

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерського проєкту: 79 с., 40 рис., 10 табл., 16 джерел.

ВЕРСТАТ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, РЕВЕРСНА ІНЖИНЕРІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ДРАЙВЕР, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ЕРГОНОМІЧНІСТЬ

Об'єкт дослідження – гравірувально-фрезерний верстат моделі Samago Woodpecker CP1208.

Мета роботи – створення електронної моделі верстата як основи для подальшої її використання в якості цифрового двійника.

В роботі розглянуті основні поняття та технології сучасного розумного виробництва. Проведено аналіз перспективності використання цифрових двійників в сучасному виробництві. Систематизовано методи створення цифрових двійників верстатів. Визначено метод та інструменти для створення цифрового двійника верстату. Проведено заміри вузлів верстату для реалізації електронної моделі. Розглянуто основні ергономічні показники верстатів. Створено електронну модель верстату. Запропоновані способи модернізації верстату, створено модель поворотної осі та розраховано кульково-гвинтову передачу.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's project: 79 p., 40 pic., 10 tab., 16 sources.

METAL CUTTING MACHINE, DIGITAL TWIN, REVERSE ENGINEERING, SIMULATION, DRIVER, FREQUENCY CONVERTER, STEPPER MOTOR, ERGONOMICS

The object of the study - Camaro Woodpecker CP1208 engraving machine.

The purpose of the work - create an electronic model of the machine as a basis for it's further use as a digital twin.

The work examines the main concepts and technologies of modern smart production. An analysis of the prospects of using digital twins in modern production was carried out. The methods of creating digital twins of machines are systematized. The method and tools for creating a digital twin of the machine are defined. Measurements of the machine components were carried out for the implementation of the electronic model. The main ergonomic parameters of the machines are considered. An electronic model of the machine has been created. The methods of modernizing the machine are proposed, the model of the rotary axis is created and the ball-screw transmission is calculated.

ВСТУП

Розумне виробництво, також відоме як Індустрія 4.0, представляє сучасний підхід до виробництва, що використовує передові технології для автоматизації та оптимізації процесів. Ключових технологій, які сьогодні використовуються для створення розумного виробництва:

- Інтернет речей (IoT): датчики та з'єднані пристрої дозволяють збирати величезні обсяги даних з виробничих ліній, обладнання та продуктів. Ці дані можна використовувати для моніторингу та оптимізації робочих процесів.

- Аналітика даних: застосування аналітики даних дозволяє виробникам отримувати інсайти зі зібраних даних. Аналізуючи ці дані, компанії можуть приймати кращі управлінські рішення, підвищувати ефективність та зменшувати витрати.

- Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML): ці технології використовуються для автоматизації прийняття рішень, прогнозування та вдосконалення виробничих процесів. Вони можуть бути застосовані для управління запасами, планування виробництва та підтримки прийняття рішень.

- Розширена реальність (AR) та Віртуальна реальність (VR): AR та VR можуть бути використані для підвищення ефективності навчання та тренування персоналу, а також для створення інтерактивних інтерфейсів для відстеження та управління виробничими процесами.

- Блокчейн: Ця технологія може забезпечити безпеку та надійність обміну даними в ланцюгу постачання, а також в управлінні якістю та підтримці ідентифікації продуктів.

- Роботизовані системи: використання роботів та автоматизованих систем для виконання фізичних завдань підвищує продуктивність та забезпечує безпеку працівників.

- Цифрові двійники: це поняття означає повну цифрову модель об'єкта або процесу, що дозволяє відстежувати його стан в реальному часі та передбачати можливі проблеми.

- Хмарні технології: збереження та обробка даних в хмарі дозволяє виробникам отримувати доступ до ресурсів та послуг на відстані та сприяє гнучкості виробництва.

- Кіберфізичні системи: інтеграція фізичних та цифрових елементів для управління та моніторингу виробничих процесів в реальному часі.

Створення розумного виробництва включає в себе інтеграцію цих технологій для створення ефективних та гнучких виробничих систем, що сприяють підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності підприємства.

Концепція цифрових двійників відіграє важливу роль у створенні сучасного розумного виробництва, що передбачає високий рівень автоматизації та об'єднання фізичних і цифрових систем у виробничому середовищі.

1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Технологій створення розумного виробництва

Розумне виробництво (smart manufacturing, SM) – це сучасний інноваційний підхід до організації виробництва промислової продукції, орієнтований на інтелектуальне управління виробничим процесом. У фокусі опиняються питання використання промислового інтернету речей, адаптивності та масштабованості, великих даних, динамічного моделювання та симуляції, а також забезпечення кібербезпеки та мінімізації відходів тощо.

Під розумним виробництвом розуміємо комплекс технологій, методів та організаційних підходів, який здатний забезпечити більш високу продуктивність та швидку переналагоджуваність за одночасного зниження витрат на матеріали, енергію, трудові ресурси та зростання якості. Розумне виробництво неможливе без його цифровізації, що виражається у створенні цифрових двійників, а також наскрізне впровадження інтелектуальних інформаційних систем та цифрових платформ, що охоплюють весь життєвий цикл продукції – від проектування, підготовки, запуску та власного виробництва – до експлуатації, обслуговування та утилізації продукції.

Основні переваги розумного виробництва:

- безперервний контроль виробництва за рахунок збирання та аналізу даних у режимі реального часу;
- прогнозування майбутніх подій за рахунок накопичення та аналізу даних за минулі періоди та зіставлення їх з поточною ситуацією;
- ефективне планування виробництва;
- мінімізація помилок, пов'язаних із людським фактором, за рахунок максимального використання сучасного автоматизованого обладнання та, як наслідок, підвищення якості продукції;
- оптимізацію використання ресурсів;

- підвищення якості обслуговування клієнтів за рахунок спрощення комунікацій, своєчасного отримання зворотного зв'язку;

- скорочення часу обслуговування;

- гнучкість виробництва;

- підвищення безпеки праці.

Всі ці переваги дозволяють значно скоротити виробничі витрати та підвищити прибутковість бізнесу. За дослідженнями 2019 року компанія Deloitte зробила висновок, що промислові підприємства, які інвестували в проекти з впровадження розумного виробництва мають зростання показників з використання виробничих потужностей та продуктивності праці до 12%.

Так як розумне виробництво має високу адаптивність та модульність, у підприємств які інвестують в дану галузь, є змога обирати комбінації сучасних технологій які є більш актуальними саме для їх типу виробництва. Серед технологій які найчастіше використовуються в розумному виробництві є:

- хмарні мережеві технології;
- штучний інтелект;
- машинне навчання;
- великі дані;
- промисловий інтернет речей;
- цифрові двійники;
- віртуальна реальність;
- сучасні бази даних.

Таблиця 1.1 – Значущість цифрових технологій у створені розумного виробництва

Ранг	Технологія	Індекс значущості
1	Промислові роботи	1
2	Штучний інтелект	0,86
3	Машинне навчання	0,68

Кінець таблиці 1.1

4	Великі дані	0,2
5	Віртуальна реальність	0,12
6	Промисловий інтернет речей	0,03
7	Цифрові двійники	0,02

1.2 Технологія цифрових двійників

Технологія створення цифрових двійників повноцінно розкриває свої переваги у виробництвах де необхідно стабільно підтримувати якість виготовленої продукції та забезпечувати постійний контроль процесу роботи обладнання та точності дотримання технологічного процесу. Одним з перспективних напрямків впровадження технології цифрових двійників є машинобудівні підприємства на яких присутнє сучасне металообробне обладнання.

Одна з перших концепцій цифрових двійників (ЦД) була реалізована NASA в рамках програми «Аполлон». Технологія була застосована для оцінки поведінки космічного апарату у різних умовах під час місії, щоб заздалегідь прийняти більш точні рішення для управління апаратом. Ідею ЦД вперше описав у 1991 році Девід Гелернтер у своїй книзі «Дзеркальні світи». А пізніше, у 2002 році, доктор Майкл Грівз представив і описав концепцію цифрових двійників.

Концепція цифрового двійника (Digital Twin) відноситься до створення віртуальної моделі реального об'єкта чи системи, яка відображає його стан, параметри та поведінку в реальному часі. Це цифрове відображення може включати в себе інформацію з датчиків, даних з моніторингових систем, аналітичні моделі та інші дані.

Важливою особливістю цифрового двійника є те, що завдання на нього вхідних впливів використовується інформація з датчиків реального пристрою, що працює паралельно. Робота можлива як в онлайн, так і в офлайн-режимі. Далі можливе проведення порівняння інформації віртуальних датчиків цифрового двійника з датчиками реального пристрою, виявлення похибок роботи та причин їх виникнення. Установка датчиків на реальний пристрій здійснюється у процесі впровадження на підприємстві технологій промислового Інтернету речей.

ЦД активно розвиваються і формуються як сучасна технологія. Їй досі не вистачає стандартизації, інструментів, а іноді й успішно реалізованих прикладів в різних галузях, а також чітко визначеної термінології та визначень

Цифровий двійник виробу включає в себе:

- геометричну та структурну модель об'єкта: геометричні характеристики виробу, такі як розміри, форма, конфігурація та інші параметри, які визначають його зовнішній вигляд та структуру.;

- сенсорні дані: дані з різноманітних датчиків, що вимірюють фізичні властивості виробу, такі як температура, тиск, вологість, вібрації тощо.

- стан та параметри обладнання: інформація про стан машин та обладнання, яке використовується для виробництва виробу.

- етапи виробництва: деталі про всі етапи виробництва виробу, включаючи дати виготовлення, використані матеріали, параметри виробничих процесів та інші важливі дані.

- дані з тестування: інформація, яка відображає результати тестів та якість виробу. Це може включати в себе вимірювання, випробування, аналіз та інші дані, що характеризують продукт.

- ідентифікаційна та сертифікаційна інформація: унікальні ідентифікатори, номери серій, сертифікати якості та інші дані, що дозволяють визначити та підтвердити легальність та якість виробу.

- інформація про експлуатацію та обслуговування: дані щодо того, як виріб використовується, експлуатується та обслуговується, що дозволяє забезпечити оптимальну ефективність та тривалість служби.

Ці дані об'єднуються в одну інтегровану модель, яка відображає віртуальний аналог фізичного виробу. Цей цифровий двійник дозволяє виробникам отримувати повний образ обладнання, сприяти покращенню якості, зменшенню витрат та оптимізації виробничих процесів.

Етапи створення та експлуатації цифрового двійника:

1) Визначення мети: визначення конкретних цілей та завдань для цифрового двійника. Уточнення, які параметри та аспекти об'єкта чи системи будуть включені в цифровий двійник

2) Ескізне проектування: створюються варіанти комп'ютерної моделі виробу, що розробляється для оцінки та вибору можливих технічних рішень.

3) Технічне проектування: вибраний на попередньому етапі варіант доопрацьовується та уточнюється з використанням моделей елементів. Отримана в результаті модель виробу дозволяє врахувати та оптимізувати взаємодію всіх елементів з урахуванням режимів роботи та впливів навколишнього середовища, її вже можна називати цифровим двійником виробу, що розробляється.

4) Виготовлення: розроблена модель допомагає визначити необхідні допуски при виготовленні для досягнення необхідних характеристик та забезпечення безвідмовної роботи виробу протягом усього терміну служби, а також дозволяє швидко виявляти причини несправностей у процесі тестування.

5) Валідація та тестування: перевірка відповідності цифрового двійника реальному об'єкту чи системі. Тестування різних сценаріїв та умов роботи для впевненості в надійності та ефективності цифрового двійника.

6) Впровадження цифрового двійника у виробничий процес: навчання персоналу та створення необхідних процедур для користування цифровим двійником.

7) Експлуатація: модель цифрового двійника може бути доопрацьована та використана для реалізації зворотного зв'язку з метою внесення коректив у розробку та виготовлення виробів, діагностику та прогнозування несправностей, підвищення ефективності роботи, для виявлення нових запитів споживачів.

Цей цикл може бути повторюваним, оскільки вироби та системи розвиваються, і нові дані та функціонал можуть бути додані до цифрового двійника для покращення його ефективності та відповідності потребам користувачів.

Оскільки ЦД працюють з гетерогенними системами, а також включають інші дисципліни та технології, їх можна класифікувати за різними аспектами. Розглянемо основні типи категоризації ЦД.

Класифікація цифрових двійників виробу:

- цифрові двійники-прототипи (DTP). DTP-двійник містить інформацію, необхідну для опису та створення фізичних версій екземплярів виробу. Ця інформація включає геометричну та структурну моделі, технічні вимоги та умови; вартісну модель, розрахункову (проектну) та технологічну моделі виробу. DTP-двійник можна вважати умовно-постійною віртуальною моделлю виробу;

- цифрові двійники-примірники (Digital Twin Instance, DTI). DTI-двійники виробу описують конкретний фізичний екземпляр виробу, з яким двійник залишається пов'язаним протягом усього терміну служби. Двійники цього типу створюються на базі DTP-двійника та додатково містять виробничу та експлуатаційну моделі, які включають історію виготовлення виробу, застосування матеріалів та комплектуючих, а також статистику відмов, ремонтів, заміни вузлів та агрегатів та ін. Таким чином, DTI-двійник виробу піддається змін відповідно до змін фізичного екземпляра під час його експлуатації.

- Агрегатовані двійники (Digital Twin Aggregate, DTA). DTA-двійники виробу визначаються як інформаційна система управління фізичними екземплярами сімейства виробів, яка має доступ до всіх їх цифрових двійників.



Рисунок 1.1 – Оцінка ЦД за зрілістю

Таблиця 1.2 - Особливості та виклики ЦД в різних галузях

№	Галузь	Особливості	Виклики
1	Машинобудівна	Прогнозне обслуговування та моніторинг виробничої лінії; моделювання та перевірка продукту перед виробництвом; підтримка операторів через ЦД обладнання та досвід ARVR; ЦД для інженерного навчання.	Обробка великих даних; безпека даних; безпека ЦД; складність системи для багатoproфільних і багатоступінчастих виробничих процесів; висока вартість впровадження й розроблення системи.
2	Автомобільна	Моделювати поведінку та стан автомобіля у різних середовищах та умовах; моніторинг поточного стану автомобіля та прогнозне обслуговування; покращений досвід продажів із ЦД та AR/VR; індивідуальні функції та виправлення.	Оброблення та безпека великих даних; безпека автомобіля у разі перехоплення контролю над ЦД; комунікація – автомобіль може бути оффлайн.

Кінець таблиці 1.2

3	Аерокосмічна	Моделювання місій; авіамоделювання та тестування компонентів перед виробництвом; моніторинг стану повітряного судна; динамічне прийняття рішень за поточним станом апарату.	Низька пропускна здатність і висока затримка для ЦД на землі для зв'язку з літаком; високі вимоги до безпеки – критична система
4	Будівнича	Моделювання конструкції перед виробництвом; моніторинг на кожному етапі будівництва; розширена точність і нові моделі систем управління будівлею	Складні процеси в будівельній галузі. Вимоги до безпеки та роботи у реальному часі проти точності – важко обробляти високоточні моделі будівель у режимі реального часу
5	Залізнична	Прогнозне обслуговування та безпека транспорту і залізничних вузлів або полотна. Моделювання трафіку та поведінки людей на станції для скорочення простою та покращення досвіду очікування пасажирів	Велика кількість та щільність критичних компонентів, що повинні бути цифровізовані для повного контролю

Цифрові двійники верстатів вирізняються тим, що вони представляють віртуальні копії фізичних верстатів чи обладнання виробничого середовища. Використання технології ЦД для верстатів включає в себе:

- моделювання фізичних характеристик: цифровий двійник верстату може включати моделі фізичних характеристик верстату, таких як розміри, форма, матеріал та інші параметри.

- динаміка та рух: ЦД може враховувати динаміку верстату, рухові елементи, швидкості, прискорення та інші аспекти, пов'язані з рухом обладнання.

- моніторинг та діагностика: з використанням цифрових двійників можна реалізувати системи моніторингу та діагностики для виявлення відхилень, поломок чи інших аномалій у роботі верстату.

- оптимізація процесів: управління швидкістю, навантаженням, розташуванням та іншими параметрами.

- симуляція та тестування: за допомогою цифрового двійника можна проводити симуляції та тестування різних сценаріїв роботи верстату без фактичного впливу на обладнання.

- планування обслуговування та ремонту.

- аналіз використання та виробничої продуктивності.

2 МЕТОДИ СТВОРЕННЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

2.1 Методи моделювання цифрових двійників

Одним із основних інструментів у створенні ЦД є моделювання. Модель дозволяє виконувати обчислення, виконувати прогнозування збоїв, оптимізувати поведінку перед застосуванням до фізичного об'єкта. Існує три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання [9].

Фундаментальне моделювання дозволяє створити складну модель відповідно до законів фізики, математики або хімії, вона вимагає менше даних, є більш загальною та може бути застосована до іншого двійника з такими ж фундаментальними характеристиками. Але це вимагає більше обчислювальних ресурсів і може бути неточним через деякі індивідуальні особливості конкретних об'єктів. У деяких випадках не можливо створити або знайти фундаментальну модель, або обчислювальні ресурси для фундаментальної моделі надто великі, або для створення точної моделі для конкретного об'єкту зі своїм набором індивідуальних характеристик. У цьому випадку можна застосувати моделювання на основі даних (data-driven). Як компроміс між два попередніми варіантами можна застосувати гібридне моделювання, навіть у випадках, коли можливе моделювання на основі даних, слід застосувати деякі основні фізичні закони для покращення якості моделі.

Для побудови комплексної моделі цифрових двійників використовують наступні інструменти:

1) Метод скінченних елементів (FEA - FiniteElementAnalysis) для прогнозування реакції виробу на різні експлуатаційні навантаження,

2) CAD (Computer-AidedDesign)-моделі, які несуть інформацію про зовнішній вигляд і структуру об'єктів, інформацію про матеріали, процеси, розміри, тощо.

3) FMEA-моделі (Failure Mode and Effects Analysis - «аналіз видів і наслідків відмов»), засновані на аналізі надійності систем. Вони можуть об'єднувати математичні моделі відмови зі статистичною базою даних про режими відмови. Основні етапи FMEA включають ідентифікацію можливих відмов (Failure Modes), оцінку їхнього впливу на систему чи процес (Effects), визначення ймовірності виникнення цих відмов (Probability), оцінку визначених ризиків (Risk Priority Number), і визначення заходів для зменшення ризиків (Mitigation).

Цифрова модель містить також історію обслуговування та експлуатації виробу. У сукупності всі ці дані дозволяють прогнозувати поведінку реального об'єкта. Крім того, можливий моніторинг і тестування цілого парку об'єктів та проведення аналізу на основі агрегованих даних.

2.2 Методи створення 3D моделей обладнання

У практиці конструювання все більш широке поширення набувають методи і процедури тривимірного моделювання і поступовий перехід інженерів-проектувальників на стратегію 3D-конструювання.

Сучасні інформаційні технології докорінно змінили принципи конструювання, значно інтенсифікували процес розробки виробу, збільшивши його точність і надійність багаторазово. У графічних редакторах з'являються функції повторного використання попередньо спроектованого виробу, оперативно створювати типові та уніфіковані елементи, максимально прискорити випуск креслень та іншої документації. Великим поштовхом до прогресу всього процесу проектування є поява механізму параметризації графічного зображення.

Асоціативний зв'язок, що встановлюється в САПР між моделлю виробу, його кресленнями, а також специфікаціями, реалізує автоматичне відображення змін конструкторської документації при внесенні змін до 3D-моделі. За рахунок цього значно підвищується продуктивність праці проектувальника. Подальше

вдосконалення САПР поступово перетворює їх в системи управління життєвим циклом виробу та інженерними даними, а також гнучко управляти цими даними в різноманітних умовах функціонування промислових підприємств.

Як вже говорилося вище, модель обладнання для створення ЦД, має повністю, чи максимально повно, відповідати реальному обладнанню є підлягає контролю. Тому, для розробки сучасних моделей застосовують методи реверс-інжинірингу.

Реверс-інжиніринг - це дослідження готового об'єкта, його документації та принципів роботи для подальшого вдосконалення та модернізації.

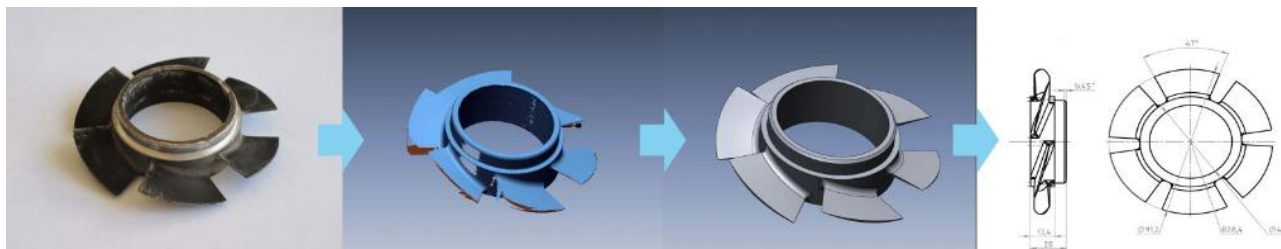


Рисунок 2.1 – Приклад реверс-інжинірингу деталі

Реверс-інжиніринг можна розділити на 3 види, в залежності від об'єкту дослідження, які в свою чергу включають різну кількість та послідовність етапів вимірювань:

- Реверс-інжиніринг деталей:

1. Зняття розмірів. Здійснення зняття геометричних розмірів з деталі та виконання попереднього ескізу деталі.

2. Аналіз взаємодії з іншими деталями. Вивчення взаємодії цієї деталі з іншими деталями та компонентами виробу. Призначення допусків, які забезпечують як правильну роботу деталі, і збирання.

3. Аналіз матеріалу, захисно-декоративних покриттів. Виконує аналіз матеріалу та покриттів деталі, прийняття рішення про призначення матеріалу та застосування захисно-декоративного покриття.

4. Побудова 3D моделі деталі, випуск креслення. Побудова докладної 3D моделі деталі, випуск креслення деталі в повній відповідності до стандартів складання конструкторської документації.

- Реверс-інжиніринг механізмів та вузлів:

1. Зняття розмірів. Здійснення зняття геометричних розмірів з усіх деталей та виконання попереднього ескізу деталі.

2. Аналіз взаємодії з іншими деталями. Вивчення взаємодії деталей у складальній одиниці. Призначення допусків, що забезпечують як правильну роботу деталей, збирання та забезпечення правильного функціонування даної складальної одиниці.

3. Попередня 3D-модель складальної одиниці. Побудова 3D-моделей усіх деталей та 3D-моделі всієї складальної одиниці. Попередня перевірка збирання та взаємодії.

4. Аналіз матеріалу, захисно-декоративних покриттів. Виконує аналіз матеріалів та захисно-декоративних покриттів деталей, прийняття рішення про призначення матеріалів та застосування захисно-декоративних покриттів.

5. Аналіз використовуваних покупних виробів. Виконується аналіз використовуваних покупних виробів. Пошук альтернативних виробів вітчизняного виробництва. При необхідності коригування деталей для можливості застосування альтернативних покупних виробів, забезпечуючи незмінність початкових характеристик і приєднувальних розмірів даної складальної одиниці.

6. Коригування 3D-модель, випуск комплекту КД. Коригування 3D-моделі складальної одиниці, випуск повного комплекту конструкторської документації на складальну одиницю у повній відповідності до стандартів складання конструкторської документації.

- Реверс-інжиніринг виробів:

1. Зняття розмірів. Здійснення зняття геометричних розмірів з усіх деталей, складальних одиниць та виконання попереднього ескізу.

2. Аналіз роботи виробу. Вивчення виробу загалом, аналіз алгоритмів роботи.

3. Попередня 3D-модель виробу. Побудова 3D-моделей усіх деталей та 3D-моделі всього виробу. Попередня перевірка збирання та взаємодії.

4. Аналіз матеріалу, захисно-декоративних покриттів. Виконує аналіз матеріалів та захисно-декоративних покриттів деталей, прийняття рішення про призначення матеріалів та застосування захисно-декоративних покриттів.

5. Аналіз електричної та електронної складових (за наявності). Виконує аналіз силової електричної схеми виробу, аналіз електронних компонентів, алгоритмів роботи, аналіз програмного забезпечення. Розробка аналогів даним компонентам та програмному забезпеченню. Розробка електричної схеми, друкованих плат та програмного забезпечення.

6. Аналіз використовуваних покупних виробів. Виконує аналіз використовуваних покупних виробів. Пошук альтернативних виробів вітчизняного виробництва. При необхідності коригування деталей для можливості застосування альтернативних покупних виробів, забезпечуючи незмінність початкових характеристик і приєднувальних розмірів даної складальної одиниці.

7. Коригування 3D-модель, випуск комплекту КД. Коригування 3D-моделі виробу, випуск повного комплекту конструкторської документації на виріб у відповідності до стандартів складання конструкторської документації. Випуск комплекту експлуатаційної документації на виріб.

Для проведення вимірювань деталей та вузлів обладнання необхідно обрати інструменти та вимірювальні системи які дозволяють швидко та точно отримувати розміри поверхонь, габаритні розміри, визначати кривизну поверхонь.

Реверс-інжиніринг верстатів включає в себе використання різноманітних методів для отримання технічної інформації та розуміння принципів роботи обладнання. Нижче наведено деякі основні методи реверс-інжинірингу верстатів:

- деконструкція та розбір: розбір верстату на окремі компоненти та підсистеми дозволяє отримати доступ до внутрішньої структури та для фіксації та дослідження фізичної конструкції, матеріалів та з'єднань між компонентами;

- аналіз електроніки: вивчення електричних схем, вимірювання електричних параметрів компонентів, ідентифікація мікросхем та датчиків;

- механічний аналіз: розуміння механічної конструкції, силових систем та механізмів;
- аналіз програмного забезпечення: вивчення програмного забезпечення, визначення алгоритмів роботи. Розуміння логіки та функціональності програмної частини верстату;
- зворотній інжиніринг дизайну: використання CAD-моделей для відтворення дизайну виробу, включаючи 3D-моделі та технічні креслення;
- зіставлення з документацією: порівняння отриманої інформації з існуючою технічною документацією, якщо така існує;
- використання технічних приладів: використання різноманітних технічних приладів для вимірювання параметрів, таких як температура, тиск, швидкість;
- використання обчислювальних методів: моделювання фізичних властивостей, взаємодій та інших параметрів для отримання деталізованої інформації.

Комбінація цих методів дозволяє інженерам отримати повніше розуміння принципів функціонування верстатів та розробляти покращення або модифікації.

Конструкція верстату включає в себе різноманітні деталі різного ступеня складності. Після проведення аналізу конструкції слід визначитися з методами реверс-інжинірингу для кожного компоненту верстата в залежності від його геометричної структури.

Для реінжинірингу нескладних виробів (без криволінійної геометрії) застосовується класичний вимірювальний інструмент (лінійка, штангенциркулем, радіусомір та/або глибиноміром) та будь-яка CAD система (наприклад, SolidWorks, PowerShape). Точність в такому разі залежить від точності інструменту та кваліфікації спеціаліста.

Для реінжинірингу складних виробів (з криволінійною геометрією) застосовується 3D-сканування та спеціальне програмне забезпечення для зворотного-інжинірингу (наприклад, PowerInspect, PowerShape). Така зв'язка дозволяє аналізувати геометрію виробу та передавати дані на ПК в

автоматичному режимі. У цьому випадку точність складається з точності 3D-сканера та точності зворотного інжинірингу.

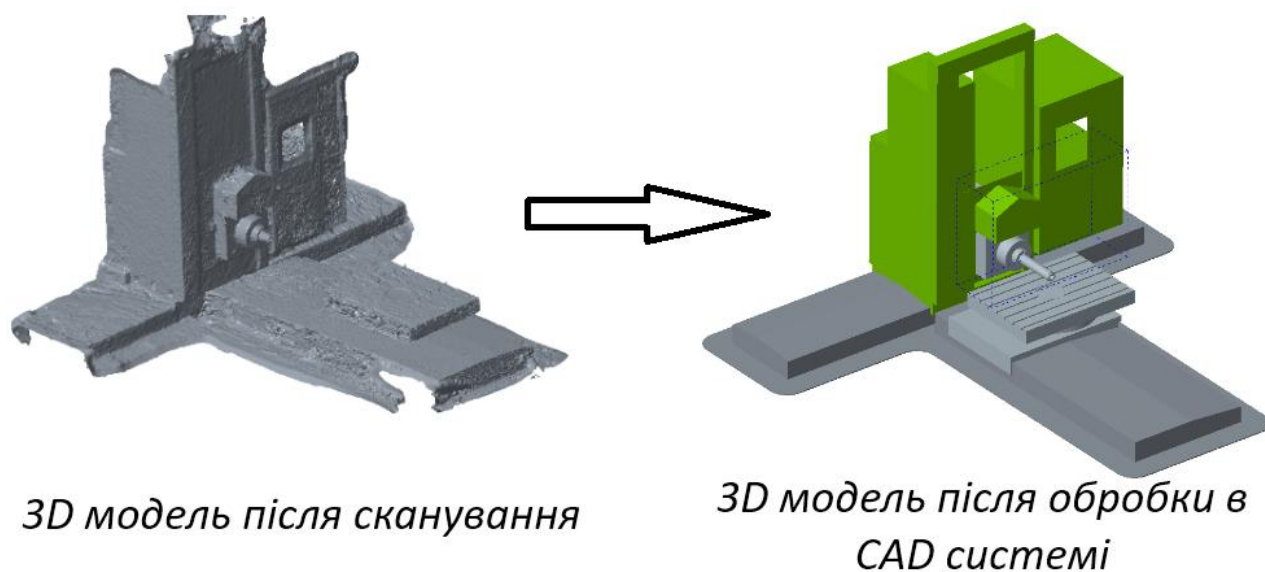


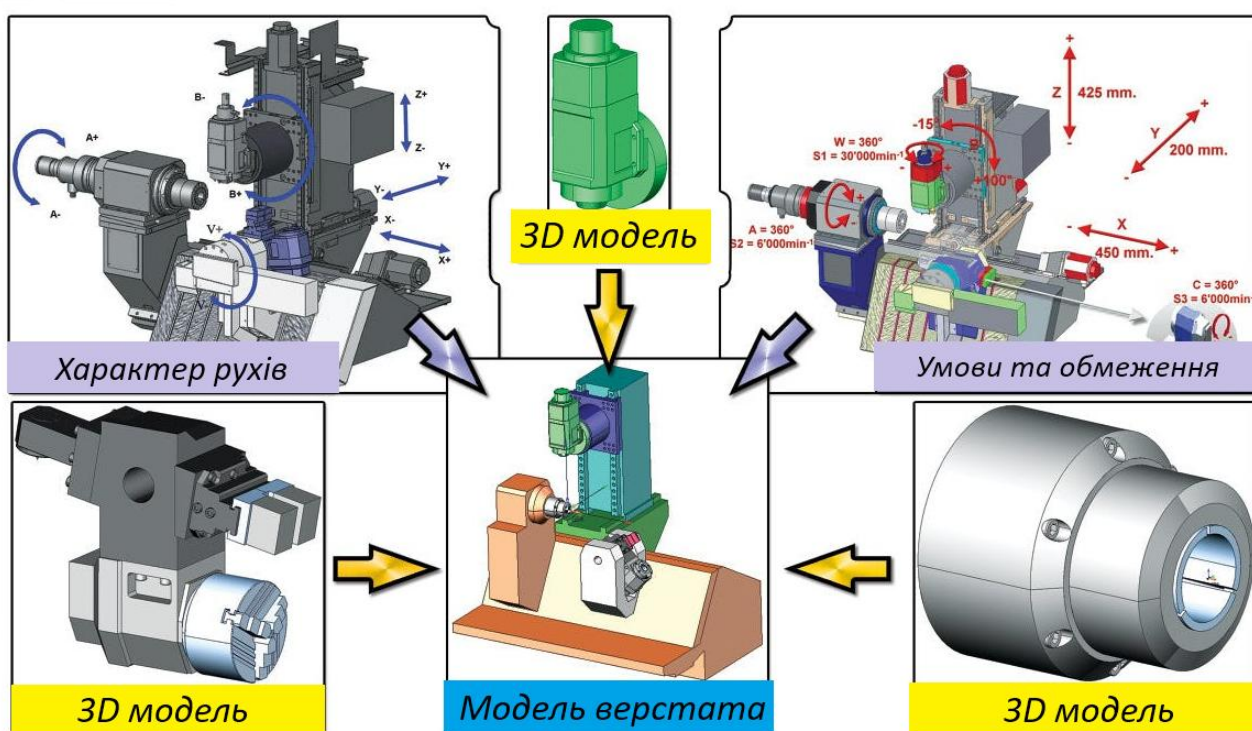
Рисунок 2.2 – Приклад 3D сканування верстата

2.2 Віртуальна кінематична схема верстата

Основною задачею після створення моделі верстата в програмному середовищі, є розробка віртуальної кінематичної моделі верстата.

При сучасних компонуваннях верстатів велика кількість робочих вузлів, що рухаються одночасно, створюють небезпеку зіткнень всередині верстата. Для того, щоб уникнути цього, потрібні віртуальні верстати які використовуються для симуляцій в САМ-системах.

Віртуальний верстат являє собою набір тривимірних моделей всіх робочих органів реального верстата і дозволяє забезпечити повну ідентичність процесу обробки в САМ системі з процесом обробки на реальному обладнанні. При використанні віртуального верстата траєкторія руху інструменту і робочих органів формується з урахуванням кінематики верстата і можливих зіткнень.



2.3 – Створення кінематичної моделі верстата

Етапи створення кінематичної моделі верстата для використання в САМ-системах:

1. Створення 3D моделі вузлів та деталей верстата в будь-якій CAD-системі;
2. Визначення координат і орієнтацій. Визначення системи координат для кожної рухливої частини верстата та її орієнтації.
3. Створення математичної моделі. Використання математичних рівнянь для опису руху різних частин верстата.
4. Опис кінематики верстата в САМ-системі. На цьому етапі на 3D моделі верстата задаються осі переміщень робочих органів, характер та умови їх переміщення, та обмеження які до них висуваються. Все це повинно повністю відповідати реальним умовам роботи верстата (рис.2.4);
5. Створення реалістичних 3D моделей інструментів. Моделі можна створити самостійно або вони можуть бути надані постачальником.
6. Валідація та корекція моделі. Порівняння результатів розрахунків із фактичним рухом верстата, внесення корекцій у модель за необхідності.

7. Остаточна інтеграція з САМ-системою.

8. Створюються додаткові конфігурація верстата. До них відносяться різноманітні пристосування та модифікації. Вони можуть бути використанні для випробувань на ЦД перед запуском їх на реальному верстаті, щоб убезпечити від аварій та для економії коштів, якщо це пристосування ще було закуплено.

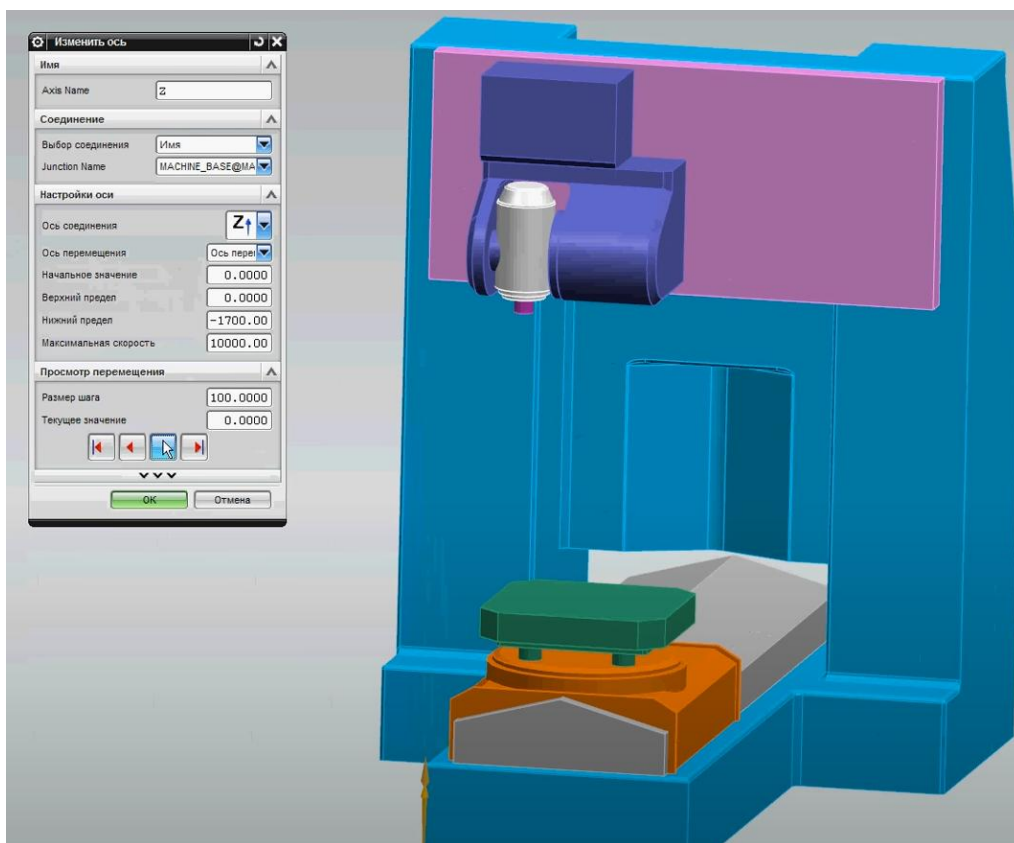


Рисунок 2.4 – Приклад створення осі для віртуального верстата

3 ПІДГОТОВКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЕРСТАТУ

3.1 Огляд систем для створення цифрового двійника металообробного обладнання

Залежно від функціональних можливостей, набору і структурної організації CAD/CAE/CAM-системи можна умовно розподілити на три групи: легкі, середні і важкі системи.

Легкі системи. До цієї категорії можна віднести такі системи, як AutoCAD, CAD-KEY, Personal Designer, ADEM, КОМПАС. Такі системи призначені в основному для виконання креслень. Також вони можуть використовуватися для двовимірного (2D) моделювання і нескладних тривимірних побудов. Вони прості у використанні, містять безліч бібліотек стандартних елементів, підтримують різні стандарти оформлення графічної документації.

Системи середнього класу. Клас відносно недорогих тривимірних CAD-систем. До нього належать системи AMD, Solid Edge, Solid Works тощо. Їх поява пов'язана зі збільшенням потужності персональних комп'ютерів і розвитком операційної системи. З їх допомогою можна розв'язувати до 80% типових машинобудівних задач, не залучаючи потужні і дорогі CAD/CAM-системи важкого класу. Більшість систем середнього класу ґрунтується на тривимірному твердотільному моделюванні. Вони дозволяють проектувати більшість деталей загального машинобудування, складальні одиниці середнього рівня складності, виконувати спільну роботу групам конструкторів. У цих системах можливо проводити аналіз перетинів і зазорів у складаннях.

Системи важкого класу. Такі системи надають повний набір інтегрованих засобів проектування, виробництва, аналізу виробів. До цієї категорії систем відносять CATIA, Unigraphics, Pro/ENGINEER, CADD5, EUCLID, Cimatron. Ці системи дозволяють розв'язувати широкий спектр конструкторсько-технологічних задач. Окрім функцій, доступних системам середнього класу, важким мають додаткові функції:

- проектування деталей найскладнішого типу, що містять дуже складні поверхні;
- виконання побудови поверхонь за наслідками обміру реальної деталі, виконання згладжування поверхонь і складних сполучень;
- проектування масивних складок, що вимагають ретельної компоновки і містять елементи інфраструктури (кабельні джгути, трубопроводи).



Рисунок 3.1 - Класифікація CAD/CAM-систем

Для сучасних CAD/CAM-систем характерним є модульний принцип побудови системи. Нижче розглянуто модулі та їх призначення для різних типів систем.

Модулі CAD систем:

- створення об'ємної моделі деталі і вузлів із статичним аналізом складальності виробів;
- параметризація розмірів деталей;
- оформлення складальних і моделювальних креслень по об'ємних моделях відповідно до стандартів;
- фотореалістичне відображення виробу з урахуванням текстури матеріалу, кольору і шорсткості поверхні;

- виведення зображення на плоттер;
- імпорт-експорт моделі між різними CAD через інтерфейси.

Модулі САМ-систем:

- динамічний контроль процесу збірки вузла;
- вибір параметрів холодного штампування (імітується весь процес штампування, у тому числі «накладення» штампувальних пристроїв на поверхню деталі);
- створення і відладка програм для верстатів з ЧПУ (моделюється кінематика верстата, його робоча зона, стійка управління, заготівка, її кріплення й інструмент; на екрані детально відображається процес обробки);
- оптимізація параметрів процесів литва деталей з пластмас;
- модулі програмування для верстатів з ЧПУ;
- створення, редагування і моделювання програм вимірювання і контролю відповідності деталі її об'ємній моделі за допомогою координатно-вимірювальної машини.

Електронна модель виробу, що складається із зазначених даних, проходить у процесі створення три рівні архівації: 1) архів розробника; 2) архів групи розробників; 3) загальний архів готових проектів. Переміщення інформації на більш високий рівень відбувається у результаті «електронного підпису» особи, що ухвалює рішення.

3.2 Виконання замірів фрезерно-гравірувального верстата Woodpecker

Як було розглянуто вище, є три види реверс-інжинірингу в залежності від складності об'єкта побудови. Створення 3D моделі верстата відноситься до виду – реінжиніринг складних виробів, отже для побудови необхідно використовувати важкі або середні CAD системи. В нашому випадку будемо користуватися системою SolidWorks, яка повністю задовольняє наші потреби у необхідному

функціоналі. Далі буде розглянуто послідовність проведення замірів на реальному верстаті, та приклади створення моделей виміряних деталей та вузлів.

3.2.1 Етапи вимірювання деталей та вузлів верстата

Вимірювання верстата відбувалися у наступній послідовності. Спочатку були виконані вимірювання «Рами» на якій кріпиться стіл, напрямні порталу, а в її основі встановлено електрообладнання верстату. Рама в даному типі верстату замінює класичну суцільну станину, отже, вона повинна забезпечувати ті самі конструктивні властивості, що і суцільна станина, а саме: мати велику жорсткість, стабільність конструкції, достатню несучу здатність для встановлення і закріплення на неї вузлів верстату та заготовок. Також в рамі повинно бути передбачено місце для встановлення опор верстату. Рама виготовлена зі сталі, та має зварну конструкцію. В перетині балки з яких зварено раму є квадратом. Жорсткості конструкції додає поперечна та повздовжні балки які проходить в нижній частині рами.

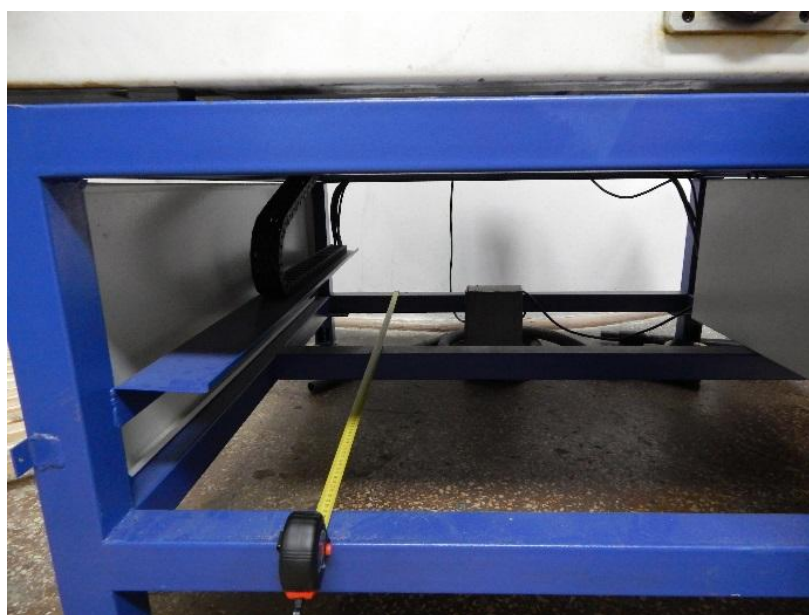


Рисунок 3.2 — Вимірювання рами

Після вимірювання рами наступним робочим органом якій вимірюється є стіл. Стіл є складальною одиницею який складається з наступних деталей: напрямні осі Y, каркас, робоча поверхня, ходовий гвинт.

В даному верстаті напрямними осі Y є циліндричні напрямні рейки які складаються з круглого полірованого валу, рейки та лінійних кулькових блоків. Напрямні кріпляться до каркасу стола, та забезпечують переміщення порталу зі шпинделем вздовж столу по осі Y.



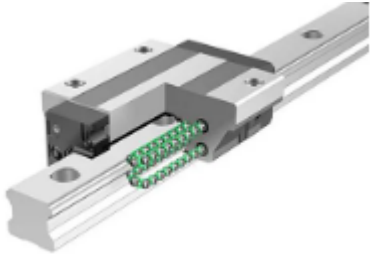
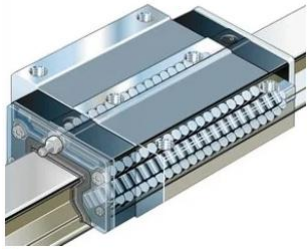
Рисунок 3.3 — Вимірювання напрямних столу.

В таблиці 3.1 наведені типи напрямних кочення які найчастіше використовуються при конструюванні верстатів з ЧПК. В таблиці також зазначено переваги та недоліки кожного типу напрямних.

Таблиця 3.1 – Порівняння типів напрямних кочення верстатів з ЧПК

Тип напрямної	Переваги	Недоліки
Напрямні поліровані вали 	• Легкість встановлення. Усього дві точки кріплення до станини; • Доступна ціна; • Великий термін експлуатації, зумовлений незначним зносом та високою міцністю; • Мале тертя та висока точність переміщення порталу.	• Залежність провисання від габаритів робочого столу фрезерного верстата; • Неможливість перевірки твердості сталі, з якої виконані напрямні
Шлицеві вали 	• Легкість встановлення. Усього дві точки кріплення до станини; • Високий ступінь жорсткості та високий опір до зносу; • Здатністю сприймати крутний момент, що отримується від втулки.	• Достатньо велика ціна; • Складна конструкція.
Вали на опорі 	• Менше провисання під власною вагою та впливом навантаження; • Можна використовувати для верстатів ЧПК, довжина робочого столу яких перевищує 1 м; • Легкі у монтажі; • Доступна ціна.	• Бажано не застосовувати для верстатів з важким шпинделем; • Можливий великий люфт через використання розімкнутого лінійного блоку; • Малий ресурс експлуатації.

Кінець таблиці 3.1

Кулькові профільні рейкові напрямні 	• Висока точність; • Хороша вантажопідйомність; • Висока стійкість до зносу внаслідок інтенсивної експлуатації; • Малий люфт або його повна відсутність.	• Велика трудомісткість установки; • Висока вартість; • Високі вимогами до якості конструктивного виконання (шорсткості, прямолінійності тощо).
Роликові профільні рельсові напрямки 	Ті самі, що і для кулькових, але більша вантажопідйомність та жорсткість.	Ті самі, що і в кулькових.

На верстаті Woodrescker встановлені напрямні типу – циліндричний вал на опорі з лінійним блоком для переміщення робочого органу.

Система з напрямними валами та лінійними підшипниками з економічним та надійним способом забезпечення лінійного переміщення органів верстата. Ця система використовується при виробництві фрезерних верстатів з ЧПК, плазморізів, лазерів та 3D принтерів.

Для виготовлення прецизійних валів використовують міцну високовуглецеву та леговану сталь. Вироби піддаються індукційному загартуванню та шліфуванню, що забезпечує підвищену зносостійкість та малий коефіцієнт тертя

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики валів напрямних

Технічний показник	Значення
Робоча температура	від -20°C до +110°C
твердість поверхні	HRC 60-64
глибина гарту	0,4-3,2 мм
діаметр валу	6-80 мм
максимальна довжина	6000 мм

При виборі валу треба враховувати можливість прогинання валу на великій довжині конструкції та відносно меншу точність у порівнянні з рейковими напрямними. Для усунення прогинання валу використовують саме вали на опорі (рис. 3.4).

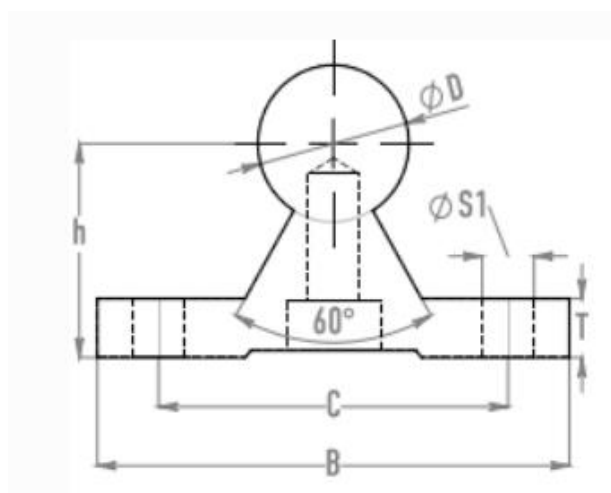


Рисунок 3.4 – Конструкція валу на опорі

Лінійні підшипники та блоки (рис. 3.5) підбирають залежно від умов роботи верстата, орієнтуючись на наступні показники: вантажопідйомність, конструкцію та варіант установки. Розміри та характеристики підшипників можуть незначно відрізнятися залежно від стандарту та виробника.



Рисунок 3.5 – Конструкція лінійного підшипникового блоку

Наступним кроком є вимірювання «Каркасу стола». Каркас столу повинен забезпечувати жорстке закріплення напрямних та робочої поверхні. Також сам каркас повинен бути жорстко закріплено на рамі верстата, для забезпечення стабільності положення заготовки під час обробки під дією сил різання в різних напрямках.

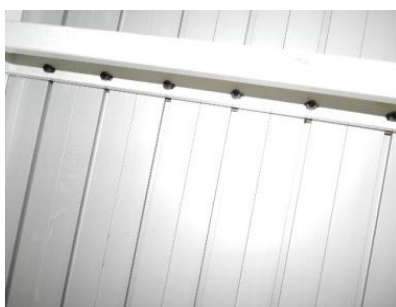


Рисунок 3.6 — Вимірювання «Каркасу стола».

Після виміру каркасу вимірюємо габаритні розміри робочої поверхні столу.



Рисунок 3.7 — Вимірювання «Робочої поверхні стола».

Робоча поверхня столу гравірувального верстату може бути виконана з алюмінію або МДФ. Столи з МДФ використовуються як витратний матеріал і замінюються по мірі зносу. Алюмінієві столи довговічніші і дають змогу забезпечувати в своїй конструкції додаткові елементи для кріплення заготовок та пристосувань. Додатковими елементами на столі можуть бути отвори або Т-подібні пази.

Верстат Woodpecker обладнаний алюмінієвим столом з Т-подібними пазами.

Розміри робочої поверхні визначають максимальні габарити заготовки яку можливо закріпити на верстаті.

Наступним робочим органом, який вимірюється є «Портал». Портал складається з ходового гвинта, задньої і передньої опор гвинта, напрямних траверси, корпус порталу, опори порталу.

Портал призначений для закріплення траверси та переміщення її по осі Х. Напрямними осі Х виступають циліндричні напрямні рейки як і по осі Y.

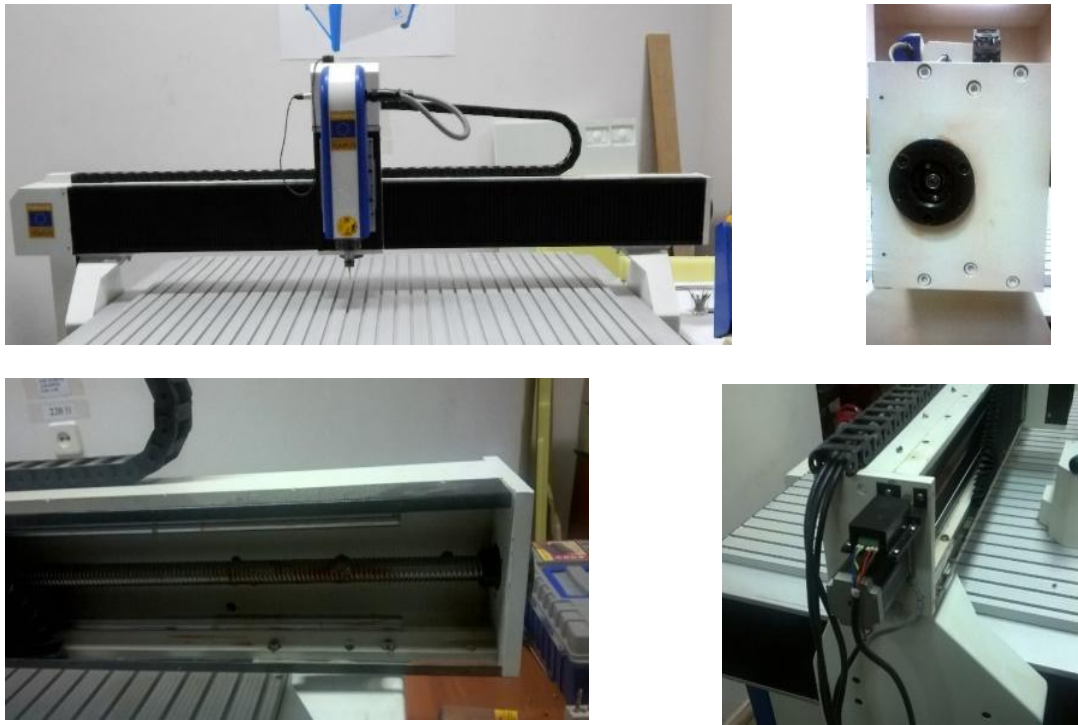


Рисунок 3.8 — Вимірювання порталу.

Наступним робочим органом, який вимірюється є «Траверса». Вона складається з ходового гвинта, опор гвинта та корпусу траверси.

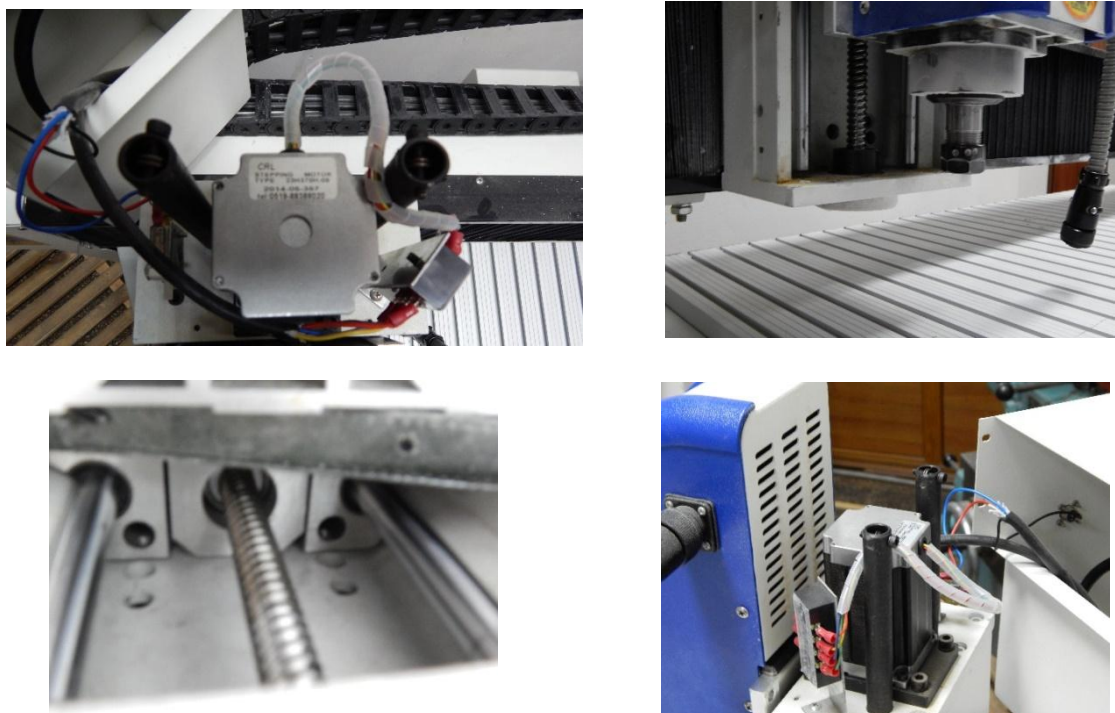


Рисунок 3.9 — Вимірювання деталей робочого органу «Траверса».

Останній орган який потрібно виміряти є «Шпиндель». Шпиндель є стандартним покупним елементом конструкції і в різній комплектації верстата може мати різні технічні характеристики. Технічні характеристики шпинделя моделі JKONGMOTOR 80 верстата Woodpecker CP1208 занесені в таблицю 3.3.

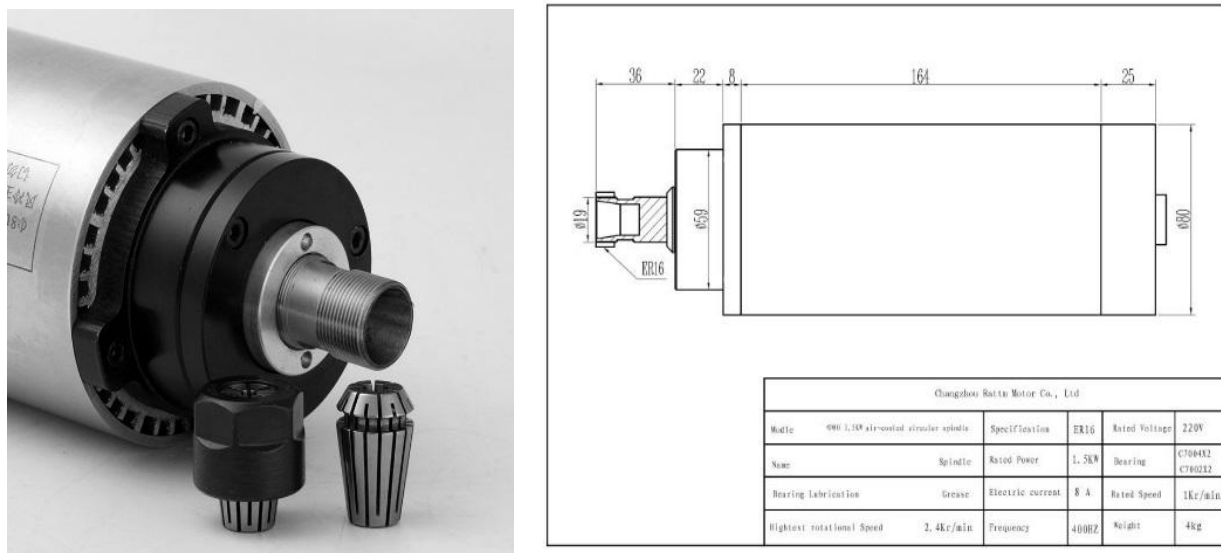


Рисунок 3.10 — Конструкція шпинделя верстату Woodpecker CP1208

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики шпинделя верстату JKONGMOTOR 80

Характеристика	Значення
Частота обертання	До 24000 об/хв
Потужність	1,5 кВт
Напруга	110/220/380 В
Струм	8 А
Частота	400 Гц
Охолодження	Повітряне
Вага	4,3 кг
Цанга	ER16 $\varnothing 3.175\text{-}\varnothing 10$

3.2.2 Електронне оснащення верстату

Для подальшого використання створеної 3D моделі верстата як цифрового двійника більш високої зрілості, наприклад для контролю процесу обробки в реальному часі, необхідно визначити всі електронні складові конструкції верстату, для коректного відтворення їх технічних параметрів при підключенні моніторингових програм.

Інвертор або частотний перетворювач (ЧП) є спеціальним електричним пристроєм-перетворювачем для гнучкого управління електродвигуном змінного струму. За рахунок зміни частоти напруги живлення, інвертор дозволяє змінювати швидкість обертання електродвигуна шпинделя в потрібних межах. Так частота змінного струму 50Гц (для «побутової» або «промислової» напруги 220В/380В) може бути перетворена до значення 0-400Гц і більше. Відповідно до цього і швидкість обертання шпинделя може змінюватися від 0 об/хв до номінального значення (18 тис., 24 тис., 36 тис. — залежно від конкретної моделі).

Крім цього, інвертор повинен забезпечувати сталість електричних параметрів на виході, незважаючи на швидкозмінний характер навантаження на шпиндель. При виборі інвертора слід орієнтуватися на його діапазон потужності і частоти (характеристики шпинделя повинні укладатися у ці діапазони), наявність захисту електродвигуна, і навіть додаткові функції полегшення роботи (наприклад, вхід/вихід для дистанційного управління).

Існує певна кількість характеристик за якими обирають ЧП для певного виду обладнання:

- 1) Електроживлення та діапазон вихідної частоти.

Кількість фаз живлення і номінальна напруга (В) — це перше, на що потрібно звертати увагу при виборі ЧП. Якщо це не врахувати та неправильно підключити обладнання, виникнуть аварійні ситуації та, як наслідок, верстат вийде з ладу.

Випускаються одно- і трифазні моделі з напругою на 220В і 380В відповідно. Існують високовольтні мегаватні установки для особливо потужних агрегатів. Напруга місцевих електромереж, а точніше її якість, також необхідно враховувати при виборі ЧП. Якщо станеться падіння вхідної напруги, електропривод аварійно зупиниться, але якщо буде стрибок вгору, він може згоріти. Тому чим ширший діапазон допустимих значень напруги приладу, тим краще (діапазони вказані в технічному описі). Моделі з широким діапазоном коштують дорожче.

Частота (Гц) - наступна за важливістю характеристика, оскільки безпосереднє керування швидкістю обертання валу здійснюється за допомогою зміни частоти вихідної напруги. Потрібно звернути увагу на діапазон значень вихідної частоти ЧП (наприклад, від 0 Гц до 400 Гц). Чим ширший діапазон, тим більше можливостей для регулювання. У перетворювачів частоти на основі інвертора напруги, вихідна частота не залежить від значення частоти напруги живлення.

2) Потужність та номінальний струм.

Вибір частотного перетворювача за потужністю та номінальним струмом електродвигуна можна здійснити наступними способами:

- за значенням номінального струму електродвигуна за формулою:

$$I_{\text{чп}} = (1.05 \dots 1.1) \cdot I_{\text{дв}} \quad (3.1)$$

де $I_{\text{чп}}$ – номінальний струм частотного перетворювача;

$I_{\text{дв}}$ – номінальний струм електродвигуна.

- на основі повної потужності (кВА), розраховується за формулою:

$$P_{\text{чп}} = \frac{U_{\text{дв}} \cdot I_{\text{дв}} \cdot \sqrt{3}}{1000} \quad (3.2)$$

Важливо, щоб вихідний струм/потужність ЧП дорівнював або перевищував номінальний струм/потужність двигуна. Тому для правильного вибору необхідно знати номінальні характеристики електродвигуна.

Крім співвідношення струму двигуна та вихідного струму, необхідно враховувати момент (зовнішнє навантаження) на валу двигуна під час пуску.

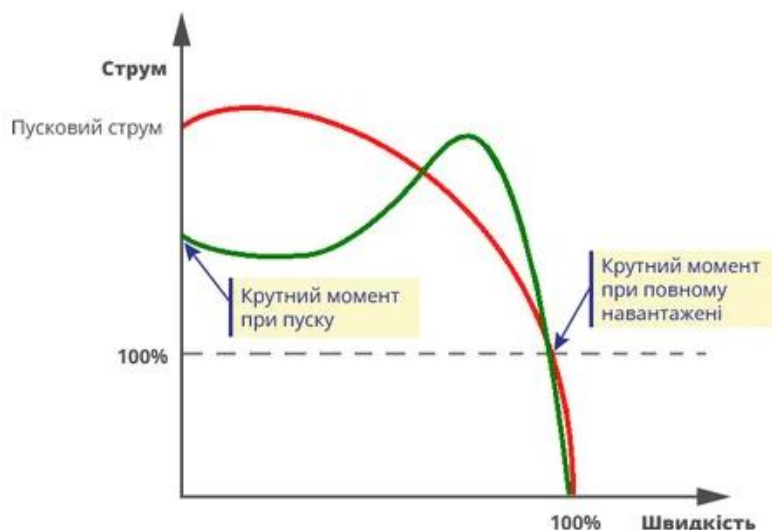


Рисунок 3.11 – Вплив крутного моменту на струм у двигуні.

Так як пусковий струм двигуна значно вищий за номінальний, то при великому початковому зовнішньому опорі обертання ротора, струм у двигуні встигне значно перевищити допустимий струм частотного перетворювача. Також на вибір перетворювача потужністю впливає час розгону електродвигуна.

3) Методи управління: векторний або скалярний.

Прилади зі скалярним керуванням коштують дешевше та простіше у налаштуванні, але вони мають малий діапазон (1:10) та низьку точність регулювання (похибка швидкості може бути 5-10%). Такі частотнорегульовані електроприводи доцільно використовувати, коли параметри навантаження заздалегідь відомі і не змінюються при постійній частоті. Це можуть бути різні механізми з фіксованим режимом роботи, які відповідають за підтримку певного стану технологічного процесу. Наприклад: насоси, вентилятори, компресори.

Векторні прилади більш технологічні, мають широкий діапазон режимів і регулювань ($>1:200$) з практично нульовою похибкою, можуть підтримувати заданий момент при змінній швидкості і на надмалих оборотах, а також постійну швидкість при навантаженні, що різко змінюється. Але вони коштують дорожче і вимагають тонкого індивідуального налаштування. Такі векторні ЧП підходять для конвеєрів, ліфтів, транспортерів, кранів, пресів, верстатів.

4) Додаткові опції.

Щоб зрозуміти, які додаткові можливості можуть знадобитися, необхідно орієнтуватися на особливості робіт які виконуються на обладнанні:

- для чого передбачається використовувати ЧП;
- експлуатаційні навантаження: скільки приводів підлягають контролю і в якому режимі;
- умови роботи ЧП: чи потрібний спеціальний захист корпусу.

Для керування приводами з легким навантаженням та стабільними оборотами обирають недорогу просту модель з обмеженим набором регулювань та мінімальними опціями.

Для керування приводами зі змінними навантаженнями, швидкими пусками та зупинками потрібен ЧП з модулем відведення надлишків енергії, що виникають при гальмуванні.

Для високоточних завдань (у верстатах різного призначення) може знадобитися прилад з тонким налаштуванням у широкому діапазоні режимів і збереженням заданого крутного моменту на надмалих оборотах.

Верстат Woodpecker обладнаний частотним перетворювачем SUNFAR E300-2S0015.



Рисунок 3.12 – Частотний перетворювач SUNFAR E300-2S0015

Переміщення за кожною з осей верстату Woodpecker відбувається за рахунок крокових електродвигунів.

Кроковий двигун – є безщітковим електромеханічним пристроєм, який перетворює послідовність електричних імпульсів, прикладених до його обмоток збудження, в точно визначене покрокове механічне обертання. Кількість вхідних імпульсів, що подаються на двигун, визначає кутовий крок, отже, положення двигуна валу контролюється шляхом відправлення пакета імпульсів. Ця унікальна особливість робить кроковий двигун пристосований для роботи з системами керування без зворотного зв'язку, в яких точне положення валу підтримується точною кількістю імпульсів без використання датчика зворотного зв'язку. Чим менший кутовий крок, тим більше буде число кроків на оборот, і тим вище буде точність позиціонування. Кути кроку можуть становити від 90° до $0,72^\circ$, кути кроку, що зазвичай використовуються, становлять $1,8^\circ$, $2,5^\circ$, $7,5^\circ$ і 15° градусів.

Існує три основні типи крокових двигунів:

- реактивний (ротор з магнітом'якого матеріалу);
- з постійними магнітами (ротор з магнітотвердого матеріалу);
- гібридний.

У всіх цих двигунах у статорі використовується обмотки збудження. Напруга постійного струму подається на котушки обмоток збудження і кожен вихід обмотки підключається до джерела через твердотільний перемикач. Залежно від типу крокового двигуна, конструкція ротора складається з ротора з

м'якої сталі з полюсами, що виступають, циліндричного ротора з постійним магнітом і постійного магніту з зубцями з м'якої сталі.

Конструкція реактивного двигуна (рисунок 3.13). Двигун складається з намотаного статора та багатозубого ротора з магнітом'якого матеріалу. Статор складається із сталевих пластин, на які намотані обмотки. Зазвичай він намотується на три фази, розподілені між парами полюсів. Кількість полюсів сформованого таким чином статора кратно парному числу фаз, для яких намотані обмотки.

Ротор має виступаючі полюси, виконаний повністю з магнітом'якого матеріалу. Виступаючі зубці полюса ротора мають таку ж ширину, що і зубці статора. Кількість полюсів на статорі відрізняється від числа полюсів ротора, що забезпечує можливість самостійного запуску та двонаправленого обертання двигуна.

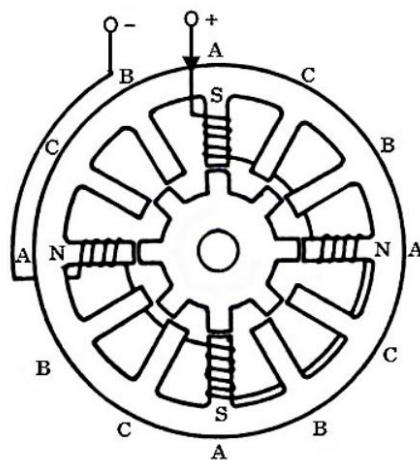


Рисунок 3.13 – Конструкція реактивного двигуна

Конструкція крокового двигуна з постійними магнітами (рисунок 3.14). Статор такого двигуна є багатополісним і його конструкція аналогічна реактивному кроковому двигуну. Він складається з щілинної периферії, на яку намотані котушки збудження статора, які можуть бути дво-, три- або чотирифазними. Кінцеві клеми всіх цих обмоток виведені та підключені до

збудження постійного струму через напівпровідникові перемикачі ланцюга приводу.

Ротор складається з матеріалу з постійними магнітами, такого як ферит, який може мати форму циліндричного або виступаючого полюса, але зазвичай це він гладкий циліндричний. Ротор спроектований так, щоб мати парну кількість постійних магнітних полюсів з "+" і "-" полярностями, що чергуються.

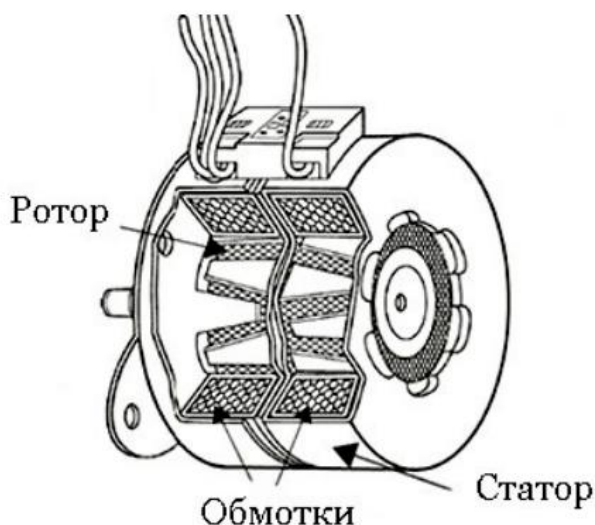


Рисунок 3.14 – Конструкція крокового двигуна з постійними магнітами

Конструкція гібридного крокового двигуна (рисунок 3.15). Статор цього двигуна такий самий, як у інших типів. Котушки статора намотані на полюси, що чергуються. При цьому на кожному полюсі намотані котушки різних фаз, зазвичай дві котушки на полюсі, який називається біфілярним з'єднанням.

Ротор складається з постійного магніту, який намагнічений в осьовому напрямку для створення пари магнітних полюсів ("+" та "-" полюсів). Кожен полюс покритий рівномірно розташованими зубцями. Зубці складаються з м'якої сталі та двох секцій, з яких на кожному полюсі зміщені один щодо одного на півзубця.

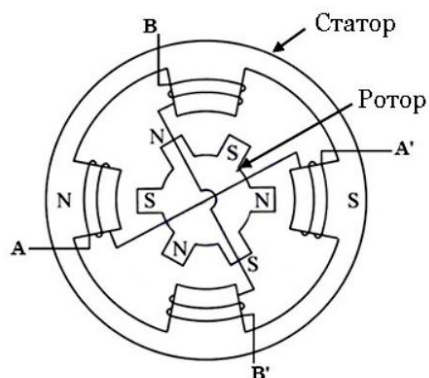


Рисунок 3.15 – Конструкція гібридного крокового двигуна

Таблиця 3.4 - Переваги та недоліки крокових двигунів

Переваги	Недоліки
1	2
точність позиціонування, похибка окремого кроку не накопичується з кроками	складність системи управління
низька інертність при старті, реверсі та зупинці	поява резонансу за певних умов
висока надійність, через відсутність тертьових деталей	падіння потужності зі зростанням швидкості
швидкість двигуна прямо пропорційна частоті вхідних імпульсів, таким чином може бути досягнутий широкий діапазон швидкості обертання	Відсутність зворотного зв'язку
Кут повороту двигуна прямо пропорційний вхідним сигналам	низька швидкість обертання
фіксація положення під час зупинки струмом утримання	невисока питома потужність
крокові двигуни дешевші порівняно з серводвигунами	Шум

Моделі електродвигунів та їхні характеристики занесено в таблицю 3.5.

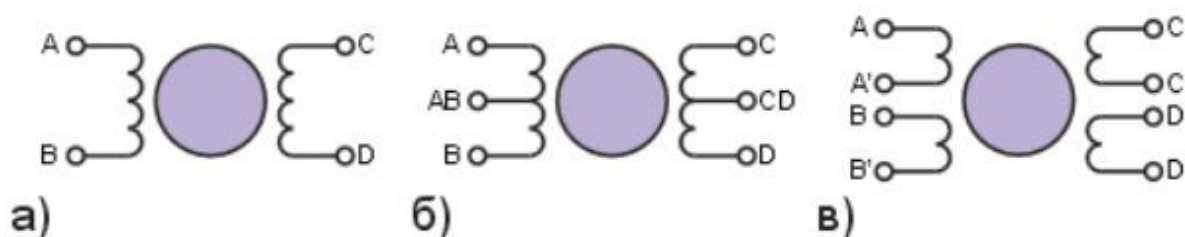
Таблиця 3.5 - Електродвигуни верстату Woodpecker

Двигун осі Y: 86ВНН114-500В-30Н	
1	2
Кількість фаз	2
Кутовий крок	1,8°
Струм	5 А
Опір струму	0,1 Ом
Момент інерції	3550 г/см ²
Максимальний статичний крутний момент	5,8 Нм
Діаметр валу	14 мм
Двигун осі X та Z: 57ВНН114-500В-30Н	
Кількість фаз	2
Кутовий крок	1,8°
Струм	5 А
Опір струму	0,75 Ом
Максимальний статичний крутний момент	2,6 Нм
Момент інерції	800 г/см ²
Діаметр валу	10 мм

Для керування кроковим двигуном використовується спеціальний контролер, який називають драйвером крокового двигуна. Залежно від конфігурації обмоток двигуни поділяються на біполярні та уніполярні.

Біполярний двигун має одну обмотку в кожній фазі, яка для зміни напрямку магнітного поля повинна переполюсовуватись драйвером. Для такого типу двигуна потрібен мостовий драйвер, або напівмостовий з двополярним живленням. Усього біполярний двигун має дві обмотки і, відповідно, чотири виводи.

Уніполярний двигун також має одну обмотку в кожній фазі, але від середини обмотки зроблено відведення. Це дозволяє змінювати напрямок магнітного поля, створюваного обмоткою, простим перемиканням половинок обмотки. При цьому значно спрощується схема драйвера. Драйвер повинен мати лише 4 простих ключа. Таким чином, в уніполярному двигуні використовується інший спосіб зміни напрямку магнітного поля. Середні виходи обмоток можуть бути поєднані всередині двигуна, тому такий двигун може мати 5 або 6 виходів (рис. 3.16). Іноді уніполярні двигуни мають роздільні 4 обмотки, тому їх помилково називають 4-х фазними двигунами. Кожна обмотка має окремі виходи, тому всього 8 виходів (рис. 3.16 в). При відповідному з'єднанні обмоток такий двигун можна використовувати як уніполярний або біполярний. Уніполярний двигун з двома обмотки і відводами теж можна використовувати в біполярному режимі, якщо залишити залишки непідключеними.



Біполярний двигун (а), уніполярний (б) та чотирьох обмотковий (в)

Рисунок 3.16 - Види конфігурацій обмоток крокових двигунів

Незалежно від того, який драйвер або двигун використаний, керування кроковим двигуном може здійснюватися в одному з трьох режимів:

- повнокроковий;
- півкроковий;
- мікрокроковий.

Повнокроковий режим управління передбачає поперемінну комутацію фаз без перекриття, при цьому одночасно до джерела напруги підключена тільки одна з фаз. При такому способі керування на кожен повний крок електродвигуна припадає одна фаза та точки рівноваги ротора ідентичні полюсам статора. Даний режим має і недолік: у випадку з біполярним двигуном у повнокроковому режимі в один і той самий момент задіюється лише половина обмоток, з уніполярним – чверть. Існує й інший варіант повнокрокового управління, що передбачає одноразове включення двох фаз. Такий спосіб керування заснований на фіксації ротора між полюсами статора завдяки подачі живлення на обмотки, причому на повний крок припадає дві фази. При цьому способі керування точка рівноваги ротора зміщується на половину кроку відносно способу з однією фазою, а момент зростає приблизно на 40%.

Застосування напівкрокового режиму керування кроковим двигуном дозволяє збільшити кількість кроків, що припадають на один оберт ротора, вдвічі. При роботі двигуна у такому режимі на кожен другий крок приходиться включення однієї з фаз, а між кроками включаються відразу обидві. Фактично це комбінація змінного включення однофазного та двофазного повнокрокових режимів.

Мікрокроковий режим управління застосовується тоді, коли необхідно отримати максимально велику кількість кроків, що припадають на оборот ротора. При роботі у такому режимі так само працюють дві фази, проте струми обмоток у разі розподіляються нерівномірно, а не 50/50, як і півкроковому. Розмір мікрокроку залежить від конкретного пристрою та налаштувань драйвера. При роботі в мікрокроковому режимі точність позиціонування двигуна значно підвищується, проте потрібний складніший драйвер двигуна.

Для керування кроковими двигунами у верстаті передбачено використання 3 драйверів AM882 LEADSHINE для кожної з осей.



Рисунок 3.17 - Драйвери AM882 LEADSHINE верстату

AM882 – це універсальний цифровий драйвер крокового двигуна з передовими алгоритмами управління. Він обладнаний унікальною системою забезпечення плавності обертання двигуна, оптимального крутного моменту і стабільності роботи. Технологія самодіагностики і автоматичного налаштування двигуна пропонує оптимальні характеристики для використання даного драйвера з різними кроковими двигунами. Двигуни можуть працювати з набагато меншим шумом, меншим нагріванням, більш плавним рухом.

Також в AM882 вбудована функція бездатчикового виявлення зривів обертання вала двигуна (в даний час драйвер виявляє зриви на швидкості більше 300 об/хв).

4 СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ВЕРСТАТА

Створення комп'ютерної моделі відбувається наступним чином:

- першим етапом створюються окремі деталі;
- другим етапом створюється зборка окремих вузлів;
- третій етап це створення зборки всього верстата.

Першими моделюються базові деталі з яких складається верстат: балки каркасу та рами, робоча поверхня столу. Для створення комп'ютерної моделі верстата використовується CAD система SOLIDWORKS.

Першим збірним вузлом є — «Рама верстата», на якій встановлюються всі останні робочі органи верстата. «Рама верстата» складається з балок трьох типорозмірів, які зварюються і утворюють каркас робочого органу. Кожна з цих балок створюється за допомогою ескізу та операції «Витягнута бобишка».

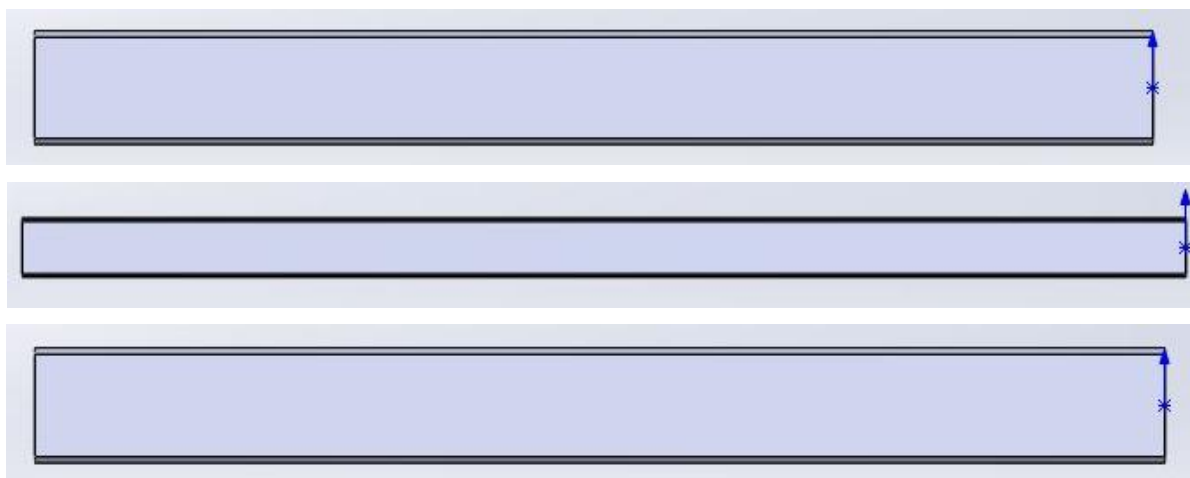


Рисунок 4.1 — Балки рами верстата

Складання вузла відбувається наступним чином, кожна з балок додається до спеціального файлу складання та за допомогою «Спряження» встановлюється на своє місце в конструкції «Рама верстата». Після чого відбувається створення зварних швів.

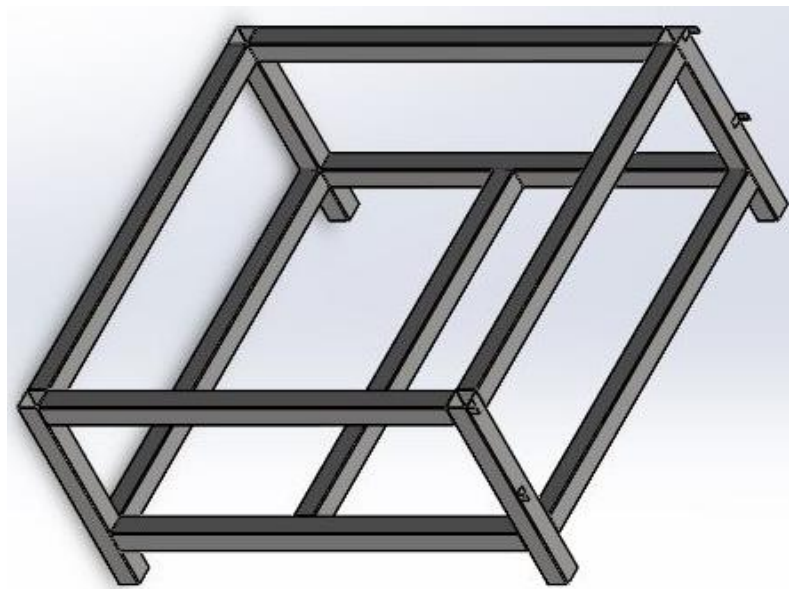


Рисунок 4.2 — Робочий орган «Рама верстата».

Наступним робочим органом який створюється є — «Стіл». «Стіл» складається з каркасу і планок, які кріпляться до каркасу. Каркас складається також з балок трьох типорозмірів, а планка створюється за допомогою ескізу та операції «Витягнута бобишка». Планка створюється таким же чином.

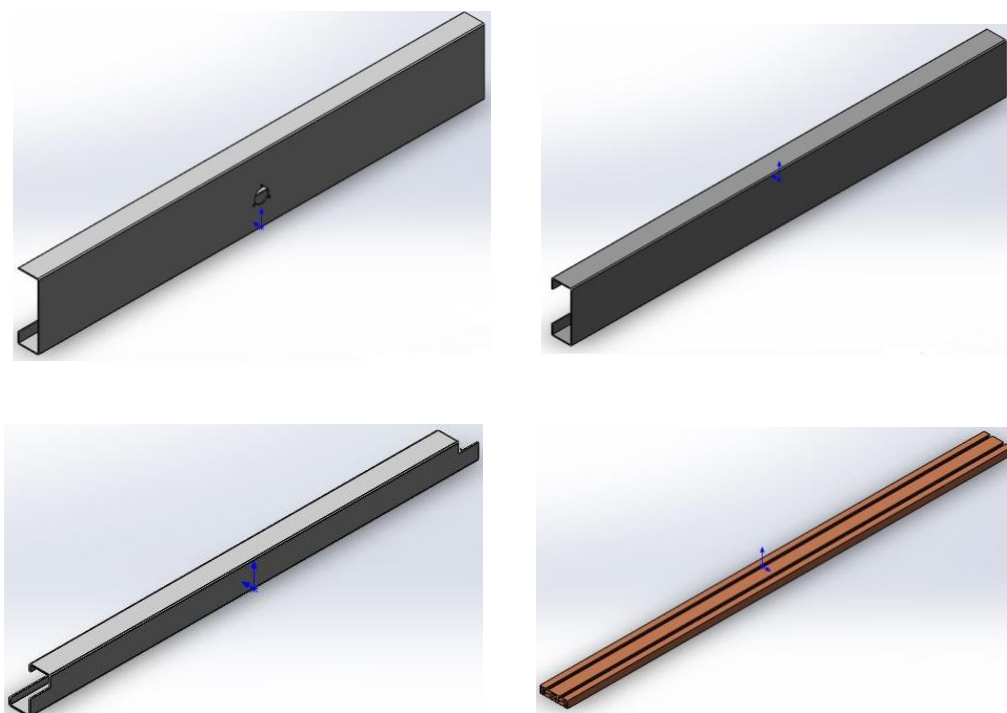


Рисунок 4.3 — Деталі з яких складається «Стіл».

Після створення окремих деталей створюється складання робочого органу «Стіл». Спочатку виконується складання рами стола при допомозі «Спряження» деталі встановлюється на потрібні місця і зварюється за допомогою спеціальної функції у програмному середовищі «SOLIDWORKS 2013». Після цього вставляється планка столу та копіюється 16 разів, та за допомогою стандартного кріплення кріпиться до рами столу. Отже таким чином створюється робочий орган верстата «Стіл», який надається на рисунку 4.4.

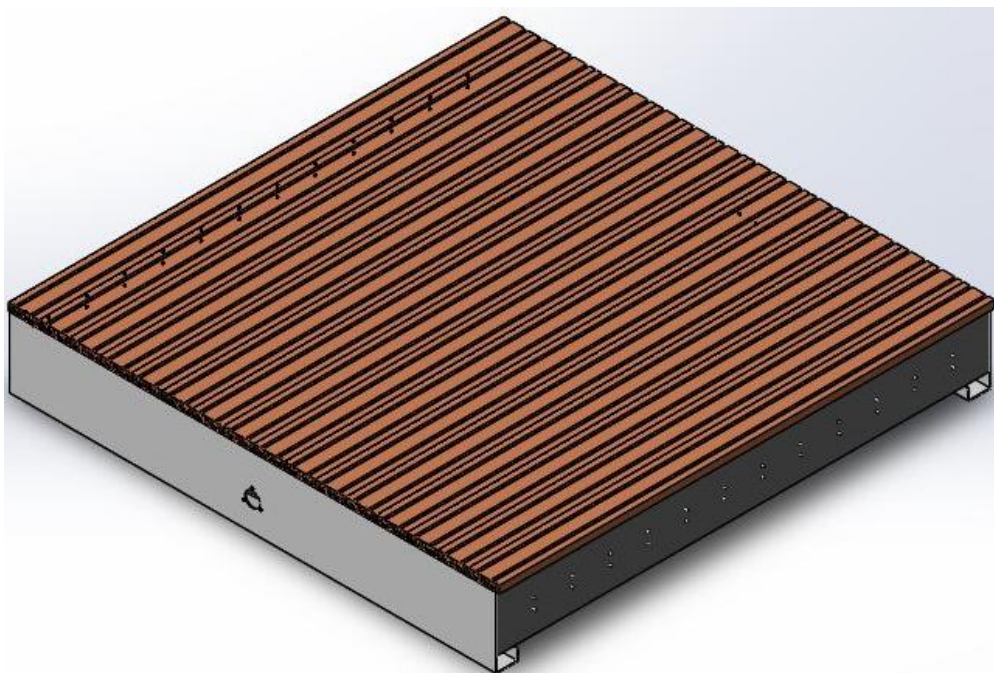


Рисунок 4.4 —Робочий орган верстата «Стіл».

Після «Столу», створюється робочий орган «Портал». Портал являється одним із основних органів верстата, так як на ньому кріпиться «Траверса», «Шпиндель», а портал переміщується відносно столу за допомогою «Тягового механізму». Кожна з перелічених деталей створюється подібним чином до попередніх перерахованих робочих органів. Тому всі інші робочі органи надаються на рисунках 4.5-4.8

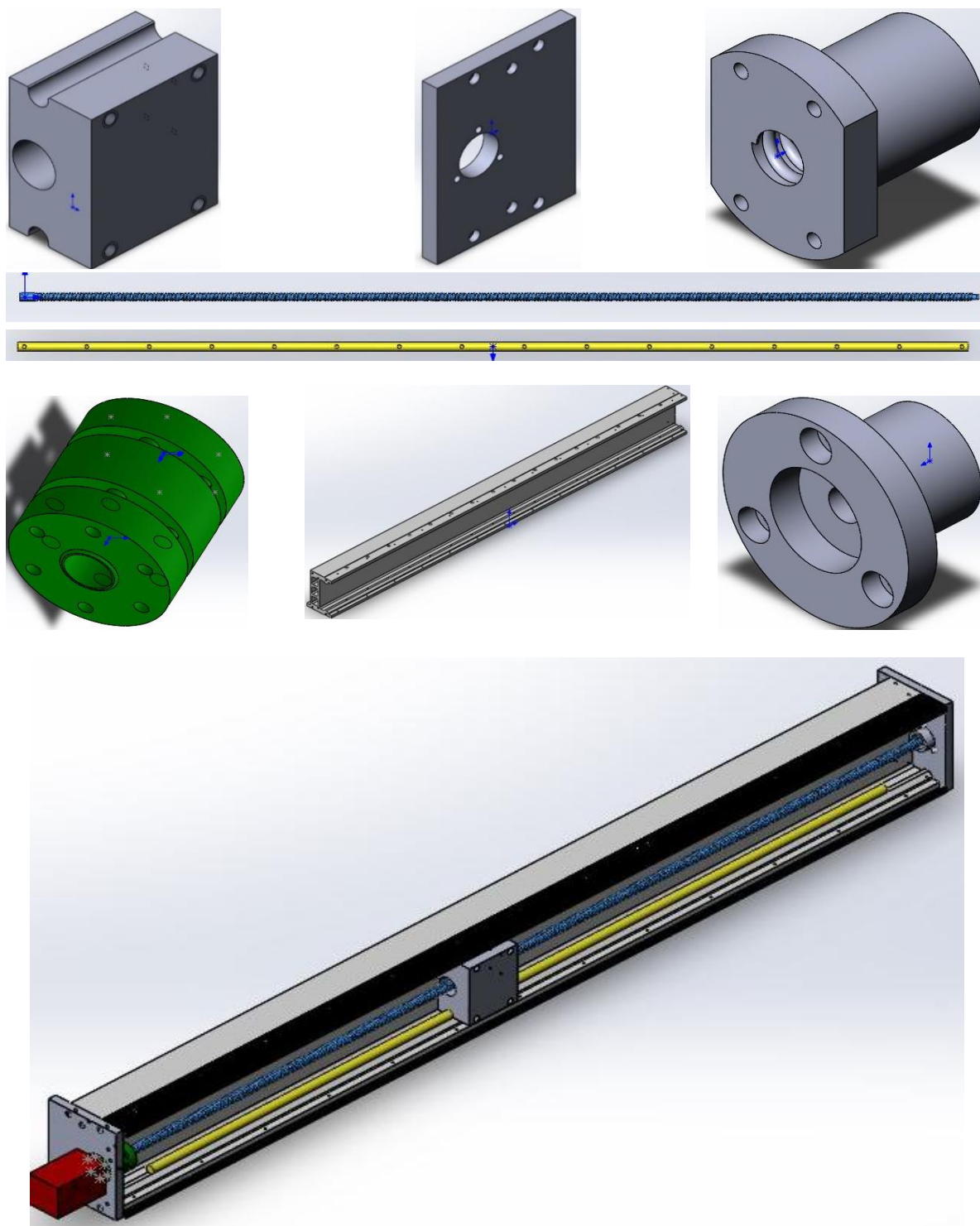


Рисунок 4.5 — Робочий орган «Портал» та комплектуючі деталі.

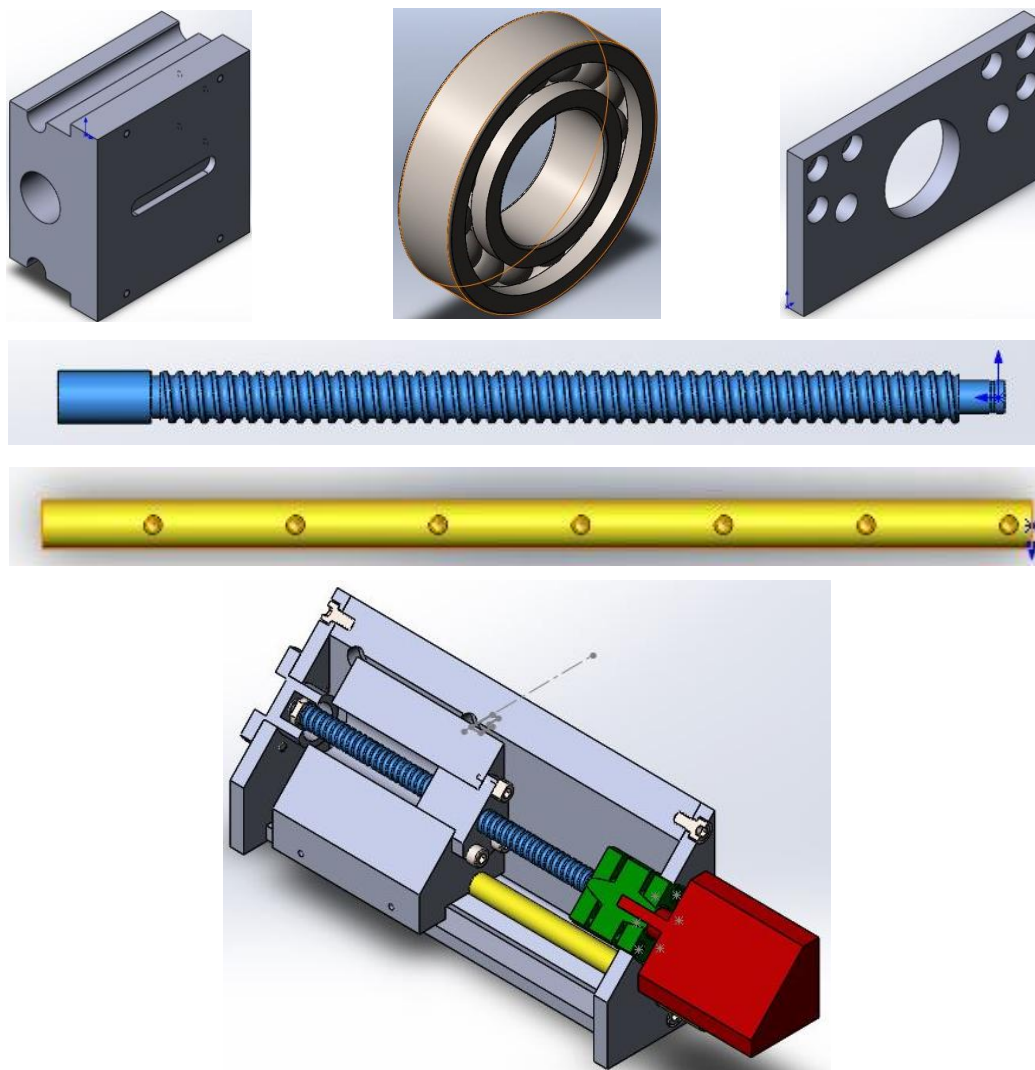


Рисунок 4.6 — Робочий орган «Траверса» та комплектуючі деталі.

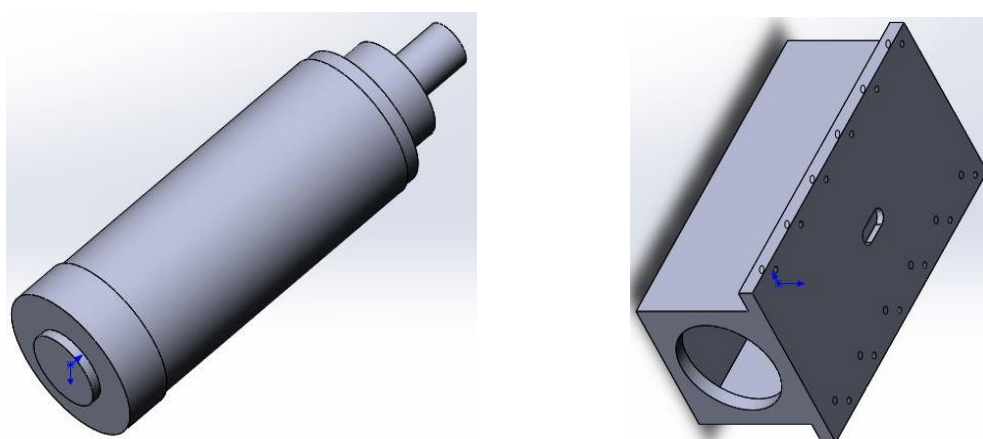


Рисунок 4.7— Робочий орган «Шпиндель».

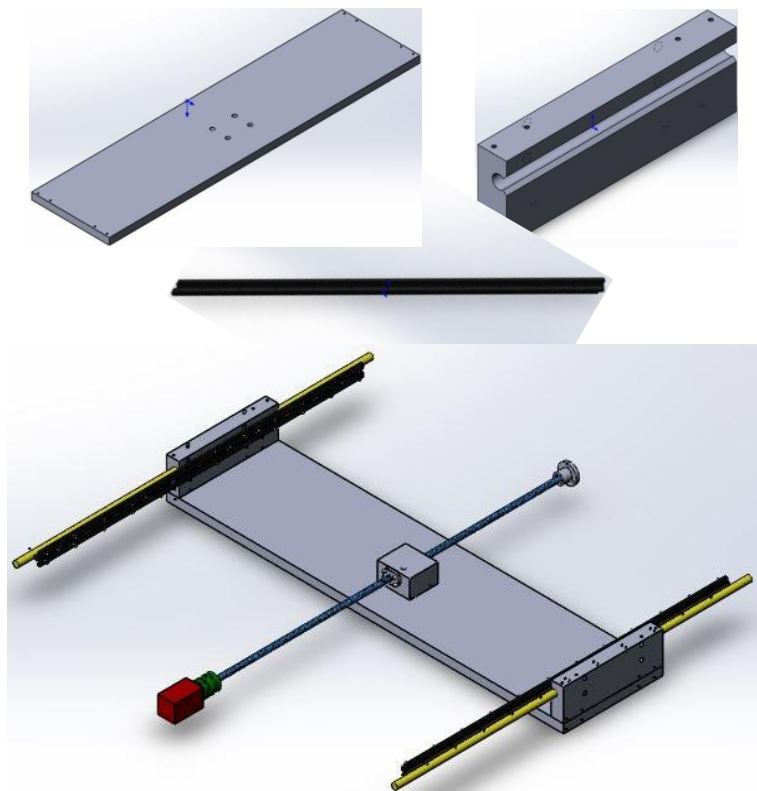


Рисунок 4.8 — Робочий орган «Тяговий механізм» та комплектуючі деталі.

Після створення кожного робочого органу окремо, їх потрібно об'єднати в загальній комп'ютерній збірці верстата. Та після чого закрити всі робочі органи кожухами та різноманітними захисними елементами.

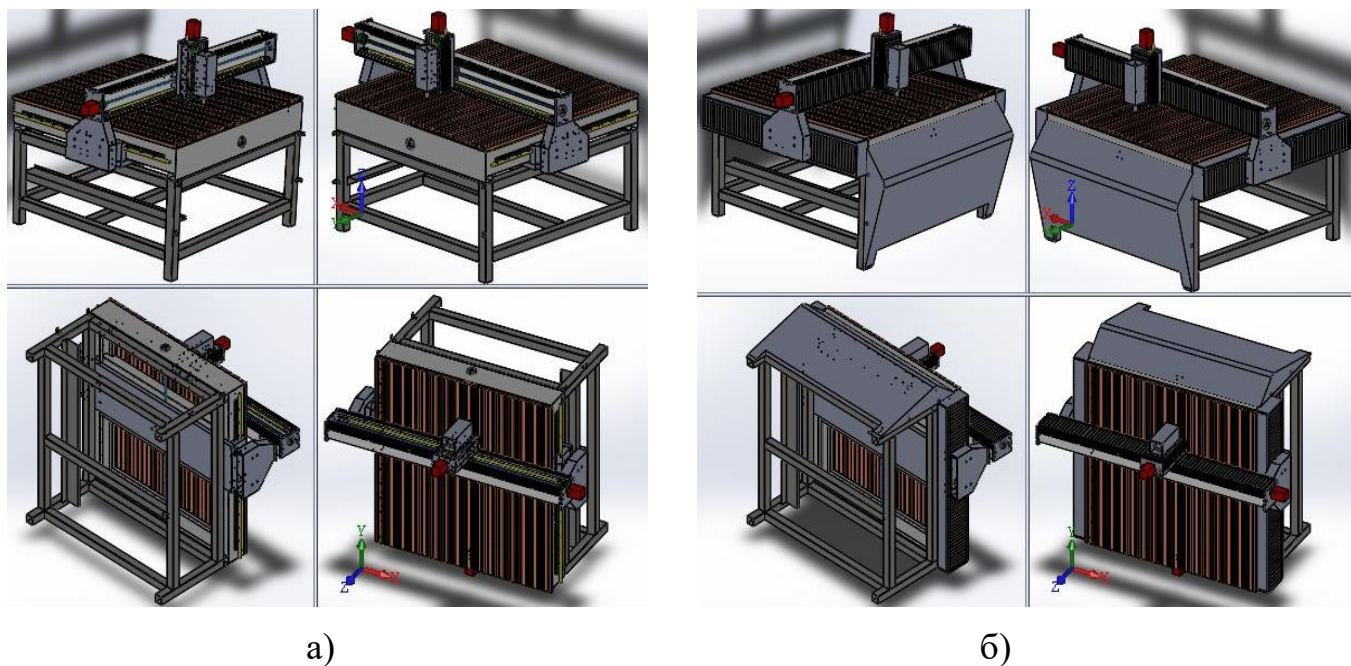


Рисунок 4.9 - Зовнішній вигляд верстата (а- без кожухів; б- з кожухами).

4.1 Естетичні та ергономічні аспекти

Людина здійснює діяльність з управління машиною, знаходячись в певному робочому просторі у відповідній робочій позі в оточенні органів управління та засобів відображення інформації, завжди можна відокремити такий об'єкт, як "робоче місце". Таким чином, "робоче місце" є ергономічною категорією.

Існують стандарти що визначають принципи ергономічної побудови робочих місць. Це ДСТУ ISO 6385-9 що визначає ергономічні принципи проектування робочих систем, ДСТУ 7299:2013 "Робоче місце оператора, взаємне розташування елементів робочого місця", ДСТУ 7252:2011 "Зал та кабінні операторів. Взаємне розташування робочих місць" та ДСТУ 7234:2011 "Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки". Згідно останнього під час взаємного розміщення елементів робочого місця слід врахувати:

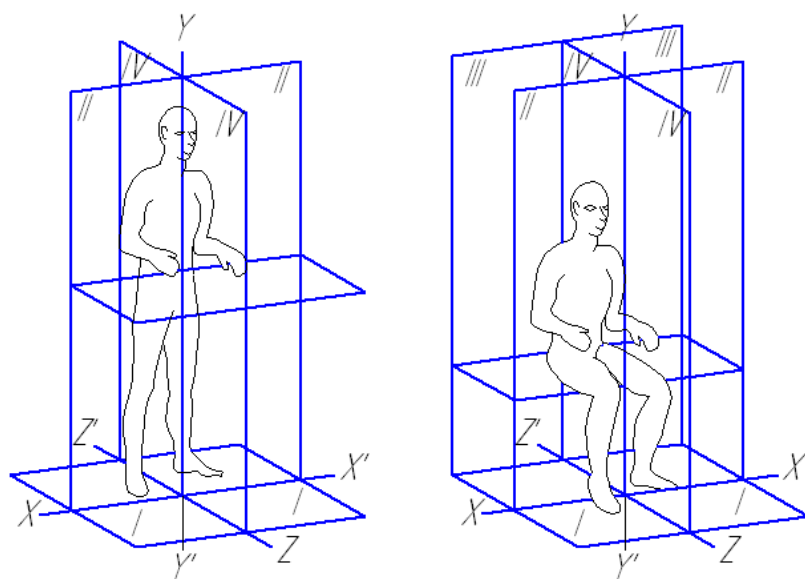
1. Робочу позу людини-оператора;
2. Простір для її розміщення;
3. Можливість оглядати елементи робочого місця;
4. Можливість оглядати простір за межами робочого місця;
5. Можливість виконання записів, розміщення документації та матеріалів, що їх використовує оператор під час своєї діяльності.

Якщо деталізувати викладені вище вимоги, проектувальник має врахувати наступні чинники:

- взаємне положення елементів робочого місця повинно забезпечувати необхідні зорові та звукові зв'язки між оператором та обладнанням, а також між операторами;
- враховувати обмеження, що накладає спецодяг та спорядження людини;

- розташування елементів робочого місця повинно забезпечувати можливість здійснення необхідних рухів та переміщень під час експлуатації та технічного обслуговування обладнання.

При узгодженні робочого простору стає завдання встановлення як місця (координат), так і розмірів робочих поверхонь, інформативних зон, допоміжного обладнання, крісел тощо. На рисунку 4.10 ілюстровано принцип утворення баз для відрахувань та вимірювань параметрів робочого місця. Класифікують: сагітальну, фронтальну та горизонтальну. У позі "сидячи" використовують дві паралельні вертикальні бази. Перша вертикальна база встановлює положення сидіння, а друга - відповідно передній край обладнання. Застосування декількох горизонтальних площин дає можливість розбити фронтальну площину на робочі перерізи для більш точного встановлення зон моторного поля при проектуванні багаторушних операційних місць.



I - горизонтальна площина; II, III - фронтальні площини; IV - середньо-сагітальна площина

Рисунок 4.10- Антропометричні бази для побудови робочих місць:

Робочі поверхні структурують за двома головними функціональними призначеннями:

- засоби відображення інформації (інформаційне поле
- органи управління машиною (моторне поле).

Підхід до вирішення задачі з розміщення робочих поверхонь наступний: інформаційне поле розташовують у зоні, що оптимально доступна для аналізатора (найчастіше зорового), моторне поле розташовують в зоні оптимальної досяжності для виконання управління з необхідним зусиллям відповідною кінцівкою.

Робочі поверхні, що використовують як панелі управління, структурують за показниками досяжності, пріоритетності або за загальною логікою. Згідно із ДСТУ 8604:2015, робочу поверхню поділяють на три зони рис. 4.11.

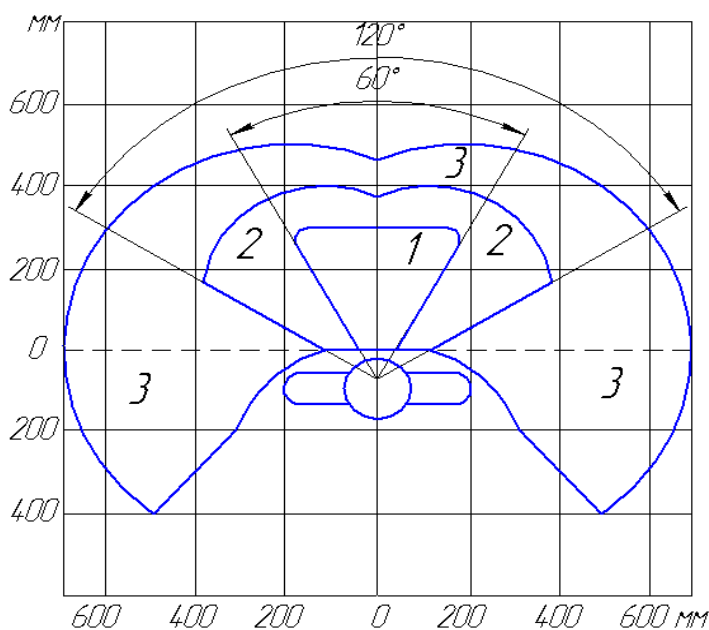


Рисунок 4.11 - Встановлення зон моторного поля для виконання робіт в позі "сидячи".

1 - оптимальна зона моторного поля (орієнтовно її можна встановити розведенням ліктів). В цій зоні розміщують найбільш важливі органи управління та такі, якими оператор змушений користуватися дуже часто;

2 - зона легкої досяжності (може бути встановлена розведенням передпліч) використовується для розміщення таких органів управління, якими оператор змушений користуватися часто;

3 - зона досяжності моторного поля (встановлюється розведенням витягнутих рук), призначена для розміщення найменш відповідальних органів управління або таких, якими користуються рідко.

Зони моторного поля на горизонтальній площині для виконання робіт стоячи встановлюють за тим самим принципом, що й для виконання робіт сидячи, але у зв'язку з більшою мобільністю пози, межі зон досяжності збільшують у середньому на 50÷100 мм.

При виборі відповідної робочої пози слід мати на увазі наступні умови:

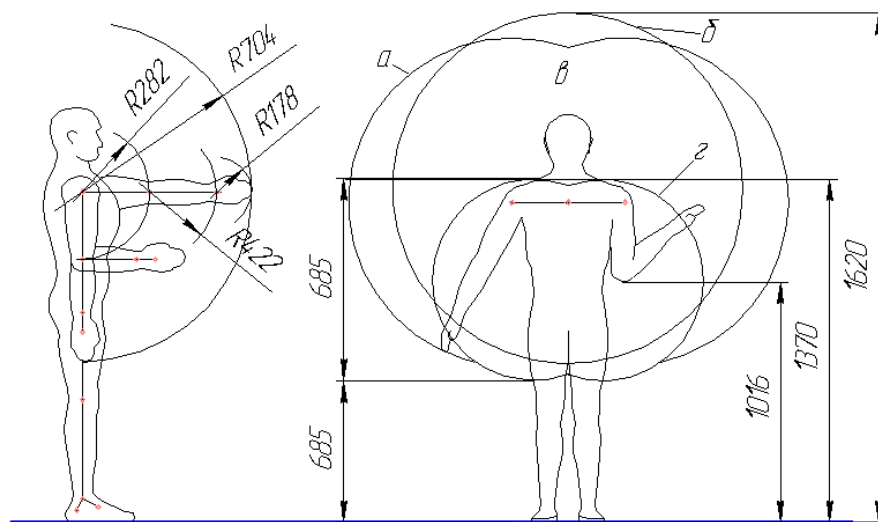
- технологічні особливості процесу (точність дій, характер їх чергування, напрямок фізичних дій та необхідні для їх виконання зусилля);
- фізичне навантаження працюючого;
- розміри робочої зони та необхідність пересуватися під час виконання робіт;
- необхідність вести записи.

Якщо перелічені умови відповідають позі сидячи, то слід орієнтуватися саме на неї. Але при оснащенні такого робочого місця слід пам'ятати, що комфортне розміщення в положенні сидячи додатково досягається можливістю покласти ногу на ногу або вільному пересуванню ніг під столом.

Організацію роботи в позі "стоячи" регламентує ДСТУ 7950:2015 "Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги". Головною перевагою такої робочої пози є мобільність, збільшена досяжність та можливість виконання роботи із значним навантаженням, що відокремлює її від більш комфортної пози "сидячи".

На рис. 4.12 зображено принцип утворення робочих зон для роботи в позі "стоячи". Створення робочої зони розглядають у сагітальній та фронтальній (рис. 4.12б) площинах. Такі зони встановлюють, виходячи з антропометричних характеристик представників з контингенту потенційних користувачів

обладнанням. Радіуси обертання елементів верхньої кінцівки в сагітальній площині, що наведені на рис.4.12-а, дозволяють адекватно розташувати необхідні органи управління. Але слід пам'ятати, що зусилля, що здатна розвинути кінцівка, значно знижуються із зростанням відстані від тіла до захватної частини органа управління.



а) у сагітальній площині; б) у фронтальній площині

Рисунок 4.12 - Робочі зони для організації робіт в позі "стоячи":

Зони на фронтальній поверхні можуть бути структуровані наступним чином:

- а - межа максимальної робочої зони;
- б - межа оптимального поля зору;
- в - зона, де моторне та зорове поля співпадають;
- г - оптимальна робоча зона.

Встановлюють два принципових підходи до створення робочих місць, що різняться за характером праці в позі "стоячи". У першому випадку оператор не має нагоди довго знаходитись перед пультом управління і зупиняється біля нього на відносно короткий час. Другий підхід до створення робочого місця є характерним для випадків, коли оператор на тривалий час зупиняється біля

пульту для виконання функцій управління, а виробнича ситуація потребує від нього певного рівня уваги та зосередженості. У таких випадках доцільно проектувати пульт, що створює робоче місце для роботи стоячи із можливістю в разі необхідності набути оператором пози "сидячи".

Основним чинником, що викликає стомлення, є інтегральна екстенсивна напруженість діяльності (навантаження). Окрім абсолютної величини навантаження на мірі розвитку стомлення позначається ряд чинників, серед яких необхідно виділити наступні:

- статичний або динамічний характер навантаження;
- інтенсивність навантаження, тобто її розподіл в часі;
- постійний і ритмічний характер навантаження.

Статичне фізичне навантаження за інших рівних умов веде до більшого розвитку стомлення, ніж динамічна, причому суб'єктові відчуття втоми в цьому випадку виражене особливо виразно.

Час настання стомлення і його вираження залежать від міри інтенсивності навантаження таким чином: при збільшенні інтенсивності навантаження стомлення настає раніше, ніж при зменшенні інтенсивності навантаження.

Існує певна оптимальна інтенсивність навантаження, при якому стомлення розвивається найповільніше.

Окрім величини навантаження існує ряд додаткових або сприяючих розвитку стомлення чинників. Самі по собі вони не ведуть до розвитку стомлення, проте, поєднуючись з дією основного чинника, сприяють ранішньому і вираженому настанню стомлення. Ці чинники можна розбити на три великі групи:

- 1) мікроклімат;
- 2) використання техніки;
- 3) порушення режиму праці і відпочинку.

До першої групи відносяться: понижений вміст кисню у вдихуваному повітрі, підвищений вміст вуглекислого газу, висока температура середовища, підвищена вологість, зміна барометричного тиску і тому подібне.

Найбільшою різноманітністю характеризується друга група. Серед причин, що входять до цієї групи, слід назвати зміну складу повітря – забрудненість його різними газами (наприклад, продуктами неповного згорання палива і ін.); дія механічних сил ведучих до вібрації, трясіння, прискорень, дія електромагнітних коливань, шумів і ультразвуку, зміна освітленості, незручність робочої пози і багато що інше.

Нарешті до третьої групи відносяться чинники, пов'язані в основному з порушенням режиму праці і відпочинку: недостатність часу для відновлення сил після стомлення, неправильне використання перерв між роботою, непередбачене планування роботи і відпочинку. На розвиток стомлення сильно впливають емоційні чинники. Вираження і час настання стомлення людини, його загального і спеціального фізичного розвитку.

Серед видів стомлення слід спеціально вказати на один специфічний вигляд, що виникає за відсутності діяльності. Воно задоволене часто зустрічається в сучасному виробництві у фахівців, діяльність яких пов'язана з прийомом нерегулярний і інформації, що несподівано поступає, тобто що працюють в режимі чекання. Цей вигляд стомлення займає проміжне місце між загальним і розумовим стомленням. Відчуття втоми у цих фахівців частково обумовлене статичною робочою позою, хоча в основному визначається розвитком сенсорної напруженості.

Динаміка працездатності, динаміка стомлення є неспецифічними проявами організму, загальною реакцією на інтенсивність і екстенсивність робочої діяльності, тоді як стан специфічної напруженості залежить від структури і вмісту потоку інформації.

При вивченні емоційних реакцій розрізняють дві його форми – емоційна напруга і емоційна напруженість.

Емоційну напругу характеризує міра мобілізації функцій організму для найбільш успішного виконання тієї або іншої діяльності і пов'язано з вольовим актом, направленим на цю діяльність, тобто воно характеризує ту міру емоційних зрушень, які обумовлюють як найповніший розвиток стану адекватної мобілізації.

У тих випадках, коли настає динамічне розузгодження між об'єктивною значущістю ситуації та її суб'єктивною оцінкою і з'являються пов'язані з цим негативне зміни в рухових і психічних функціях, настає стан емоційної напруженості. При цьому спостерігається і зниження стійкості ряду психічних функцій. Момент переходу емоційної напруги в емоційну напруженість визначає так звану емоційну стійкість.

Якщо ми маємо справу з емоційною напруженістю, то тут позиція стає іншою, це стан явно несприятливий, і всі зусилля мають бути направлені на переведення цього стану в стан емоційної напруги.

Чим менше емоційна стійкість, тим швидше при менших значеннях емоційного чинника розвивається стан емоційної напруженості. Емоційна стійкість є показником, дуже тісно пов'язаним з такою властивістю особи, як рівень тривожності, вона дуже низька чи з високим рівнем тривожності.

Наступна якість – емоційна збудливість – визначає швидкість розвитку того або іншого емоційного стану, тобто це якість дуже близька до тієї, яка характеризує емоційну стійкість.

На підставі даного уявлення про суть емоційних реакцій стає ясным, що їх розвиток визначають дві групи чинників – зовнішні і внутрішні.

Зовнішні емоційні чинники. До них відносяться перш за все так звані екстремальні чинники, тобто такі, фізичні або інформаційні, характеристики які ведуть до розвитку крайньої міри напруги фізіологічних і психологічних функцій з повним вичерпанням всіх фізіологічних резервів. Чим більш виражена екстремальність чинника, тим вище вірогідність появи виражених мір емоційних зрушень. Характер цих зрушень визначається виглядом реакції, що розвивається в результаті дії. В разі формування адекватної реакції, тобто реакції, направленої чи на подолання дій чинника на підтримку необхідного рівня діяльності при продовженні дії екстремальності. Як правило, спостерігається та або інша міра емоційної напруги.

Розвиток реакції тривоги, нездатність до мобілізації функцій ведуть до появи різних мір емоційної напруженості аж до появи різко виражених негативних емоцій.

Внутрішні емоційні чинники. До цих чинників відносяться такі, як характеристики нервової діяльності, темперамент, рівень тривожності, ригідність особи, і тому подібне – вони, як правило, визначають рівень реакції. Такі чинники, як характеристика особливості пам'яті, увага, відповідальні за міру знайомства з виникаючою ситуацією і прудкість і швидкість ухвалення рішення.

Нарешті, в цю ж групу слід віднести і такі чинники, як мотиви, установки і близькі до них характеристики типу ідеалів і тому подібне. Найбільш виражений їх вплив на емоційну стійкість, яка, при позитивних мотивах може бути настільки високою, що повністю виключає появу емоційної напруженості.

Управління емоційними станами - одне із завдань ергономіки. Можна активно управляти поведінкою людини – оператора, водить ті або інші емоціогенні чинники. Наприклад, для підтримки високого рівня пильності при монотонній роботі операторів спостереження і контролю дії на емоціогенну сферу є найбільш ефективним.

4.2 Розширення технологічних можливостей верстата за рахунок застосування 4-й осі.

Поворотна вісь значно розширює можливості фрезерно-гравірувального верстата з ЧПУ, яке може надавати йому не тільки горизонтальне або вертикальне положення, але і проміжні.

Використання поворотного пристрою дозволяє фрезерувати (обробляти) циліндричні заготовки, тим самим значно розширюючи перелік виготовлених на верстаті виробів. До них відносяться фігурні колони, різьблені ніжки, шахові та інші фігурки, балясини, сувеніри та багато інших предметів.

Також з'являється можливість наносити малюнки і візерунки (в тому числі і за допомогою гравіювання складних тривимірних зображень) на криволінійні поверхні заготовок. Але при цьому поворотний шпиндель зберігає головні переваги автоматичного обладнання - точність і швидкість обробки.

Зупинимось трохи на деяких характеристиках подібних верстатів, оснащених поворотним пристроєм. Їх живлення здійснюється від звичайної електричної мережі 220 вольт. Висота порталу в залежності від товщини заготовки може варіюватися в межах 45-220 мм.

На верстатах разом з поворотною віссю може також встановлюватися: шпиндель підвищеної потужності (до 2-х кВт); вентиляцією, за допомогою якої видаляється стружка із зони різання; системою повітряного або рідинного охолодження шпинделя і поворотним механізмом (4-а вісь), який розширює функціональні можливості верстата.

Поворотний пристрій слід підключити до драйверу будь-який з координатних осей (X або Y) міні фрезерного верстата. В результаті фреза переміщається тільки по одній з координат, а в поворотному пристрої затискається заготовка. Їй надається поступальний обертання, що дозволяє при обробці отримувати конічні форми.

4.2.1 Вибір і аналіз поворотних вісей

В сучасних умовах прагнення до підвищення продуктивності праці і нарощування обсягів виробництва актуальною стає проблема скорочення часу обробки деталей, зменшення кількості переходів. На фрезерних верстатах з ЧПК - це можна забезпечити використанням поворотних осей.

Поворотні вісі в основному діляться на 3 великі класи: похилі, непохилі і глобусні, також всі вони можуть бути обладнання системою ЧПК так працювати в

ручному режимі як додаткова вісь (такі модифікації позначаються як наприклад 3+1, тобто 3 основні вісі з ЧПК та додаткова вісь з ручним налаштуванням).

Відмінною особливістю всіх поворотних столів, є те, що з їх допомогою можна обробити деталь з усіх боків за одну установку.



Рисунок 4.13– Поворотний стіл фірми HAAS

Поворотноділильні пристрої одно- і двовісний (серії TRT, TR і T5C) з діаметром планшайби від 110 до 600 мм, а також цангового виконання (HA5C) можуть встановлюватися на верстати фрезерної групи фірми HAAS як повноцінно керовані осі верстата з керуванням через систему ЧПК. Існують поворотні столи зі зменшеною габаритної довжиною (SP), багатошпиндельні, надшвидкісні (SB, SHS), високоточні (SC і FB).

Будь-який поворотний стіл HAAS може використовуватися і на обладнанні інших виробників за допомогою сервоконтролера HAAS.

Таблиця 4.1 - Основні технічні характеристики поворотного столу HAAS

Характеристика	Значення
1	2
Діаметр планшайби	160 мм
Кількість шпинделів	1
Кількість радіальних Т-пазів	6x60°

Кінець таблиці 4.1

1	2
Діаметр отвору шпинделя	38,1
Висота осі обертання	127 мм
Точність, кут. сек.	± 30
Вага столу	50 кг

Цей стіл, на порядок, є дорожчим, і це накладає свій відбиток на кінцеву вартість продукції, що виготовляється за допомогою даного столу.

Lynx4D-K - Поворотна вісь (четверта координата або четверта вісь) призначена для установки на фрезерних верстатах з ЧПК.

Таблиця 4.2 — Технічні характеристики Lynx 4D-K

Модель	Lynx 4D-K
Патрон	Токарний 100мм, 3-х кулачковий, самоцентруючий
Висота до центра	65мм
Двигун	Кроковий SM57_56_2,6A; Біполярний
Макс. робоча температура	80°
Редуктор	1:50 хвильовий, "безлюфтовий"
В комплекті	Задня бабка с центром обертання
Вага	6,5 кг
Габаритні розміри	109x211x105 (ШхДхВ)

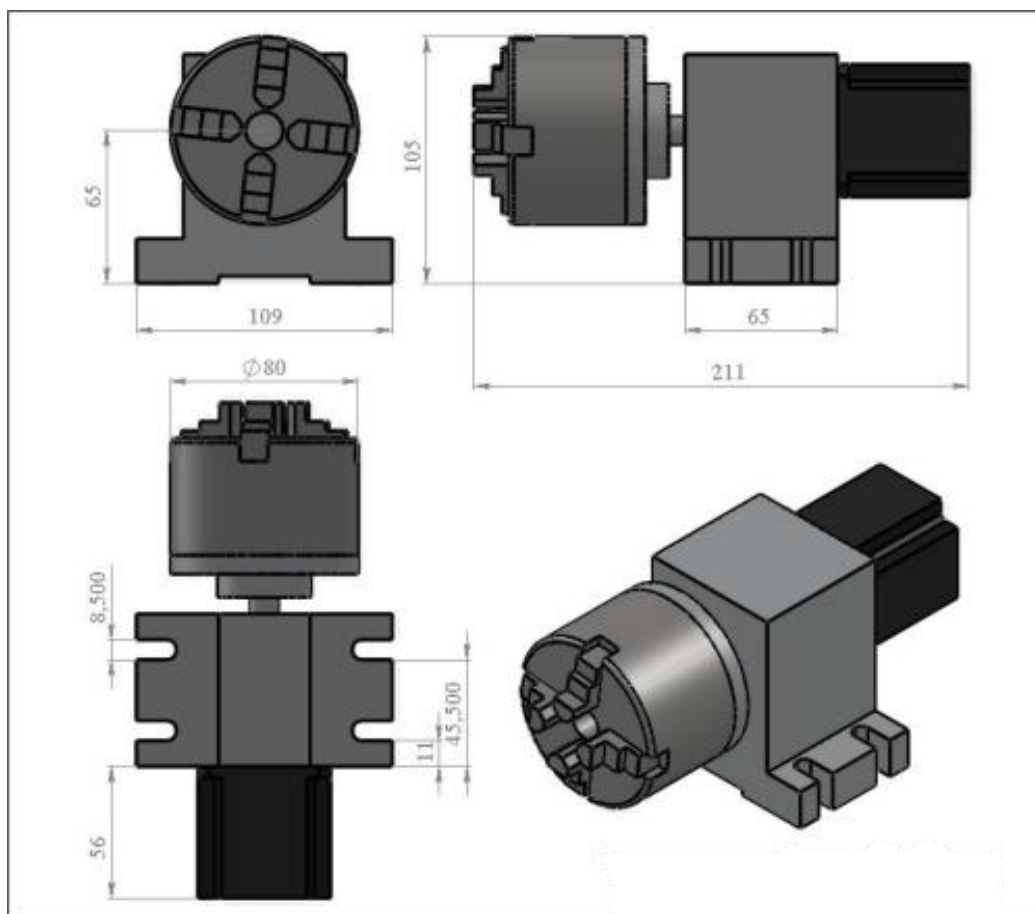


Рисунок 4.14 — Поворотна вісь «Lynx4D-K».

Вартість цієї поворотної вісі «Lynx4D-K» у порівнянні з поворотним столом фірми «HAAS» є набагато менша, та повністю задовольняє умови для встановлення на верстат. Тому обирається поворотна вісь «Lynx4D-K».

4.2.2 Створення 3D моделі осі

Для того щоб створити комп'ютерну модель вісі необхідно створити кожну деталь окремо, а потім створити складальний документ та скласти 3D модель поворотної вісі та додати до комп'ютерної моделі верстата.

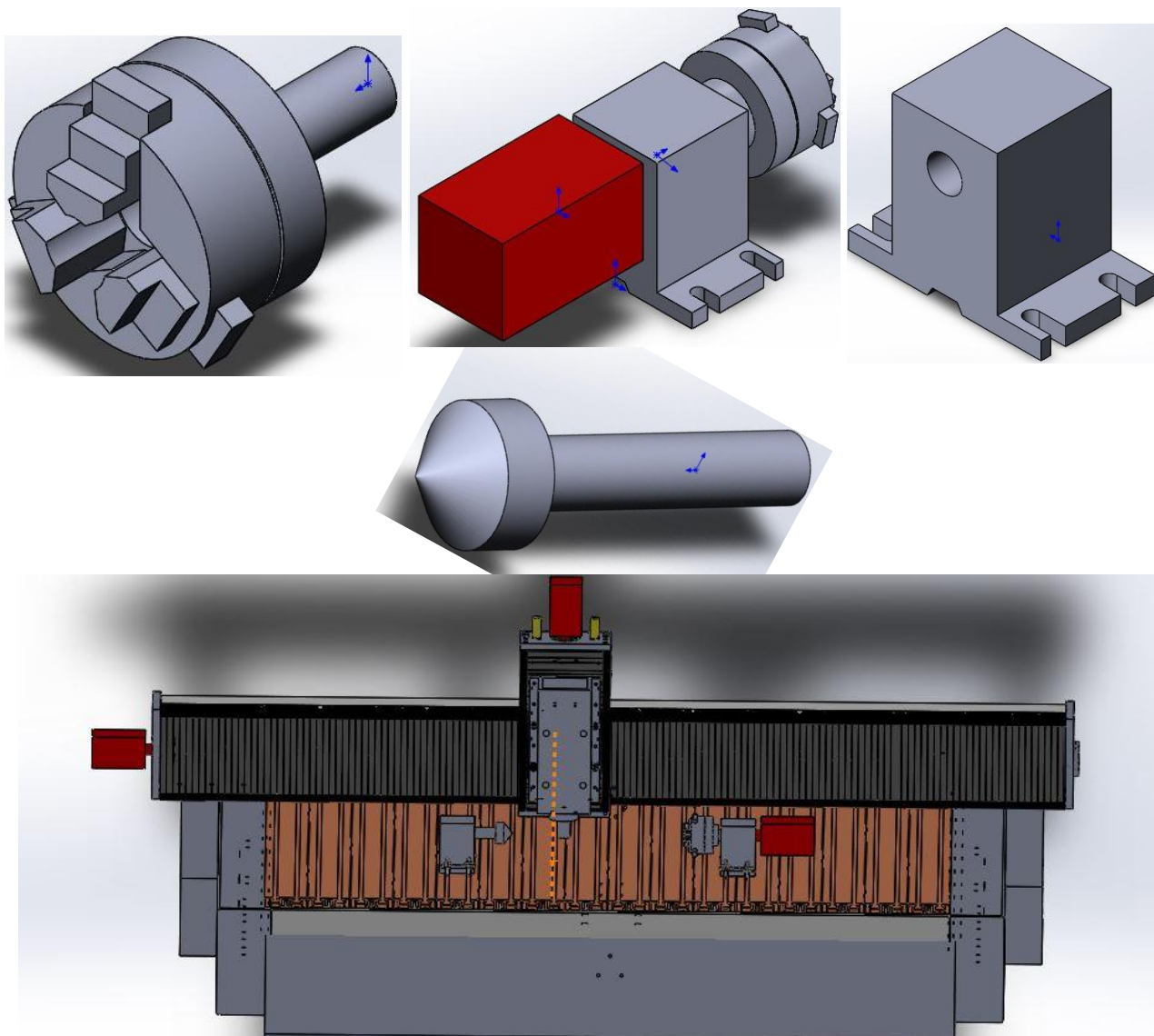


Рисунок 4.15 — 3D модель поворотної осі

4.3 Вибір кульково-гвинтової передачі для осі Y

Гвинтові передачі кочення є одним з основних видів тягових пристроїв металорізальних верстатів, для верстатів з ЧПК практично основний вид тягового пристрою. Вони застосовуються в приводах подач та координатних переміщень верстатів.

Кулькова гвинтова передача (рис. 4.16) складається з гвинта, гайки, комплекту кульок та каналу повернення, який забезпечує циркуляцію кульок. Канал повернення з'єднує перший та останній або проміжний витки гайки.

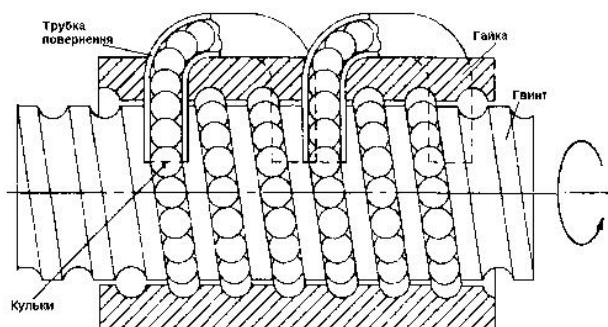


Рисунок 4.16 – Схеми кулькової гвинтової передачі.

При виборі кульково-гвинтової передачі потрібно враховувати наступні робочі параметри:

- напрямок руху (вертикальний горизонтальний);
- маса органу який переміщується;
- спосіб переміщення (кочення, ковзання);
- коефіцієнт тертя поверхонь напрямних;
- супротив тертю поверхні напрямних;
- зовнішнє навантаження в осьовому напрямку;
- очікуваний строк служби;
- довжина ходу;
- робоча швидкість;
- прискорення;
- точність позиціонування;
- повторюваність точності позиціонування;
- хвилина величина подачі;
- тип електродвигуна приводу подач;
- номінальна частота обертання електродвигуна;
- момент інерції двигуна;
- роздільна здатність електродвигуна;
- передавальне відношення приводу.

Кулькові гвинтові передачі виконуються без попереднього натягу та з попереднім натягом. В металорізальних верстатах використовуються передачі з

попереднім натягом, що забезпечує високу точність робочих ходів та встановлювальних переміщень. Попередній натяг в кульковій гвинтовій передачі – це попередньо прикладене навантаження між тілами кочення та профілями канавок гвинта та гайки. Для металорізальних верстатів, що працюють на середніх та високих швидкостях величину попереднього натягу доцільно вибирати в межах (3,5 – 7,5)% від допустимого динамічного навантаження.

На рис. 4.17 показано криві пружного зміщення в кульково-гвинтовій передачі з попереднім натягом та без нього.

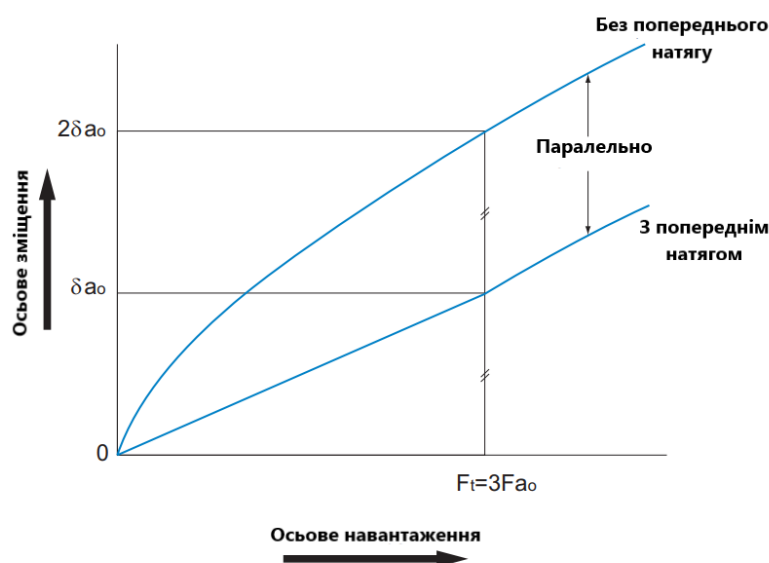


Рисунок 4.17 - Крива пружного зміщення в кульково-гвинтовій передачі

Конструктивно кульковий гвинтовий привід багатоцільового верстата складається з приводного електродвигуна, який через безззорну муфту з високою крутильною жорсткістю передає рух на гвинт кулькової передачі. Корпус гайки закріплений на виконавчому органі верстата, що здійснює поступальний рух. На корпусі передньої опори та задньої опори закріплені демпфуючі упори. В залежності від призначення гвинтової передачі, прикладеного навантаження, вимог до швидкохідності можливі декілька варіантів встановлення ходового гвинта в опорах:

- передня опора сприймає радіальне та осьове навантаження, а задній

кінець гвинта вільний;

- передня опора сприймає радіальне та осьове навантаження, а задня опора тільки радіальне;

- передня і задня опори сприймають радіальне та осьове навантаження.

Схема встановлення гвинта в опорах впливає на подовжню стійкість (вигин) кулькового ходового гвинта та критичну частоту обертання ходового гвинта. Варіант встановлення ходового гвинта з вільним кінцем забезпечує найменшу подовжню стійкість та критичну частоту обертання. Найвищі показники цих параметрів забезпечуються в разі осьової та радіальної фіксації обох опор ходового гвинта. Встановлення ходового гвинта з плаваючою задньою опорою має нижчі показники подовжньої сталості та критичну частоту обертання, але конструктивно простіше. Підшипники задньої опори можуть вільно рухатися в осьовому напрямку в корпусі опори внаслідок нагріву та температурних деформацій гвинта.

В конструкції гвинтових передач з осьовою фіксацією в обох опорах застосовується попереднє навантаження ходового гвинта. Гвинт в процесі монтажу піддається розтягу. Передня опора жорстко фіксується, а до зовнішнього кільця підшипників задньої опори прикладається навантаження кришкою через пружини та упорну шайбу.

В процесі роботи внаслідок температурних деформацій гвинта внутрішні кільця підшипників зсуваються разом з цапфою гвинта, розкриваючи підшипники. Пружини ж, діючи на зовнішні кільця, вберігають підшипники від розкриття і забезпечують збереження попереднього натягу в підшипнику на визначеному рівні.

Схема проводу з вільним кінцем вала проста в виготовленні та експлуатації і має невисоку вартість. З ускладненням конструкції приводу ускладняється її складання та експлуатація і зростає вартість.

Розрахунок проводимо для можливої подальшої заміни наявної на верстаті КГП. Параметри нової передачі такі як: крок, кут нахилу, довжина ходу, схема встановлення, будуть підібрані відповідно до наявної передачі.

Початок розрахунку для вибору КГП слід починати з визначення осьового навантаження на ходовий гвинт для найбільш навантаженого режиму. Такими режимами є, як правило, розгін та гальмування. Осьове навантаження на гвинт при розгоні визначається за формулою:

$$F_{al} = \mu \cdot m \cdot g + m \cdot g \cdot \cos \delta + f + m \cdot a, \text{ Н} \quad (4.1)$$

де $m = 150$ – маса переміщуваного об'єкту, кг;
 $\mu = 0,02$ - коефіцієнт тертя направляючими поверхнями;
 $\delta = 0^\circ$ – кут нахилу прямої стосовно вертикалі;
 $f = 150$ – опір поверхні (без навантаження), Н;
 $a = 5$ прискорення, м/с.

$$F_{al} = 0,02 \cdot 150 \cdot 9,8 + 150 \cdot 9,8 \cdot \cos 0 + 150 + 150 \cdot 5 = 2400 \text{ Н}$$

Розрахунок проведемо для кульково-гвинтової передачі фірми ТНК моделі EBC 2505-3. Характеристики передачі занесені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Характеристики передачі EBC 2505-3

Назва характеристики	Значення
Зовнішній діаметр гвинта	25 мм
Крок	5 мм
Діаметр кульки	3,175 мм
Внутрішній діаметр гвинта	22,1 мм
C_a	12,1 кН
C_{oa}	22,6 кН
Жорсткість	250 Н/мкм
Зовнішній діаметр гайки	40 мм
Довжина гайки	50 мм

В якості опори обираємо BK20 BALL SCREW SUPPORT UNIT компанії SYK.

Обираємо довжину гвинта яка розраховується за формулою:

$$L_{\text{гв}} = l_x + l_z + l_n, \quad (4.2)$$

де $l_x = 1000$ – величина ходу виконавчого органу, мм;

$l_z = 50$ – довжина гайки, мм;

$l_n = 35$ – довжина опори, мм.

$$L_{\text{гв}} = 1000 + 50 + 35 = 1085 \text{ мм}$$

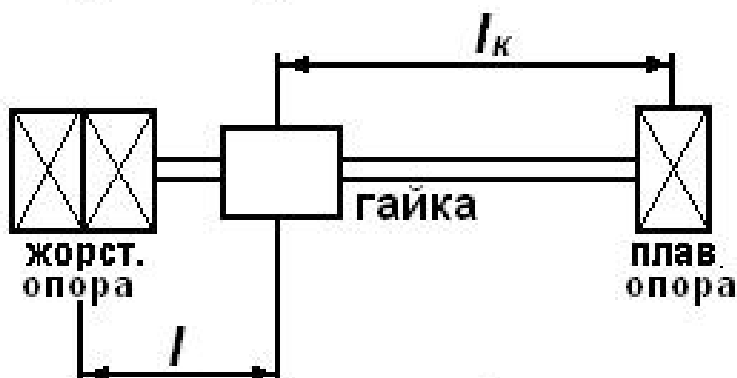


Рисунок 4.18 — Схема встановлення та закріплення гвинта КГП

Граничне осьове навантаження P , H з погляду подовжньої сталості визначається за формулою:

$$P = m \cdot \frac{d_r^4}{l^2} \cdot 10^4 \quad (4.3)$$

де $d_r = 22.1$ – діаметр западини профілю ходового гвинта, мм;

$l = 1042.5$ – вільна довжина (довжина гвинта, що піддається розтягу – стисканню), мм;

$m = 10$ – коефіцієнти, що залежать від способу установлення та закріплення ходового гвинта.

$$P = 10 \cdot \frac{22.1^4}{1042.5^2} \cdot 10^4 = 21950 \text{ Н}$$

В ходових гвинтах з малою вільною довжиною подовжні коливання не виникають, але може бути необхідно перевірити напруження розтягу-стискання від навантаження, що діє в осьовому напрямку, яке визначається за формулою:

$$P = 1,15 \cdot d^2 \cdot 10^2 \quad (4.4)$$

де d – зовнішній діаметр ходового гвинта.

$$P = 1,15 \cdot 25^2 \cdot 10^2 = 82656 \text{ Н}$$

Прикладання надмірно великих осьових навантажень зумовлює деформації кульок та пошкодження поверхонь кочення. Ці пошкодження не усуваються повністю до початкової форми після зняття навантаження. Граничні осьові навантаження, що лімітуються такими деформаціями визначаються за формулою:

$$P_0 = \frac{C_{0a}}{f_s} \quad (4.5)$$

де $C_{0a} = 22600$ – статична вантажопідйомність, Н;

$f_s = 2$ – коефіцієнт статично допустимого навантаження.

$$P_0 = \frac{22600}{2} = 11300 \text{ Н}$$

Допустима частота обертання ходового гвинта визначається за двома факторами:

- критичною частотою обертання, яка обмежується резонансом вібрацій ходового гвинта;

- граничним значенням dn , яке спричиняє пошкодження елементів пристрою циркуляції кульок. Тут d – діаметр ходового гвинта, n – частота обертання гвинта.

Критичну частоту визначають з узгодження частоти обертання ходового гвинта та його власної частоти коливань.

Виходячи з цього допустима частота обертання n_k , хв^{-1} ходового гвинта визначається за формулою:

$$n_k = f \cdot \frac{d_r}{l_k^2} \cdot 10^7 \quad (4.6)$$

де $l_k = 1042,5$ – вільна довжина гвинта, або відстань між двома підтримуючими опорами, мм;

f – коефіцієнт, що визначається з умов встановлення ходового гвинта.

$$n_k = 15,1 \cdot \frac{22,1}{1042,5^2} \cdot 10^7 = 3070 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Частота обертання передачі при максимальній швидкості переміщення вузла, $V_{\max}=7.2$ м/хв.

$$n = \frac{1000 \cdot V_{\max}}{p \cdot 1} \quad (4.7)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 7,2}{5 \cdot 1} = 1440 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Параметр $dn=1440 \cdot 25=36000$

Параметр dn обраної кульково-гвинтової передачі: $dn=100000$.

Отже розрахована передача відповідає необхідним характеристикам та може бути використана для модернізації верстата.

ВИСНОВКИ

В ході роботи було зроблено наступні висновки:

- визначено основні напрямку розвитку технології сучасного розумного виробництва;
- проаналізовано значущість цифрових технології на розвиток розумного виробництва;
- систематизовано методи створення цифрових двійників верстатів.
- в якості методу створення моделі верстату було вирішено обрати метод прямих вимірювань вузлів та деталей верстату, через його нескладну конструкції та простоту проведення вимірювань.
- в якості програмного забезпечення для створення моделі верстату вирішено обрати CAD систему SolidWorks.
- створено електрону модель верстату яка повністю відповідає реальному верстату та може буде в подальшому використана як основа для цифрового двійника.
- розглянуто основні ергономічні показники верстатів.
- в якості можливої подальшої модернізації та розширення технологічних можливостей верстату запропоновано поворотну вісь Lynx4D-K та проведено розрахунок для кульково-гвинтової передачі.
- для обраної поворотної осі також розроблено електрона модель яку було додано до основної моделі верстата.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication / M. Grieves // White paper. – 2014. – № 1. – Pp. 1-7.
2. Uhlemann T.H.-J. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 / Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Ed. by S. Takata, Y. Umeda, S. Kondoh. – Pp. 335-340. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
3. Fei Tao. Digital Twin Driven Smart Manufacturing / Fei Tao, Meng Zhang and A.Y.C. Nee. – Academic Press, London, United Kingdom, 2019. – 269 p.
4. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review / Leng, Jiewu & Wang, Dewen & Shen, Weiming & Li, Xinyu & Liu, Qiang & Chen, Xin // Journal of Manufacturing Systems. – Vol. 60. – Pp.119-137.
5. Micouin P. Model-based systems engineering: Fundamentals and methods / Patrice Micouin. – London : ISTE Ltd, 2014. – 272 p.
6. Бушуев, В. В. Практика конструирования машин / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
7. ТНК. Кульково-гвинтова передача. – ТНК Ltd., 2015. – 490 с.
8. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Кенио Т. ; [пер. с англ.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.
9. ДСТУ 7299:2013. Робоче місце оператора, взаємне розташування елементів робочого місця. [Чинний від 14-10-2014]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ, 2013 р.
10. ДСТУ 7252:2011. Зал та кабіни операторів. Взаємне розташування робочих місць. [Чинний від 10-02-2011]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ, 2011 р.

11. ДСТУ 7234:2011. Обладнання виробниче. Загальні вимоги дизайну та ергономіки. [Чинний від 01-08-2011]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ, 2011 р.
12. ДСТУ 7950:2015. Робоче місце під час виконання робіт стоячи. Загальні ергономічні вимоги. [Чинний від 01-09-2016]. Вид. офіц. Київ : Український науково-дослідний інститут дизайну та ергономіки НАУ, 2015 р.
13. Обладнання для новітніх технологій [Текст]: навчальний посібник / В.В. Солоха, Л.Й. Івченко, І.А. Бойко, В.Ю. Коцюба, В.Л. Карнаух. – Запоріжжя: ПАТ «Мотор Січ», 2020. – 210 с.
14. Ловыгин А.А. Современные станки с ЧПУ и CAD/CAM системы / А.А. Ловыгин, А.В. Васильев, С.Ю. Кривцов. – М. : Эльф ИПР, 2006, - 286 с.
15. Доля В.М. Програмування, введення та відпрацювання управляючих програм для верстатів з ЧПУ та РТК: Навчальний посібник. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2004. – 169с.
16. Й. Й. Білинський і С. М. Животівський, “Огляд методів 3D-контролю геометричних розмірів деталей”, Вісник ВПІ, вип. 2, с. 114–122, Квіт. 2022.