мого дослідження являється процес фрезерування деревини з допомогою фрезерного верстату з числовим програмним керуванням (ЧПК), рама якого сконструювана за схемою з рухомим порталом. Дане дослідження проводилося на самостійно зібраному верстаті, який оснащений електрошпинделем, що має потужність 2,2 кВт з водяним охолодженням, лінійними напрямними типу HGR20, системою передачі через зубчасті рейки та кроковими двигунами NEMA 24. Керування верстатом здійснюється з допомогою програми Mach3.

Для якісного аналізу ефективності фрезерування я обрав шість типів деревних матеріалів. Вони між собою відрізняються щільністю, твердістю та вологістю, їхні властивості наведені в таблиці 3.1. Такий підбір дозволить мені оцінити універсальність різних технологічних режимів під час роботи з деревиною різного походження.

Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів Таблиця 3.1

№	Матеріал	Середня щільність, кг/м ³	Орієнтовна вологість, %	Твердість по Брінеллю (для деревини), МПа
1.	Сосна	520	10 – 12	20 – 22
2.	Дуб	720	9 – 11	35 – 45
3.	Вишня	650	10 – 13	30 – 35
4.	Тополя	450	12 – 15	15 – 18
5.	Фанера	600	8 – 10	–
6.	МДФ	750	6 – 8	–

В процесі фрезерування застосовувались інструменти (див. рис. 3.1.) з твердого сплаву (карбіду вольфраму) таких різновидів:

- **Конусна фреза R0.75 D8 L100/45** – для 3D обробітку з гладкими переходами;
- **Кінцева фреза D6 L60/25-3T** – універсальна фреза для контурної обробки;
- **Радіусна фреза R2 D4 L60/30-2T** – для заокруглення та фасок.

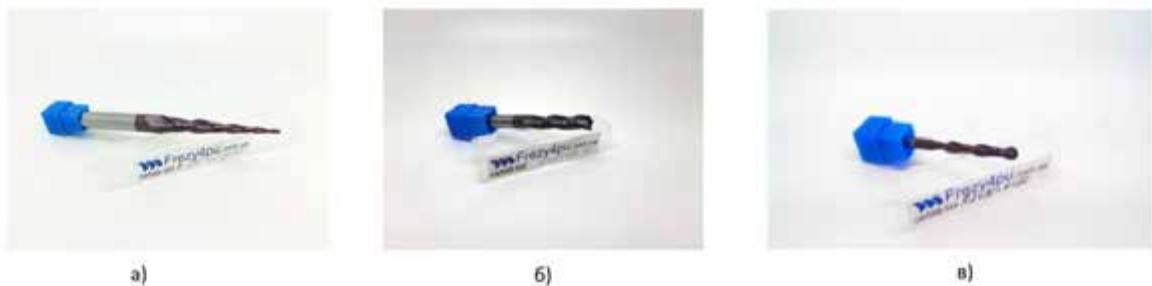


Рис. 3.1. Інструмент для обробки дерев'яних заготовок: а) – конусна фреза; б) – кінцева фреза; в) – радіусна фреза.

Перед початком експерименту верстат було відкалібровано. За допомогою ручного пробника було визначено нульові координати, перевірено взаємну перпендикулярність осей та надійність фіксації заготовок. Кожна з них мала габаритні розміри $100 \times 100 \times 20$ мм, а обробка виконувалась фрезою, згідно із заданими параметрами.

Заготовки фіксувалися жорстко до робочого столу верстата за допомогою шурупів. Також під час обробки проводився контроль температури шпинделя та вібрацій під час обробки.

Всі досліді проводилися в ідентичних умовах навколишнього середовища (t близько 21°C , вологість приблизно 50%), що дає можливість порівнювати отримані результати з мінімальним впливом зовнішніх чинників.

3.2. Дослідження впливу швидкості обертання, подачі та глибини різання на якість поверхні

Мета цього етапу дослідження це – встановлення взаємозв'язку між параметрами режиму фрезерування (частота обертання шпинделя, швидкість подачі інструменту та глибина різання) та обробленої поверхні деревини. Виявлення оптимального набору цих параметрів дає змогу поліпшити точність, чистоту обробки та зменшити зношення різального інструменту.

У ході експерименту використовувалися три змінні:

- Швидкість обертання шпинделя: 10 000, 15 000 та 20 000 об/хв;
- Швидкість подачі інструменту: 600, 1000, 1500 мм/хв;
- Глибина різання: 0.5, 1.0 та 1.5 мм.

Обробка проводилася з однаковою глибиною проходу на заготовках з сосни, дуба, фанери та МДФ. Для кожної серії фрезерувань візуально та на дотик оцінювалася якість поверхні: наявність задирок, слідів підпалу, вирваних волокон, а також загальний рівень шорсткості. З результатами експерименту можна ознайомитися в таблиці 3.2 .

Залежність якості поверхні від режимів фрезерування (для сосни) **Таблиця 3.2**

№	Оберти шпинделя, об/хв	Подача, мм/хв	Глибина, мм	Якість поверхні	Додаткові ефекти
1.	10 000	600	0,5	Висока	Легкі задирки по волокну
2.	15 000	1000	1,0	Дуже висока	Без дефектів
3.	20 000	1500	1,5	Середня	Місцями підпалювання
4.	20 000	1000	1,5	Низька	Виривання волокон

Для твердих деревних порід, таких як дуб та вишня, помічено: збільшення швидкості подачі понад 1000 мм/хв та глибини різання більше 1 мм призводить до підпалювання матеріалу та інтенсивної вібрації. Це особливо проявляється на низьких обертах, нижче 15 000 об/хв. Відповідно, якість обробки значно погіршується, з'являються мікроскопічні тріщини, які є характерною ознакою "жорсткого" контакту інструменту з деревиною. На противагу цьому, при 15 000 об/хв та глибині до 1 мм досягнуто ідеально гладкої поверхні. Вона одразу готова до наступного етапу – шліфування, не вимагаючи додаткових операцій.

Для м'якої деревини (тополя, сосна, фанера) найкращими параметрами є:

- оберти в районі **15 000–18 000 об/хв**;
- подача **800–1000 мм/хв**;
- глибина **0.8–1.0 мм**.

У порівнянні, фанера показала відмінну стабільність властивостей, незалежно від розташування волокон, в той час як тополя продемонструвала найгірші результати: відмічено розриви навіть при обережних налаштуваннях.

На рисунку 3.2. графічно зображені залежності якості від глибини різання та впливу подачі на чистоту заготовки.

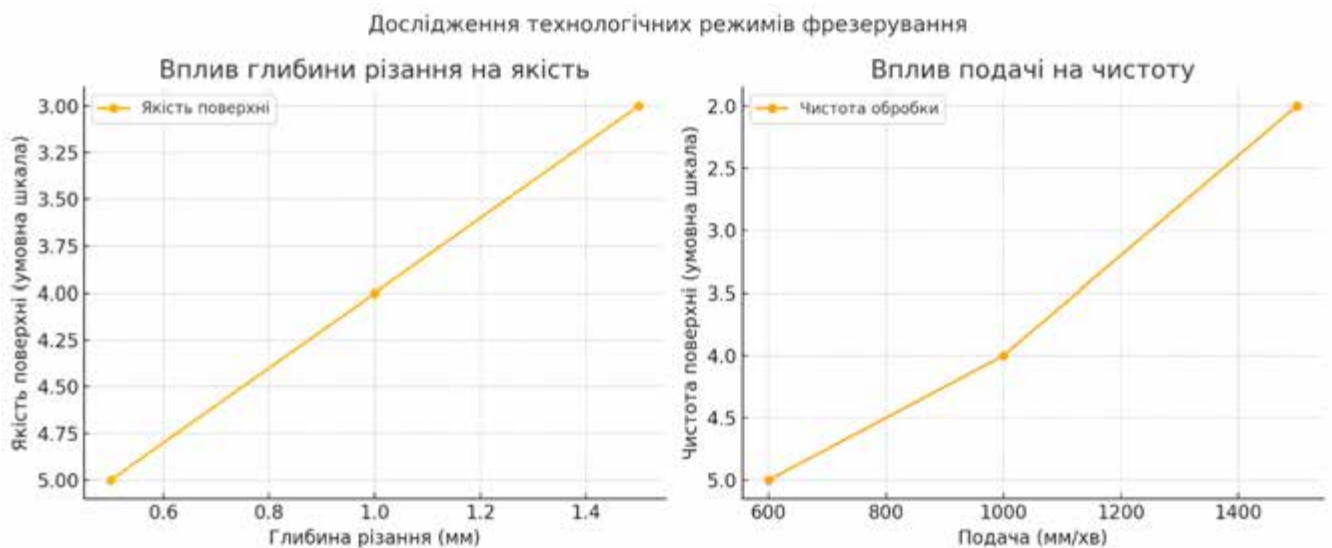


Рис. 3.2. Графіки залежностей

Описати дані графіки словесно можна так:

- Зі зростанням **глибини різання** підвищується ризик виникнення задирок та перегріву фрези;
- Зі збільшенням **подачі при фіксованих обертах** – спостерігається погіршення чистоти обробки, особливо при роботі з твердими матеріалами;
- Найкращого результату можна досягти, застосовуючи середню швидкість обертання (15 000) у поєднанні з середньою швидкістю подачі (1000 мм/хв).

Оптимальні параметри фрезерування деревини визначаються щільністю матеріалу та характером його волокнистої структури. Для отримання поверхні найвищої якості необхідно знаходити оптимальне співвідношення між швидкістю подачі та частотою обертання фрези, запобігаючи перевантаженню обладнання або падінню обертів, котрі провокують вібрацію і появу дефектів. Варто пам'ятати, що м'які породи вимагають використання дуже гострого інструменту та знижених подач, аби уникнути виривання волокон, у той час як для твердих сортів важлива стабільна швидкість обертання і менша глибина обробки.

3.3. Аналіз ефективності різних режимів обробки при роботі з твердими та м'якими породами деревини

На даному етапі було проведено порівняльний аналіз ефективності фрезерування різних типів деревини залежно від їх фізико-механічних властивостей. Окрему увагу зосереджено на тому, як твердість матеріалу впливає на визначення найкращих технологічних параметрів. Мова про швидкість, з якою обертається шпиндель, про швидкість подачі різального інструменту та про глибину, на яку він заглиблюється у матеріал.

Для забезпечення об'єктивності досліджень, для кожної дерев'яної породи були обрані режими, максимально наближені до промислових умов. Критеріями ефективності в цьому дослідженні були:

- Якість обробленої площини (оцінювалася візуально і тактильно);
- Стабільність процесу (відсутність вібрацій, задирок, обвуглювання);
- Придатність заготовки до подальшої фінішної обробки (шліфування, покриття).

Результати аналізу було узагальнено в таблиці 3.3.

Результати аналізу ефективності різних режимів обробки **Таблиця 3.3**

Матеріал	Категорія	Оберти шпинделя (опт.)	Подача (мм/хв)	Глибина (мм)	Якість поверхні	Особливості
Сосна	М'яка	15 000	1000	1,0	Висока	Легке виривання волокон на високих обертах
Дуб	Тверда	15 000	800	0,8	Дуже висока	Найкраща обробка при малих глибинах
Вишня	Тверда	16 000	900	0,8	Висока	Добре шліфується після обробки
Тополя	М'яка	14 000	800	0,7	Середня	Низька стабільність волокон
Фанера	М'яка	16 000	1000	1,0	Висока	Стабільна якість по всій площині
МДФ	Комбінова на	16 000	1000	1,0	Висока	Може накопичуватись пил, потребує аспірації

Отримані результати нам вказують на те, що м'які породи деревини (сосна, тополя, фанера) показують хороші результати під час фрезерування на високих швидкостях шпинделя. Водночас, потрібен обережний підхід до глибини різання: надмірне навантаження може викликати виривання волокон та зниження кінцевої якості поверхні.

Тверді породи, як-от дуб та вишня, вимагають менших глибин врізання та помірної швидкості подачі. Бо значні навантаження можуть викликати вібрації та підпалювання деревини. Найкраще себе зарекомендував дуб – якість обробки, за умови коректного підбору параметрів, виявилась найвищою з усіх випробуваних матеріалів.

Матеріали з деревини, зокрема МДФ та фанера, визначаються стабільною якістю обробки. Разом з тим, під час фрезерування МДФ утворюється пил надзвичайно дрібної дисперсії, що вимагає ефективного обладнання для аспірації. Фанера, натомість, завдяки своєму багатошаровому складу продемонструвала незначні зміни якості за різних режимів роботи.

На основі цих результатів можна зробити такі висновки:

- Для м'яких порід деревини потрібно застосовувати помірну подачу й оберти з обмеженням глибини різання до 1.0 мм.
- Для твердих порід варто обирати меншу глибину різання та повільнішу подачу, щоби запобігти перегріванню фрези та зберегти точність роботи.
- Найбільш універсальним матеріалом показала себе фанера, а найбільш вибагливим – тополя через нестабільну структуру волокон деревини.

3.4. Оцінка точності обробки та порівняльний аналіз отриманих результатів

На фінальному етапі дослідження було оцінено геометричну точність фрезерування деревних матеріалів різноманітних видів. Ключовою задачею було зіставлення наперед визначених розмірів у САМ-моделі з тими, що були отримані на практиці у кінцевих виробах, створених з використанням різних технологічних параметрів, а також вивчення відхилень і причин, які їх зумовлюють.

Для оцінки точності були використані контрольні зразки розміром 100×50 мм, які фрезерувались з однаковим контуром та фіксованою глибиною обробки 3 мм. Вимірювання здійснювались з використанням штангенциркуля (точність 0.02 мм) у трьох контрольних точках (по краях і в центрі заготовки). Отримані значення порівнювались з проектними розмірами з G-коду.

За своїми спостереженнями можемо сказати, що м'яка деревина (сосна, тополя) показала тенденцію до перерізання на внутрішніх кутах, оскільки матеріал у цих місцях чинив менший опір. Це викликало негативне відхилення за шириною, яке могло досягати −0.4 мм при високій швидкості обертання та подачі. А тверді сорти деревини (дуб, вишня) показали високу розмірну стійкість, однак при поглибленні фрезерування (1.5 мм та більше) виникало значне тертя. У деяких випадках це призводило до зміщення деталі на 0.2–0.3 мм. Фанера і МДФ продемонстрували найменші відхилення – у межах ± 0.1 мм, що зумовлено однорідністю структури матеріалу. Результати експерименту занесені до таблиці 3.4.

Результати експерименту

Таблиця 3.4

Матеріал	Заданий розмір, мм	Фактичний розмір, мм	Відхилення, мм	Характер помилки
Сосна	100.00	99.62	−0.38	Перерізання на кутах
Дуб	100.00	99.84	−0.16	Нормальний знос інструмента

Вишня	100.00	99.90	-0.10	Допуск в межах норми
Тополя	100.00	99.52	-0.48	Виривання волокон + вібрація
Фанера	100.00	99.92	-0.08	Незначне відхилення
МДФ	100.00	99.94	-0.06	Висока точність

Аналізуючи результати можна відмітити такі фактори, що впливають на точність обробки.

Перший – це жорсткість конструкції верстата. Навіть найменші зміни в геометрії порталу або недостатньо міцне закріплення деталі впливають на точність позиціонування.

Другий фактор – це затуплення фрези, яке стає причиною вібрацій, які найбільш помітні при обробці м'якої деревини.

Третій – це вологість матеріалу. На прикладі тополі, з її найбільшою вологістю (~15%), було виявлено розшарування та деформацію після обробки.

Та ще один досить важливий фактор – це точність калібрування осей. Потрібно розуміти, що застосування ручного пробника, замість автоматичної калібровки, додає похибку, яка може сягати ± 0.1 мм.

Тому на мою думку, найбільш високу точність обробки продемонстрували матеріали з однорідною структурою – МДФ та фанера. Під час роботи з м'якими породами раджу зменшувати глибину різання та знизити кількість обертів, аби запобігти вириванню волокон. Щодо твердих порід, слідкуйте за гостротою інструменту та надійністю фіксації.

У переважній більшості випадків відхилення не перевищували ± 0.4 мм, що є прийнятним значенням для меблевого та художнього фрезерування.

В результаті проведення експериментальних випробувань технологічних параметрів фрезерного верстата з ЧПК було визначено оптимальні умови обробки

для різноманітних видів деревини. Дослідження впливу частоти обертання шпинделя, швидкості подачі та глибини різання на якість фінішної поверхні виявило, що кожен матеріал потребує індивідуального налаштування режимів фрезерування, враховуючи його щільність, твердість та вологість.

Найбільш стабільні результати було досягнуто при обробці фанери та МДФ – ці матеріали продемонстрували найменші відхилення у розмірах та високу якість поверхні. Для м'яких порід деревини (сосна, тополя) я б рекомендував знижувати оберти та глибину різання для уникнення виривання волокон. Тверді породи (дуб, вишня) потребують більш ретельного контролю над подачею та глибиною різання, оскільки перевищення допустимих значень призводить до погіршення точності та перегріву інструмента.

Всі зібрані експериментальні дані підкреслюють, що правильний вибір режимів фрезерування має вирішальний вплив не тільки на якість обробки, а й на загальну точність виготовлення деталей, ступінь зносу інструменту та ефективність всього процесу в цілому.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Розгляд потенційних загроз і факторів ризику, пов'язаних з використанням верстатів з ЧПК.

Фрезерні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) здобули широке застосування в деревообробці, пропонуючи високу точність, автоматизацію та збільшення продуктивності. Разом з тим, їхнє використання передбачає низку потенційних небезпек та ризиків, які потребують уваги для захисту працівників та забезпечення стабільної роботи обладнання.

При роботі з таким обладнанням можна нанести шкоду, як здоров'ю людини так і самому верстату. Зараз розглянемо потенційні загрози при роботі з ЧПК фрезерними верстатами.

Особливу увагу потрібно приділяти механічним ризикам. Дані верстати мають ротаційні частини. Шпиндель фрезерного верстата може обертатися з дуже високою швидкістю (до 24 000 тис. об/хв). Тому при неправильній експлуатації або відсутності захисних кожухів існує потенційна небезпека потрапляння частин тіла оператора в зону обробки.

При роботі верстату може відбутися викид заготовки, або фрези. Ненадійне закріплення заготовки, або зношені елементи інструментального тримача здатні призвести до відриву матеріалу чи фрези під час високої швидкості обробки, що становить загрозу для оператора.

Також не варто без необхідності втручатися вручну в роботу верстату. У випадку ручного втручання, коли інструмент налаштовують або змінюють, особливо не вимкнувши повністю механізм, ризик травмування рук значно збільшується.

Обробіток деревини супроводжується виникненням значної кількості дрібнодисперсного деревного пилу, який може стати причиною різних проблем зі здоров'ям, зокрема алергії, астми, хронічного бронхіту та навіть раку носоглотки.

Окрім того, пил може забивати вентиляційні отвори, спричиняючи перегрів електроніки та зменшення ефективності роботи обладнання. Різновиди пилу записані в таблиці 4.1.

Задля контролю за пилом можна використовувати місцеву витяжну вентиляцію (LEV), котра видаляє пил безпосередньо біля місця його утворення. Наприклад, система Jet Stripper, розроблена NIOSH, продемонструвала ефективність у зниженні викидів деревного пилу на 90% .

Різновиди пилу

Таблиця 4.1

Деревний пил	Хімічно забруднений пил	Пил з домішками металів або пластиків
Дрібнодисперсний пил (особливо небезпечний), крупні частинки, змішаний пил (з лакофарбових покриттів, клеїв, тощо). Зазвичай він виникає під час фрезерування, шліфування або свердління деревини.	Такий пил виникає при обробці ДСП, МДФ, фанери містить формальдегіди, смоли, клейові речовини. Він являється особливо небезпечним через наявність канцерогенів.	Якщо верстатом обробляють Композитні матеріали (дерево + метал, дерево + пластик) то пил може містити алюміній, ПВХ тощо.

Так як наше обладнання знаходиться під напругою, потрібно також враховувати електричні ризики. Потрібно робити візуальний огляд верстата перед роботою та перевіряти чи не пошкоджено ізоляцію. Бо такі проблеми як коротке замикання або перегрів перетворювача частоти можуть викликати пожежу, або зупинку виробничого процесу. Також важливу роль для безпечної роботи відіграє якість заземлення. Якщо вона буде недостатньою, то це може призвести до

ураження електрострумом при дотику до корпусу верстата. Схема безпечного електропідключення зображена на рис. 4.1.

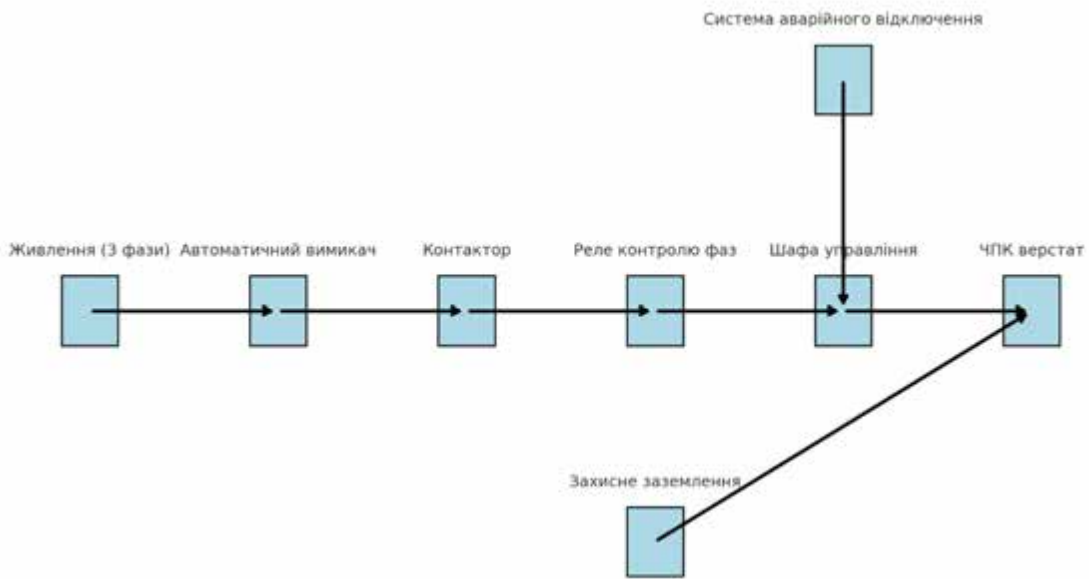


Рис. 4.1 Схема безпечного електропідключення ЧПК верстата

Задля зменшення людського фактору сучасні верстати обладнані ЧПК, але програму для обробки всерівно створює людина, і без помилок тут не обійтися. Інженер може випадково ввести невірні координати обробки заготовки, що в свою чергу може призвести до певних пошкоджень верстата або поломки заготовки. А ще в більшості через такі помилки, в разі раптового руху інструменту, може травмуватися оператор цього верстата. Все може статися також через збій програмного забезпечення.

При розміщенні таких верстатів варто звертати увагу на температурно-вологісні умови у приміщенні. ЧПК фрезерні верстати – це високоточне обладнання, тому вони дуже чутливі до змін температури й вологості у виробничому середовищі. І навіть незначні коливання можуть суттєво вплинути на якість обробки та довговічність устаткування.

Несприятливі умови можуть призводити до зміни геометрії деталей. Металеві деталі верстата можуть стискатись або розширюватися через температуру. А волога

буде впливати на властивості деревини, яка теж може набухати або усихати. Також можлива втрата точності, відхилення по осях або неправильне позиціонування інструменту. При неправильному температурному режимі можуть початися проблеми зі змазкою та електронікою. Наприклад, якщо в приміщенні буде досить низька температура, то змазка загустіє, а якщо дуже висока, то є ризики витікання змазки. При неправильному температурному режимі в електричних модулях може початися конденсація вологи, а це у свою чергу може призвести до короткого замикання та пожежі. Також можуть початися збої в системах керування верстатом.

Тому рекомендована температура в приміщеннях повинна коливатися від +15°C до +25°C. А відносна вологість варіюється в межах 40-60%. Якщо ви хочете забезпечити продуктивну та безпечну робочу обстановку, то потрібно продумати гарну вентиляцію та кондиціонування в приміщенні. Та підтримувати мінімальні коливання температури протягом доби.

Слід не забувати й про шумове навантаження, що створюється при роботі. Відомо, що при обробі твердих порід деревини або великою глибиною різі виникає підвищений шум (>85 дБ). Робота на високих обертах, використання неякісних або затуплених інструментів, вібрація верстата через неправильне встановлення або зношені вузли – це все джерела шуму. Які можуть погано відобразитися на здоров'ї робітників. Поступова втрата слуху, постійний дзвін у вухах, головні болі дратівливість та втома, через ці чинники в людини знижується концентрація та підвищується ризик аварій на виробництві.

Відповідна кваліфікація персоналу зменшить ризики інцидентів на робочому місці. При низькому рівні підготовки працівників можуть виникнути такі проблеми, як невірне налаштування координат та параметрів обробки, відсутність розуміння ризиків, порушення правил безпеки. При неправильному налаштуванні програми керування з'являється ризик псування заготовки, або навіть поломки дороговартісного обладнання. Ігноруючи інструкції з експлуатації обладнання працівник може недооцінювати небезпеку при роботі з високими швидкостями або без захисних кожухів. Відсутність засобів індивідуального захисту, самовільне

втручання в роботу обладнання та нехтування регламентами технічного обслуговування, все це може негативно повливати на роботу підприємства.

4.2. Забезпечення оператора необхідними засобами індивідуального захисту та заходи безпеки при фрезеруванні деревини.

Як я вже говорив фрезерування деревини на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) містить у собі чимало потенційних загроз. Серед них – висока швидкість обертання фрези, що може призвести до травм, поява деревного пилу, здатного викликати проблеми зі здоров'ям, ймовірність викиду обробленої деталі або навіть самого інструменту, а також шкідливий вплив шуму. З огляду на це, вкрай важливо забезпечити оператора відповідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), а також суворо дотримуватися правил безпеки під час роботи з фрезерним обладнанням.

Основними засобами індивідуального захисту при фрезеруванні деревини є:

Захисні окуляри чи щитки. Вони оберігають очі від тирси, відколів деревини, пилу та випадкових часток. Вони повинні мати боковий захист та відповідати стандартам міцності.

Протишумові навушники або беруші. Під час роботи фрезерного верстата рівень шуму нерідко перевищує безпечну межу (80–85 дБ), тому захист органів слуху є важливим для запобігання його погіршенню.

Респіратори чи маски з фільтром. Дрібнодисперсний деревний пил може викликати алергічні реакції, проблеми з бронхами або навіть хронічну астму. Особливо важливо використовувати захист дихальних шляхів при обробці хвойних порід чи ДСП/МДФ з формальдегідними смолами.

Рукавиці. Застосування рукавиць дозволяє вберегти шкіру рук від скалок та вібрації. Проте слід врахувати, що при роботі в безпосередній близькості до фрези рукавиці можуть становити небезпеку – їх використання дозволене лише тоді, коли вони не створюють ризику потрапляння руки в обертові деталі.

Захисний одяг. Він має щільно прилягати до тіла, без вільних елементів, які можуть зачепитися за обертові вузли. Також рекомендується використовувати спеціальне взуття з антиковзною підошвою.

Окрім застосування персональних засобів захисту, під час фрезерування деревини на верстатах з числовим програмним керуванням необхідно дотримуватися ряду організаційних та технічних вимог безпеки. Усі верстати з ЧПК повинні бути оснащені легкодоступною кнопкою аварійного вимкнення живлення, яка дозволяє негайно припинити роботу устаткування у разі виникнення небезпечної ситуації. Надзвичайно важливим є систематичне технічне обслуговування: вчасна перевірка фіксації інструменту, функціональності систем охолодження, витяжної вентиляції та заземлення дозволяє уникнути аварійних ситуацій та зберегти працездатність устаткування.

Система витяжної вентиляції має забезпечувати ефективне усунення деревного пилу з робочої зони, перешкоджаючи його повторному потраплянню в повітря приміщення. Водночас, працівники повинні проходити початковий та періодичний інструктаж з охорони праці, а також бути обізнаними з інструкцією з експлуатації устаткування, щоб діяти впевнено та безпечно у будь-якій ситуації.

Крім того, слід підтримувати стабільний температурно-вологісний режим у приміщенні, оскільки різкі зміни температури або вологості можуть негативно вплинути як на якість обробки деревини, так і на стабільність роботи електронних компонентів верстата.

Дотримання цих вимог суттєво зменшує ризик травмування оператора, сприяє стабільній та ефективній роботі обладнання, покращує якість виконуваних операцій та створює безпечні умови праці.

4.3. Вимоги до організації робочого місця оператора ЧПК верстата.

Організація робочого місця оператора верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК) потребує дотримання певних ергономічних, технічних та

санітарно-гігієнічних стандартів. Відповідно облаштоване робоче місце не лише збільшує ефективність праці, але й гарантує безпечне використання високотехнологічного устаткування.

Робочий простір має бути просторим, добре освітленим та обладнаним вентиляцією. Усі елементи керування, панель ЧПК, монітори та засоби управління повинні знаходитися на зручній відстані для огляду та досяжності оператора, що допомагає уникнути непотрібних рухів та зменшує втому під час тривалої роботи.

Підлога повинна бути рівною, не слизькою, бажано з покриттям, яке пом'якшує навантаження на стопи та суглоби. Біля верстата не повинно бути сторонніх предметів, кабелі необхідно надійно фіксувати, аби уникнути спотикань та запобігти нещасним випадкам.

Оператор повинен мати безперешкодний доступ до кнопки аварійної зупинки верстата, а також до зон технічного обслуговування обладнання. Робоче місце має бути укомплектоване засобами індивідуального захисту, а також місцем для зберігання технічної документації, інструментів та заготовок.

Окрім цього, важливо підтримувати оптимальний мікроклімат у приміщенні: стабільна температура, належна вологість повітря та відсутність протягів сприяють комфортній роботі оператора, а також забезпечують стабільну роботу електроніки.

Отже, правильно організоване робоче місце (див. рис. 4.2) зменшує ризики виникнення травмонебезпечних ситуацій, полегшує фізичне та психоемоційне навантаження на оператора, гарантує точність управління та тривалу надійність функціонування верстата з ЧПК.



Рис. 4.2 Правильна організація робочого місця оператора ЧПК верстату

4.4. Пожежна безпека та заходи запобігання аварійним ситуаціям в деревообробних цехах.

Деревообробні майстерні класифікуються як об'єкти з підвищеною пожежною небезпекою, адже деревина, тирса, пил, лакофарбові вироби та клей швидко спалахують та сприяють розповсюдженню вогню. Саме тому питання протипожежного захисту та запобігання надзвичайним ситуаціям є вкрай важливим і вимагає комплексного підходу.

Найпершим кроком є забезпечення регулярного прибирання пилу та відходів деревини, особливо в місцях скупчення на підлозі, у вентиляційних каналах, під верстатами та поблизу електричного обладнання. Значне накопичення дрібнодисперсного деревного пилу не тільки підвищує ризик самозаймання, а й створює вибухонебезпечне середовище за умови високої концентрації в повітрі.

Всі електричні пристрої, двигуни, пускова апаратура та освітлення повинні бути герметичними або виконаними у вибухобезпечному виконанні. Пускові пристрої необхідно обладнати автоматичними системами аварійного вимкнення при перегріві, короткому замиканні чи перевантаженні.

Окрему увагу слід приділяти робочим зонам, де використовуються легкозаймисті рідини: клеї, розчинники, лаки. Їх зберігання та застосування повинно здійснюватися у спеціально відведених вентильованих приміщеннях або шафах з вогнестійкого матеріалу, дотримуючись відповідних санітарних та протипожежних норм.

Приміщення деревообробної майстерні слід обладнати системою витяжної вентиляції, що забезпечить постійне видалення парів горючих речовин та пилу. Окрім того, обов'язковою є наявність первинних засобів пожежогасіння: вогнегасників (порошкових або вуглекислотних), пожежних щитів з піском, лопатами, відрами та вогнезахисними покривалами.

До обов'язкових організаційних заходів належить інструктаж з пожежної безпеки, який мають проходити всі працівники до початку роботи, а також щорічне повторне навчання. На видимих місцях повинні бути розміщені плани евакуації, інформаційні таблички з номерами виклику пожежної служби та схемами дій у разі загоряння.

В рамках профілактики аварій важливо регулярно проводити перевірку справності електромереж, вентиляційних систем, заземлення та верстатного обладнання, а також здійснювати контроль за мікрокліматом – надмірна сухість повітря теж збільшує пожежну небезпеку.

Отже, дотримання пожежної безпеки у деревообробному виробництві є не тільки вимогою нормативів, а й необхідною умовою збереження життя та здоров'я працівників, а також забезпечення стабільної роботи майстерні.

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

5.1. Визначення собівартості обробки деревини на ЧПК фрезерному верстаті

Розрахунок собівартості обробки деревини на фрезерному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) дасть нам змогу визначити економічну вигідність виробництва поодиноких або серійних деталей. В цьому розділі ми визначаємо повну вартість виготовлення однієї дерев'яної деталі з урахуванням споживання електроенергії, витрат на інструмент, заготовку, а також амортизаційних відрахувань верстата.

Почнемо з вихідних умов для розрахунків:

- Тип заготовки: сосновий брусок $100 \times 100 \times 20$ мм;
- Час обробки: **20 хвилин** (0,33 години);
- Споживання електроенергії: **розраховується сумарно для всіх компонентів системи;**
- Вартість електроенергії для населення: **4,32 грн/кВт·год;**
- Вартість заготовки з деревини: **15 грн;**
- Застосовуються три типи фрез: **конусна, кінцева, радіусна**, з обліком часткового зносу.

1. Розрахунок енергоспоживання та вартості електроенергії

Потужність споживання системи складається з елементів, що наведені в таблиці 5.1:

Елементи верстата, що споживають енергію

Таблиця 5.1

Компонент	Орієнтовна потужність, Вт
Шпиндель 2.2 кВт (80%)	1760

Крокові двигуни (4 × 50 Вт)	200
Водяний насос	60
Інвертор	30
Комп'ютер	150
Разом	2200 Вт = 2.2 кВт

Тепер розрахуємо кількість спожитої енергії за час роботи верстата за формулою:

$$W = P \times t, \quad (5.1)$$

де:

- **W** – спожита електроенергія в **кВт/год**
- **P** – потужність обладнання в **кіловатах (кВт)**
- **t** – час роботи обладнання в **годинах**

В нашому випадку:

- $P = 2,2$ кВт (це сукупна електрична потужність усіх компонентів верстата: шпиндель, двигуни, насос, комп'ютер)
- $t = 0,33$ год (тобто 20 хвилин обробки однієї деталі)

$$W = 2,2\text{кВт} \times 0,33\text{год} = 0,726 \text{ кВт/год}$$

Тобто на виготовлення однієї дерев'яної деталі верстат **споживає приблизно 0,726 кВт/год електроенергії**. Тепер розрахуємо вартість електроенергії для цієї операції. Скористаємося наступною формулою:

$$C_{\text{ел}} = W \times T, \quad (5.2)$$

де:

- $C_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії за одну операцію (у гривнях);
- $W = 0,726$ кВт/год – спожита енергія;
- $T = 4,32$ грн за кВт/год – тариф за електроенергію.

$$C_{\text{ед}} = 0,726 \times 4,32 \approx 3,13 \text{ грн}$$

Це означає, що кожна деталь "коштує" близько 3 гривень за електроенергію при обробці впродовж 20 хвилин (0.33 год) на верстаті з потужністю 2.2 кВт.

2. Розрахунок витрат на знос фрези

Розрахунок здійснюється пропорційно часу роботи фрези у межах її ресурсу та описаний в таблиці 5.2:

Розрахунок витрат

Таблиця 5.2

Фреза	Вартість, грн	Ресурс, год	Вартість за 1 год, грн	Витрата за 0,33 год, грн
Конусна R0.75 D8 L100/45	1050	30	35	11,55
Кінцева D6 L60/25-3T	370	20	18,5	6,11
Радіусна R2 D4 L60/30-2T	328	15	21,87	7,22
Разом	-	-	-	~ 25 грн

3. Вартість матеріалу(заготовки)

Орієнтовна вартість соснового бруска 100×100×20 мм – **15 грн**. Ціна включає вартість матеріалу та попередню обробку.

4. Амортизація верстата (бонус для повного обліку)

У разі додаткового урахування собівартості виготовлення власного ЧПК-верстата (близько 60 000 грн з комплектуючих), якщо брати амортизаційний термін 3 роки та середнє навантаження 2 години на день отримаємо формулу:

$$C_{\text{аморт/год}} = \frac{C_{\text{верстата}}}{T_{\text{експлуатації}} \times D_{\text{у році}} \times H_{\text{на день}}}, \quad (5.3)$$

де:

- $C_{\text{аморт/год}}$ – амортизаційні витрати за 1 годину роботи, грн/год
- $C_{\text{верстата}}$ – повна вартість виготовлення ЧПК верстата, грн
- $T_{\text{експлуатації}}$ – строк експлуатації верстата, років
- $D_{\text{у році}}$ – кількість днів у році (зазвичай 365)
- $H_{\text{на день}}$ – середня кількість годин роботи верстата на день, год

$$C_{\text{аморт/год}} = 3 \times 365 \times 260000 \approx 27,4 \text{ грн/год} \Rightarrow \text{за 0.33 год: } 9,04 \text{ грн}$$

5. Повна собівартість виготовлення однієї деталі

$$C_{\text{повна}} = C_{\text{ел}} + C_{\text{фреза}} + C_{\text{матеріал}} + C_{\text{аморт}}, \quad (5.4)$$

де:

- $C_{\text{повна}}$ – повна собівартість виготовлення однієї деталі (грн)
- $C_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії, спожитої під час обробки однієї деталі (грн)
- $C_{\text{фреза}}$ – вартість зносу інструменту (фрези), пропорційна часу роботи (грн)
- $C_{\text{матеріал}}$ – вартість дерев'яної заготовки, з якої виготовляється деталь (грн)
- $C_{\text{аморт}}$ – амортизаційні витрати на верстат (грн)

$$C_{\text{повна}} = 3,13 + 25 + 15 + 9,04 = 52,17 \text{ грн}$$

Собівартість виробництва однієї заготовки з дерева, розмірами 100×100×20 мм, виготовленої на нашому власному фрезерному верстаті з ЧПК, сягає приблизно 52,17 грн. Це враховує амортизацію фрез, витрати електроенергії, вартість сировини та часткове знецінення устаткування. Такий розрахунок надає можливість аргументовано визначати ціну продажу виробу та прогнозувати прибуток, орієнтуючись на обсяги виробництва.

5.2. Порівняльний аналіз ефективності традиційних та оптимізованих методів фрезерування

У цьому підрозділі аналізуються економічні та технічні показники ефективності фрезерування деревини. Зіставляються стандартні, тобто звичні, параметри обробки з оптимізованими режимами, що були визначені в результаті експериментів, описаних у розділі 3.

Під традиційними режимами розуміється застосування усталених налаштувань, що зазвичай пропонуються за замовчуванням у САМ-системах або ж використовуються без урахування фізико-механічних характеристик конкретного виду деревини. Йдеться переважно про:

- надмірні оберти шпинделя (20 000 об/хв);
- підвищена швидкість подачі (1500–2000 мм/хв);
- глибина різання понад 1.5 мм.

Натомість, оптимізовані режими спираються на експериментальний підбір, враховуючи конкретну породу деревини. Це дозволяє досягти балансу між якістю обробки, тривалістю процесу та зносом інструменту. Порівняння цих режимів зображено в таблиці 5.3.

Порівняльна таблиця

Таблиця 5.3

Параметр	Традиційний режим	Оптимізований режим	Виграш / Покращення
Оберти шпинделя	20 000 об/хв	15 000–16 000 об/хв	↓ зменшення зносу фрез
Швидкість подачі	1500–2000 мм/хв	800–1000 мм/хв	↑ вища якість поверхні
Глибина різання	1.5–2.0 мм	0.8–1.0 мм	↓ менше вібрацій, задирок

Час обробки (100×100 мм)	15 хвилин	20 хвилин	–5 хв, але + якість
Витрати на фрези (грн)	35–40	25	↓ до 30% економії
Точність	±0.4...0.7 мм	±0.1...0.3 мм	↑ стабільність розмірів
Кількість браку (%)	до 10%	< 3%	↓ зменшення втрат
Післяобробка (шліфування)	Потрібна завжди	Мінімальна / не потрібна	↓ економія часу й ресурсів

Оптимізовані технологічні процеси, хоч і можуть незначно подовжити тривалість виконання однієї операції, суттєво поліпшують чистоту поверхні та мінімізують ризик браку. Найбільш важливими аспектами покращення є:

- зменшення глибини різання, що знижує вібрації;
- адаптація обертів під конкретну породу деревини;
- зменшення навантаження на фрезу – відповідно, продовження її ресурсу.

Це стає надзвичайно важливо при роботі зі складними або дорогими заготовками, де ціна помилки значна.

Порівняльний аналіз демонструє, що застосування вдосконалених технологічних параметрів фрезерування – економічно виправдане рішення. Незважаючи на, можливо, незначне збільшення часу обробки, досягається вища якість, точність та зменшення зносу інструменту, що у підсумку знижує витрати на виробництво кожного виробу.

5.3. Розрахунок витрат на інструмент та енергоспоживання

Експлуатація фрезерного верстата з ЧПК передбачає два основні напрямки постійних витрат: витрати на інструмент (фрези) та споживання електроенергії. Обидва ці фактори безпосередньо залежать від часу обробки, заданих режимів фрезерування, різновиду деревини, що обробляється, а також технічних властивостей обладнання. Розрахунок буде базуватися на наступних параметрах, що зображені в таблиці 5.4.

Витрати на інструмент

Таблиця 5.4

Найменування фрези	Ціна, грн	Ресурс (год)	Вартість за 1 год, грн
Конусна фреза R0.75 D8 L100/45	1050	30	35,00
Кінцева фреза D6 L60/25-3T	370	20	18,50
Радіусна фреза R2 D4 L60/30- 2T	328	15	21,87

Приймемо середню тривалість обробки однієї деталі за 0,33 год (20 хв), отримаємо витрати:

$$C_{\text{фрези}} = \left(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} \right) \times t, \quad (5.5)$$

де:

- $C_{\text{фрези}}$ – загальна вартість зносу фрези при виготовленні однієї деталі (грн)
- C_1, C_2, C_3 – вартість кожної з використаних фрез відповідно (грн)
- T_1, T_2, T_3 – ресурс (тривалість служби) кожної фрези відповідно (у годинах)
- t – тривалість обробки однієї деталі (у годинах)

$$C_{\text{фрези}} = \left(\frac{1050}{30} + \frac{370}{20} + \frac{328}{15} \right) \times 0,33 \approx 25,1 \text{ грн/деталь}$$

2. Витрати на електроенергію

Загальна споживча здатність устаткування, згідно з попередніми підрахунками, становить 2.2 кВт, а ціна за 1 кВт/год енергії дорівнює 4.32 грн. Як ми вже підраховали раніше вартість витраченої електроенергії для обробки однієї деталі за 0,33 год складає:

$$C_{\text{ел}} \approx 3,13 \text{ грн}$$

3. Загальна оцінка витрат на інструмент та енергію

Загальна вартість видатків на виробництво однієї деталі, не враховуючи ціни заготовки буде розрахована за формулою:

$$C_{\text{сумарна}} = C_{\text{фрези}} + C_{\text{ел.}}, \quad (5.6)$$

де:

- $C_{\text{фрези}}$ – загальна вартість зносу фрези при виготовленні однієї деталі (грн)
- $C_{\text{ел}}$ – вартість електроенергії, спожитої під час обробки однієї деталі (грн)

$$C_{\text{сумарна}} = 25,1 + 3,13 = 28,23 \text{ грн}$$

4. Орієнтовна вартість обробки за годину роботи

Також оцінімо витрати в розрахунку на 1 годину безперервної роботи (тобто приблизно 3 деталі):

$$C_{1 \text{ год}} = \left(\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} \right) + P \cdot T, \quad (5.7)$$

де:

- C_1, C_2, C_3 – вартість кожної з використаних фрез відповідно (грн)
- T_1, T_2, T_3 – ресурс (тривалість служби) кожної фрези відповідно (у годинах)
- T – тривалість роботи, год ($T = 1$)

- P — загальна потужність верстата, кВт

$$C_{1 \text{ год}} = (35 + 18.5 + 21.87) + 2.2 \cdot 4.32 = 75.37 + 9.5 = 84.87 \text{ грн/година}$$

Отже, середні витрати на інструмент та електроенергію, які необхідні для виготовлення однієї деталі, складають приблизно 28.23 грн. Це дає можливість чітко визначати вартість кінцевого продукту, беручи до уваги вартість матеріалів, ручної роботи, а також розмір націнки. Застосування оптимізованих режимів роботи допомагає зменшити загальні витрати за рахунок збільшення терміну служби фрез та скорочення кількості повторної обробки бракованих деталей.

5.4. Економічна доцільність впровадження оптимізованих технологічних режимів

Успішне впровадження оптимізованих фрезерних режимів у роботу ЧПК-верстата дає значний позитивний вплив не лише на технічну складову, а й на економічну доцільність. В цьому пункті я проаналізую вплив таких режимів на ключові аспекти виробництва, а саме: зниження витрат на інструменти, підвищення енергоефективності, скорочення кількості браку та зменшення потреби у додатковій обробці.

1. Зменшення витрат на інструмент та енергію

Згідно з розрахунками, наведеними у попередніх розділах, собівартість виробництва однієї деталі в оптимізованому режимі становить:

- **Фреза:** ~25,1 грн
- **Електроенергія:** ~3,13 грн
- **Загалом:** $\approx 28,23$ грн

У звичайному (неоптимізованому) режимі, за більших обертів та глибини різання, можна спостерігати:

- швидше зношення інструменту (+30–40%);
- зростання браку (+10%);
- збільшення споживання енергії через вібрації та перегриви.

В результаті, собівартість деталі може зрости до **38–42 грн**, тобто **на 35–45% більше**.

Впровадження оптимізованих технологічних підходів до обробки деревини на верстатах з ЧПК фрезеруванням не тільки може знизити вартість виготовлення деталей, але й значно поліпшить їхню якість та точність. Результати експериментів продемонстрували, що при дотриманні правильно підібраних параметрів обробки, досягається точність в межах $\pm 0,1-0,2$ мм, в той час як при використанні стандартних налаштувань (традиційних) цей показник становить близько $\pm 0,5$ мм. Поліпшення точності супроводжується ліквідацією типових дефектів, таких як задирки, виривання волокон або обвуглювання країв заготовки, що характерні для швидкісного фрезерування з надлишковою глибиною різання.

Завдяки покращеній якості поверхні після обробки, значно зменшується потреба в додатковій ручній обробці (наприклад, шліфуванні), що, у свою чергу, економить час роботи та витратні матеріали. Така стабільність якості дозволяє зменшити відсоток бракованої продукції: якщо при традиційному фрезеруванні частка браку може сягати 10% (тобто 1 з 10 деталей), то при роботі з оптимізованими режимами цей показник не перевищує 3% (приблизно 1 з 30 деталей). При виготовленні 100 деталей економія тільки на зниженні браку може скласти до 316 гривень. Так, при вартості однієї бракованої деталі 40 грн у стандартному варіанті втрати сягнуть 400 грн, тоді як при оптимізованій обробці – лише 84 грн (3% від 28 грн).

З погляду загальної економіки виробництва, такі покращення дозволяють значно збільшити прибутковість. Припустимо, ціна реалізації однієї готової деталі становить 80 грн, а собівартість її виготовлення в умовах оптимізованого фрезерування – 52 грн. Таким чином, чистий прибуток з однієї деталі складає 28

грн. Якщо виготовити 1000 таких виробів, загальний прибуток досягне 28 000 грн. Враховуючи, що саморобний ЧПК верстат, зібраний з якісних комплектуючих, має орієнтовну собівартість близько 60 000 грн, його повна окупність наступить вже після виготовлення приблизно 2,1 партії по 1000 деталей. Це вказує на високу рентабельність проекту та доцільність впровадження адаптованих режимів фрезерування як на стадії дослідного, так і серійного виробництва.

На мою думку, впровадження вдосконалених технологічних режимів фрезерування – це раціональний крок з економічної точки зору. Він відкриває можливість для помітного зниження виробничих витрат, мінімізації зношування інструменту, а також поліпшення показників якості та точності виготовлених деталей. У контексті дрібносерійного чи індивідуального виробництва, термін окупності необхідного обладнання може бути меншим за три повних замовлення, що підкреслює високу рентабельність інвестицій у технологічну оптимізацію.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження було досягнуто усіх поставлених цілей та виконано усі завдання, передбачені роботою. Здійснено аналіз конструктивних особливостей фрезерних верстатів, розглянуто еволюцію фрезерної обробки, класифікацію верстатів, принципи їхньої роботи, а також специфіку верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПК) у контексті деревообробки.

Створено авторську модель фрезерного верстата з ЧПК з рухомих порталом (типу Moving Gantry), де враховувалися принципи жорсткості, точності та економічної обґрунтованості. Було виконано віртуальну розробку конструкції з розрахунком масогабаритних показників, із застосуванням сучасних напрямних типу Hiwin, фрезерного шпинделя з водяним охолодженням та інших ключових елементів.

Проведено експериментальні дослідження впливу ключових технологічних параметрів – швидкості обертання шпинделя, швидкості подачі та глибини різання – на якість обробленої поверхні. Дослідження охопили широкий діапазон матеріалів: сосну, дуб, вишню, тополь, фанеру та МДФ. В результаті аналізу визначено оптимальні режими для кожної з порід деревини, що дало змогу мінімізувати брак, покращити точність та зменшити витрати на шліфування.

У роботі проведено оцінювання точності обробки та побудовано взаємозв'язки між основними режимами фрезерування та результатами якості. Надано рекомендації щодо вибору фрез та параметрів обробки для різноманітних типів деревини.

Виконано розрахунок економічної ефективності процесу фрезерування з урахуванням витрат на інструмент, електроенергію, амортизацію обладнання та матеріали. Порівняльний аналіз показав, що впровадження оптимізованих режимів дозволяє знизити собівартість виробництва деталей на 30–40% та скоротити кількість браку у 3 рази. Також встановлено, що період окупності самостійно

виготовленого ЧПК фрезерного верстата становить близько двох виробничих партій по 1000 деталей.

Отже, результати дослідження підтверджують доцільність впровадження оптимізованих технологічних режимів фрезерування деревини на верстатах з ЧПК для підвищення ефективності, точності обробки та економічної вигоди для деревообробних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ