

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення конструкції та дослідження жорсткості стола
вертикально-фрезерного верстата для обробки деталей середнього
типорозміру

Виконав: студент VI курсу, групи МВм-61
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Івасечко М.Ю. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Гагалюк А.В. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Кобельник В.Р. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Крупа В.В. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Крупа В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«___» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістра
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Івасечку Максиму Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення конструкції та дослідження жорсткості стола вертикально-фрезерного верстата для обробки деталей середнього типорозміру

Керівник роботи старший викладач кафедри ВІ, ГАГАЛЮК Андрій Валерійович, к.т.н
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «15» серпня 2025 року № 4/7-756.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Документація на верстат Haas VF-1

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ, 1. Аналітичний розділ. 2. Проєктний розділ. 3. Дослідний розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки. Перелік посилань

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Тема і мета дослідження – 1фА1, Інформаційно-патентний пошук – фА1,

Проєктний розділ – фА1, Дослідний розділ – фА1

Загальні висновки – 1фА1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Сеник А.А., к.т.н., ст. викл. каф. ВІ</i>		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>Теслюк В.М., в.о.проректора з АГРБ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Кобельник В.Р., к.т.н., доц. каф. ВІ</i>		

7. Дата видачі завдання *18 серпня 2025 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ, Аналітичний розділ</i>	<i>01.09.2025 р.</i>	
2	<i>Дослідно-проектний розділ</i>	<i>27.11.2025 р.</i>	
3	<i>Науково-дослідна частина</i>	<i>4.12.2025 р.</i>	
4	<i>Охорона праці</i>	<i>7.12.2025 р.</i>	
5	<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	<i>7.12.2025 р.</i>	
6	<i>Загальні висновки</i>	<i>11.12.2025 р.</i>	
7	<i>Перелік посилань</i>	<i>15.12.2025 р.</i>	

Студент

(підпис)

Івасечко М.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Гагалюк А.В.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	12
1.1 Огляд та аналіз проблематики	12
1.2 Інформаційно-патентний огляд	15
1.2.1 Огляд конструкцій та компонування фрезерних верстатів	15
1.2.2 Огляд наукових статей за тематикою роботи	20
1.3 Висновки по розділу	33
2 ПРОЄКТНИЙ РОЗДІЛ.....	35
2.1 Аналіз компоновки фрезерного верстата Haas VF-1	35
2.2 Силкові та міцнісні розрахунки станини	39
2.3 Розрахунок колони	45
2.4 Розрахунок безступеневого приводу	47
3 ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	52
3.1 Методика та план проведення досліджень	52
3.2 Дослідження 3D моделі несучої системи верстата Haas VF-1	53
3.3 Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках)	57
3.4 Висновки за результатами дослідження	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	59
4.1 Охорона праці під час виконання робіт на фрезерних верстатах	59
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	74
ДОДАТКИ.....	78

АНОТАЦІЯ

Івасечко М.Ю. Удосконалення конструкції та дослідження жорсткості стола вертикально-фрезерного верстата для обробки деталей середнього типорозміру. 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2025 р.

Мета і завдання магістерської роботи. Метою роботи є удосконалення конструкції стола вертикально-фрезерного верстата та покращення його жорсткості. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати існуючі конструкції столів фрезерних верстатів
- проаналізувати методику розрахунку жорсткості фрезерних верстатів;
- побудувати 3D-модель стола вертикально-фрезерного верстата;
- виконати комп'ютерне моделювання дії силових факторів, що впливають на жорсткість стола;
- виконати аналітичний розрахунок;
- порівняти результати відхилень колони фрезерного верстату отриманого МСЕ з аналітичними розрахунками.

Об'єкт дослідження – стіл вертикально-фрезерного верстату.

Предмет дослідження – прогин стола в крайніх положеннях.

Загальні висновки

1. Встановлено, що класифікація деталей за масою та габаритними розмірами є визначальним чинником під час вибору металообробного обладнання. Застосування чотирирівневої системи типорозмірів дозволяє обґрунтовано визначати тип верстата, конструкцію та розміри стола, спосіб базування і закріплення заготовок, а також необхідність використання підйомно-транспортних засобів.
2. Обґрунтовано, що конструкція та геометричні розміри стола фрезерного верстата істотно впливають на його експлуатаційні характеристики. Саме стіл сприймає основні навантаження від маси заготовки, сил різання та інерційних впливів, унаслідок чого його жорсткість є однією з ключових

складових загальної жорсткості верстата.

3. Показано, що жорсткість верстата безпосередньо визначає допустимі режими різання, стабільність процесу фрезерування, точність обробки та якість поверхонь. Повна жорсткість формується як результат взаємодії жорсткостей станини, столу, напрямних, шпиндельного вузла та контактних елементів конструкції.
4. Встановлено, що для фрезерних верстатів найбільш критичною є жорсткість на згин, яка суттєво зменшується зі збільшенням довжини конструктивних елементів. Це зумовлює необхідність оптимізації форм поперечних перерізів силових елементів, зокрема шляхом застосування коробчастих, рамних і ребристих конструкцій.
5. Доведено, що матеріал силових елементів істотно впливає на жорсткість і стабільність конструкції. Результати чисельних та експериментальних досліджень свідчать про доцільність використання сірого чавуну для виготовлення столів фрезерних верстатів з ЧПК завдяки його високим демпфуючим властивостям та достатній жорсткості.
6. Аналіз експериментальних досліджень динаміки руху столу показав, що параметри швидкості, прискорення та гальмування істотно впливають на точність позиціонування і повторюваність. Найбільші нестабільності спостерігаються на малих швидкостях подачі внаслідок явищ заїдання та ковзання, тоді як зі зростанням швидкості рух стає більш стабільним.
7. Встановлено, що сучасні методи контролю технічного стану верстатів, зокрема ballbar-випробування, лазерна інтерферометрія та застосування LVDT-датчиків, забезпечують комплексну оцінку геометричних, кінематичних і жорсткісних характеристик верстатів без необхідності їх розбирання.
8. За результатами аналізу наукових публікацій підтверджено актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення жорсткості та точності столів фрезерних верстатів з ЧПК, оскільки саме стіл є одним із найбільш навантажених і водночас чутливих до деформацій вузлів

технологічної машини.

Ключові слова: стіл фрезерного верстата, верстат, метод скінчених елементів, жорсткість, деформація.

Ivasechko M.Yu. Improvement of the design and study of the stiffness of the table of a vertical milling machine for machining medium-sized parts. 133 – Branch Mechanical Engineering; Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University; Ternopil, 2025

Goal and objectives of the master's thesis. The aim of the work is to improve the design of the table of a vertical milling machine and improve its rigidity. To achieve this goal, it is necessary to perform the following tasks:

- analyze existing designs of milling machine tables
- analyze the method of calculating the rigidity of milling machines;
- build a 3D model of the table of a vertical milling machine;
- perform computer modeling of the action of force factors that affect the rigidity of the table;
- perform analytical calculation;
- compare the results of the deviations of the column of the milling machine obtained by the MSE with analytical calculations.

The **object** of the study is the table of a vertical milling machine.

The **subject** of the study is the deflection of the table in extreme positions.

General conclusions

1. It has been established that the classification of parts by mass and overall dimensions is a determining factor when choosing metalworking equipment. The use of a four-level system of standard sizes allows for a reasonable determination of the type of machine, the design and dimensions of the table, the method of basing and securing the workpieces, as well as the need to use lifting and transport equipment.

2. It has been substantiated that the design and geometric dimensions of the table of a milling machine significantly affect its operational characteristics. It is the table that perceives the main loads from the mass of the workpiece, cutting forces and inertial

influences, as a result of which its rigidity is one of the key components of the overall rigidity of the machine.

3. It has been shown that the rigidity of the machine directly determines the permissible cutting modes, the stability of the milling process, the accuracy of processing and the quality of surfaces. The total rigidity is formed as a result of the interaction of the rigidity of the bed, table, guides, spindle assembly and contact elements of the structure.

4. It has been established that for milling machines the most critical is the bending rigidity, which significantly decreases with increasing length of the structural elements. This necessitates the optimization of the cross-sectional shapes of the power elements, in particular by using box, frame and ribbed structures.

5. It has been proven that the material of the power elements significantly affects the rigidity and stability of the structure. The results of numerical and experimental studies indicate the feasibility of using gray cast iron for the manufacture of tables of CNC milling machines due to its high damping properties and sufficient rigidity.

6. Analysis of experimental studies of the dynamics of table motion showed that the parameters of speed, acceleration and braking significantly affect the positioning accuracy and repeatability. The greatest instabilities are observed at low feed rates due to the phenomena of sticking and slipping, while with increasing speed the movement becomes more stable.

7. It has been established that modern methods of monitoring the technical condition of machine tools, in particular ballbar testing, laser interferometry and the use of LVDT sensors, provide a comprehensive assessment of the geometric, kinematic and stiffness characteristics of machine tools without the need to disassemble them.

8. The results of the analysis of scientific publications confirmed the relevance of further research aimed at increasing the stiffness and accuracy of CNC milling machine tables, since the table is one of the most loaded and at the same time sensitive to deformations of the technological machine components.

Keywords: milling machine table, machine tool, finite element method, stiffness, deformation.

ВСТУП

Актуальність теми. У механообробній промисловості спостерігається зростання попиту на використання багатоосьових обробних центрів. Значну кількість верстатів складають китайські аналоги, попит на які зумовлений низькою ціною. Попри використання комплектуючих прийнятої якості, загальна якість та надійність, на жаль, не відповідають світовим брендам. Враховуючи такий стан, проведення діагностичних тестів фрезерних верстатів з ЧПК, що використовуються в даний час, набули важливості.

Ринок верстатів став основою промислового виробництва в таких секторах економіки, як автомобільна, аерокосмічна та машинобудівна промисловість. Сучасні фрезерні верстати давно виходять за межі класичної класифікації, тому їх можна віднести до обробних центрів. Їх частка складає біля (23 – 30) %. За даними відкритих джерел [1-3] ринок металообробного обладнання стрімко зростає. У світі експлуатується понад 82 млн. промислових машин, причому понад 31% виробничого обладнання безпосередньо залежить від передових верстатів. Ринок розширився завдяки автоматизації та цифровізації, причому понад 66% виробників інтегрують технології ЧПК (числового програмного керування). Приблизно 43% світових виробничих потужностей перейшли на багатоосьові системи для підвищення точності та продуктивності. Крім того, 52% виробників повідомляють про помітне скорочення простоїв виробництва завдяки автоматизованим рішенням для обробки та цифровому моніторингу інструментів. За даними [2] частка ринку верстатів з 2025 р. до 2030 р. зросте з 108, 47 млрд \$ до 127, 66 млрд \$, а за прогнозами [3] частка вироблених верстатів у грошовому еквіваленті зросте з 129, 6 млрд \$ у 2025 р. до 227,4 млрд \$ у 2034 р. із середньорічним темпом зростання 5,38%. Фрезерні верстати у ЄС займають (25-30)% власного ринку і 13% світового, а у Китаї майже 70% власного і 31% світового ринків. Ще Японія займає 13% світового ринку [4]. Китай, за прогнозами [3] до 2030 р. планує ще збільшувати частку світового ринку на 7% щороку.

Фрезерні верстати у своєму основному компонуванні використовують столи

різноманітних конструкцій, а наведена статистика лише підтверджує актуальність теми та цього магістерського дослідження. Будь-яке покращення точності та збільшення жорсткості фрезерних верстатів матиме величезний вплив на сегмент сучасного машинобудування.

Мета і завдання магістерської роботи. Метою роботи є удосконалення конструкції стола вертикально-фрезерного верстата та покращення його жорсткості. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

- проаналізувати існуючі конструкції столів фрезерних верстатів
- проаналізувати методику розрахунку жорсткості фрезерних верстатів;
- побудувати 3D-модель стола вертикально-фрезерного верстата;
- виконати комп'ютерне моделювання дії силових факторів, що впливають на жорсткість стола;
- виконати аналітичний розрахунок;
- порівняти результати відхилень колони фрезерного верстату отриманого МСЕ з аналітичними розрахунками.

Об'єкт дослідження – стіл вертикально-фрезерного верстату.

Предмет дослідження – прогин стола в крайніх положеннях.

Методи дослідження. Виконання теоретичних досліджень базується на методах математичного та комп'ютерного моделювання з використанням сучасних САПР, теоретичних основ теорії різання металів, а також на основі інженерної творчості та раціональних технічних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути використані під час вибору, проектування та модернізації фрезерних верстатів і обробних центрів з ЧПК. Отримані положення щодо впливу маси та габаритів заготовок на конструкцію столу доцільно застосовувати при розробленні технологічних процесів і обґрунтуванні вибору обладнання.

Встановлені закономірності формування жорсткості столу дозволяють підвищити точність фрезерної обробки за рахунок раціонального вибору матеріалів і геометричних параметрів силових елементів. Побудована 3D-модель

може використовуватися для чисельної оцінки напружено-деформованого стану столу на етапі проєктування. Результати дослідження динаміки руху столу доцільно застосовувати при налаштуванні режимів подачі та систем керування, а також у практиці технічного діагностування і навчальному процесі з машинобудування.

Особистий внесок. Робота повністю виконана здобувачем.

Апробація результатів роботи. Результати роботи опубліковано на XIV Міжнародна науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» 11 – 12 грудня 2025 року [].

Публікації. Результати роботи опубліковані в тезах «Аналіз досліджень динаміки та точності переміщення столів фрезерних верстатів»:

А.В. Гагалюк, В.С. Івасечко. Аналіз досліджень динаміки та точності переміщення столів фрезерних верстатів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 18-82

Структура роботи. Кваліфікаційна робота магістра містить вступ, 4 розділи: аналітичний, проєктний і дослідний розділи, а також розділ з охорони праці та безпеки життєдіяльності, загальні висновки, перелік посилань, наявність додатків). Обсяг основної частини дослідження (від першої сторінки до закінчення висновків) - _____ сторінок, кількість листів графічної частини - _____ ф. А1. Список літератури містить 26 використаних джерел.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Огляд та аналіз проблематики

У машинобудуванні розмірну групу деталей зазвичай класифікують за масою заготовки або масою виробу тобто готової деталі. Найбільш поширена класифікація, що використовується у виробничих стандартах передбачає чотири типорозміри деталей. Виходячи із цього підбирають обладнання для забезпечення технологічного процесу(табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Класифікація типорозмірів деталей

№ з/п	Типорозмір деталей	Вага деталей або об'єм	Приклади	Металообробне обладнання
1	малі	до 1 кг 0,1 дм ³	шайби, дрібні валики, штифти, кришки малої товщини, однотипні деталі масового виробництва	токарні автомати і напівавтомати
2	середні	1 – 10 кг 10 дм ³	вали, невеликі шестерні, фланці, корпусні деталі невеликого розміру	універсальні верстати, верстати з ЧПК
3	великі	10 – 200 кг до 0,2 м ³	Корпуси редукторів, невеликі станини, рами	обробні центри; агрегатні верстати
4	важкі	m > 200 кг V>0,2 м ³	Станини, валки тощо	важкі спеціалізовані верстати

Примітка. Деталі і заготовки вагою більше 16 кг повинні транспортуватися із використанням підйомно-транспортних механізмів [15].*

Столи фрезерних верстатів проєктують виходячи із ваги та габаритів оброблюваних деталей, а також можливості безпомилкового базування та закріплення заготовки. Тому саме розміри стола є однією із основних характеристик фрезерних верстатів.

Фрезерні верстати з ЧПК об'єднали в собі експлуатаційні якості багатьох

верстатів звичайного виконання, при менших розмірах і збереженні високої жорсткості.

Жорсткість конструкції визначає допустимі режими різання, що є першопричиною ефективності технологічного процесу. Жорсткість – це здатність протидіяти силам, які створюють деформацію елемента конструкції (або всієї конструкції) на задану величину. При оцінюванні жорсткості потрібні норми жорсткості, по яких можна було б оцінити жорсткість конструкції загалом. Для більшості верстатів необхідна норма жорсткості, визначається кубічним коренем основного розміру верстата, а для токарних верстатів норма жорсткості визначається кубічним коренем з максимально оброблюваного діаметра.

Для верстатів, що працюють багатолезовим інструментом, або абразивним інструментом, норма жорсткості визначається кубічним коренем із квадрата основного розміру верстата, тобто ступенем $2/3$. Для фрезерних верстатів норма жорсткості визначається шириною стола в степені $2/3$.

Слід зазначити, що норма жорсткості береться для повної жорсткості верстата. Повна жорсткість завжди менша, ніж жорсткість окремого елемента верстата адже вона складається із жорсткості станини, жорсткості шпинделя, жорсткості регулюючих елементів, типу планок і клинів для верстатів з напрямними ковзання, або жорсткості кареток (тіл кочення) для верстатів з напрямними кочення.

Тому, жорсткість усіх складових верстата повинна бути значно вищою за необхідну повну норму жорсткості.

Жорсткість силових елементів. У якості несучих силових елементів верстатів, які прийнято називати станинами, стійками (вертикальні станини) і основами, використовуються балки, коробчасті, рамні форми, іноді ферми.

Для оцінювання жорсткості конструкції враховують дію, на яку працює та чи інша конструкція, адже є 3 типи жорсткості:

- жорсткість на стиск / розтяг;
- жорсткість на згин;
- жорсткість на кручення (зсув).

Жорсткість на стиск / розтяг дуже висока у порівнянні з іншими видами деформацій, наприклад розтягу стержнів. До того ж ця жорсткість лінійно залежить від визначаючих її параметрів. Жорсткість на згин дуже мінлива, тому що має обернено кубічну залежність від довжини елемента. Жорсткість на кручення лінійно залежить від довжини елемента працюючого на кручення.

Друге – жорсткість визначається модулем пружності деформованого матеріалу, який прийнято називати модулем Юнга першого роду.

Найвища жорсткість у сталевих деталей. Жорсткість визначається формою й розміром поперечного січення деталі й видом деформації. Наприклад, при деформації на згин, форма П – подібного січення може не сильно поступатися прямокутному суцільному брусу. Жорсткість залежить від розмірів поперечного перерізу й від довжини. Від довжини залежність обернено кубічна, тобто жорсткість на згин, падає кубічно при збільшенні довжини деталі. При збільшенні довжини станини токарного верстата у 2 рази, при тих самих розмірах січення, то жорсткість такої станини на зменшиться у 8 разів. Проте, жорсткість різко залежить від розмірів січення елемента – у четвертому ступені. Якщо збільшити розміри січення станини токарного верстата 2 рази, то жорсткість станини виросте в 16 разів. По цьому, варіюючи розміром січення, можна завжди компенсувати втрату жорсткості через збільшення довжини.

Зустрічаються праці, які доводять актуальність даних досліджень. Наприклад один з авторів звертає увагу на проблему якості зубофрезерування, особливо якості зубчастої поверхні після обробки, яка є однією з ключових проблем, що затримує підвищення продуктивності зубообробки у зв'язку з фізичною природою зубофрезерування, що має ті самі вихідні обмеження, що і фрезерування, тобто переривчастість процесу різання.

У якості дослідного зразка планується використовуватись 3D-модель вертикально-фрезерного обробного центра з ЧПК моделі Haas VF-1. Згідно встановленої класифікації цей верстат відноситься до універсальних фрезерних верстатів.

1.2 Інформаційно-патентний огляд

1.2.1 Огляд конструкцій та компонування фрезерних верстатів

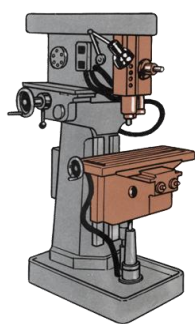
Згідно усталеної класифікації, розробленої ще в часи совєцької окупації, фрезерні верстати відносять до 6 групи металообробного обладнання, яка містить наступні підтипи фрезерних верстатів:

- вертикально-консольні – 1;
- неперервної дії – 2;
- копіювальні та гравіювальні – 4;
- Вертикально-безконсольні – 5;
- Поздовжні – 6;
- Консольні широкоуніверсальні – 7;
- Горизонтальні консольні – 8;
- Різні фрезерні – 9.

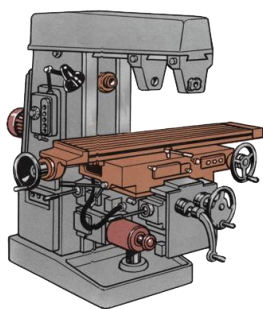
Як видно із рис.1.1, а-г верстати є консольними, тобто із підйомним столом по координаті Z, незалежно від розташування шпинделя. Широкоуніверсальний верстат від горизонтально-фрезерного відрізняється наявністю шпиндельної голови, що значно розширює його технологічні можливості. А консольно-вертикально фрезерний верстат (рис.1.1, г) від попереднього на рис.1.1, в відрізняється формою колони і поворотною шпиндельною бабкою. У найбільш поширених верстатів таких типів, як 6Н11, 6Н81, 6Н81А, 6Н81Г, 6Р11, 6Р81, 6Р81Г, 6Р81Ш розмір столу, консолі та механізмів ідентичні 250 мм × 100 мм.

Безконсольні вертикально-фрезерні верстати (рис. 1, д, е, ж-и), призначені для оброблення заготовок великогабаритних деталей, стіл виконує рух по поздовжніх та поперечних напрямних станини. Шпиндельна головка виконує вертикальний рух по напрямних колони (вісь Z).

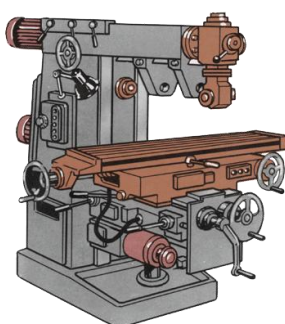
Поздовжньо – фрезерний верстат (з, и) застосовують для оброблення великогабаритних заготовок. Обробка здійснюється, здебільшого, торцьовою фрезою, а також циліндричними, кінцевими, дисковими та фасонними фрезами.



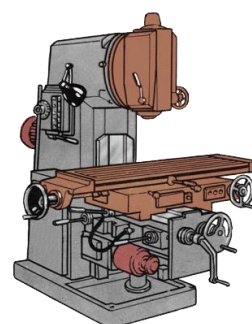
а)
шпонково-
фрезерний
верстат



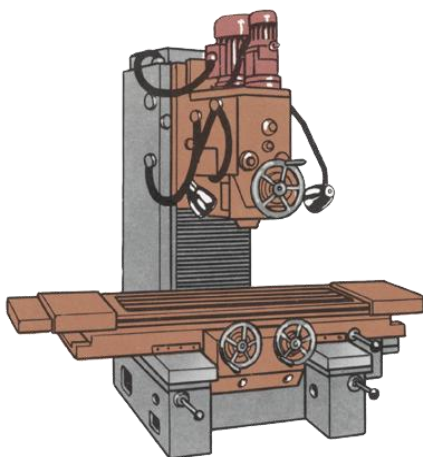
б)
горизонтально-
фрезерний верстат



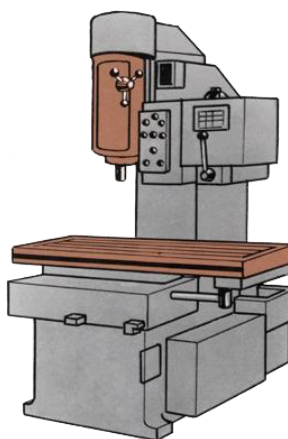
в)
широкоуніверсальний
фрезерний верстат



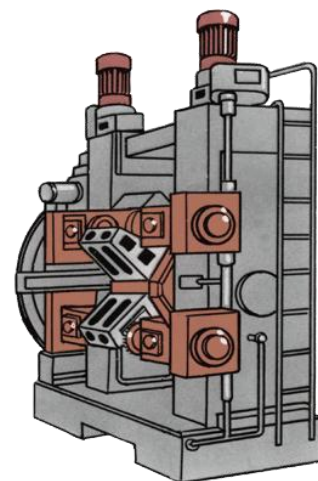
г)
Консольно-вертикально
фрезерний верстат



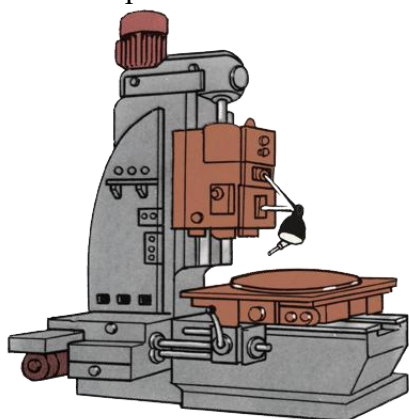
д)
Вертикально-фрезерний верстат з
хрестовим столом



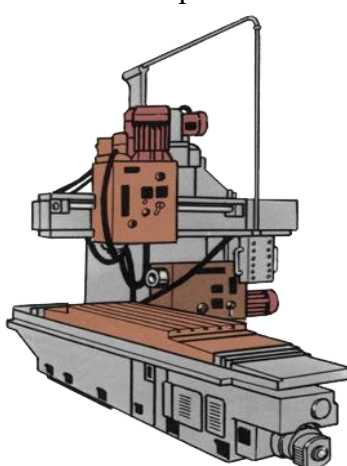
е)
Копіювально-фрезерний
верстат



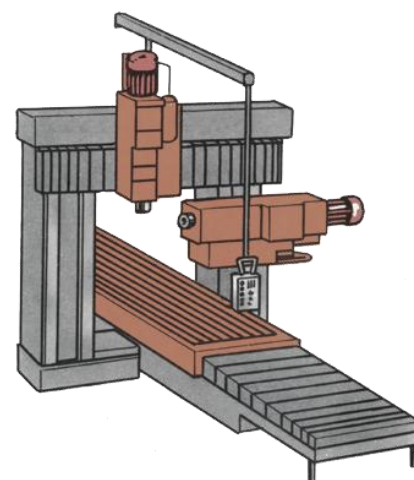
є)
Барабанно-фрезерний верстат



ж)
Карусельно-фрезерний верстат



з)
Одностійковий поздовжньо-
фрезерний верстат



и)
Двостійковий поздовжньо-
фрезерний верстат

Рисунок 1.1 – Типи фрезерних верстатів без ЧПК

На станині встановлюють одну або дві вертикальні колони. У випадку

компонування із двома стійками, їх з'єднують поперечкою.

Барабанно-фрезерні верстати (рис. 1.1, є) використовуються в крупносерійному і масовому виробництвах. Заготовки встановлюють на обертовому круглому столі, який виконує рух подачі. Має пари чорнових і чистових фрезерних головок, котрі переміщуються по напрямних стійок.

Карусельно-фрезерні верстати (рис. 1.1, ж), призначені для обробки поверхонь торцевими фрезами, мають один або декілька шпинделів для чистової та чорнової обробки. По напрямних стійки вертикально переміщується шпиндельна бабка. Стіл обертається неперервно і надає, встановленим на ньому заготовкам, руху подачі. Стіл із салазками має регульоване переміщення по напрямних станини.

Для визначення подальшого напрямку досліджень необхідно проаналізувати переваги та недоліки фрезерних верстатів.

Найбільш поширеними верстатами, як було описано вище є консольно-фрезерні верстати. Наявність консолі, надаючи консольно-фрезерним верстатам певних зручностей при обслуговуванні, трохи знижує жорсткість на стику зі станиною, тому в конструкціях сучасних верстатів значно збільшена довжина напрямних консолі, створене обладнання для закріплення рухливих частин верстата, підвищена жорсткість корпусних деталей.

Верстати з числовим програмним керуванням є одними з найпоширеніших машин, що працюють у металообробній промисловості (токарні, фрезерні верстати, свердла та інші). Однак фрезерні верстати та фрезерні центри являють собою дуже складний та багатомодульний тип технологічної машини в сучасній промисловості.

Як бачимо із рис.1.1 у фрезерних верстатах використовують наступні види столів:

- плоскі прямокутні столи із Т-подібними пазами для кріплення заготовок і пристроїв. Т-пази дозволяють швидко встановлювати лещата, призми, спеціальні пристосування (рис.1.2 – 1.3);
- консольні столи (у горизонтально- та вертикально-фрезерних верстатах

стіл закріплений на консолі, яка переміщується по напрямних станини). Це забезпечує поздовжні, поперечні та вертикальні переміщення (рис.1.1, а – г);

- поздовжні столи (у великих поздовжньо-фрезерних верстатах стіл має значну довжину і рухається вздовж станини. Такі конструкції застосовуються для обробки габаритних деталей) рис.1.1, а-г;
- карусельні та барабанні столи. У верстатах безперервної дії стіл може мати форму каруселі або барабана, що забезпечує циклічну подачу заготовок;
- поворотні (4-та вісь) (рис.1.4). Додають можливість обертання заготовки навколо горизонтальної осі. Це розширює технологічні можливості центру;
- багатошпиндельні поворотні столи для паралельної обробки (рис.1.6);
- поворотно-нахильні столи (5-та вісь) (рис.1.5). Дозволяють одночасно обертати і нахиляти заготовку. Використовуються для складних просторових поверхонь, наприклад у авіаційній чи медичній техніці;
- палетні системи. У сучасних обробних центрах застосовуються столи з палетами, які можна швидко змінювати. Це зменшує час переналагодження і підвищує продуктивність;
- вакуумні та магнітні столи (рис.1.7). Використовуються для кріплення тонких або неметалевих заготовок, де традиційні лещата неефективні.

Столи повинні відповідати наступним вимогам:

- жорсткість і точність – стіл має витримувати значні навантаження без деформацій;
- універсальність кріплення – Т-пази, отвори, палети, вакуумні системи;
- автоматизація – у обробних центрах столи інтегровані з системами ЧПК, що забезпечує багатокоординатну обробку;
- модульність – можливість швидкої заміни столів або палет для різних типів деталей.



Рисунок 1.2 – прямокутний координатний стіл KT 230 Proххон



Рисунок 1.3 – важкий прямокутний координатний стіл



Рисунок 1.4 – поворотний стіл Наас мод. HRT310



Рисунок 1.5 – Глобусний стіл OSN-250 поворотно-похилий



Рисунок 1.6 – Багатошпиндельний поворотний стіл Kitagawa мод. ТМ



Рисунок 1.7 – Поворотний стіл для 5-осьовий обробки Kitagawa мод. ТМ

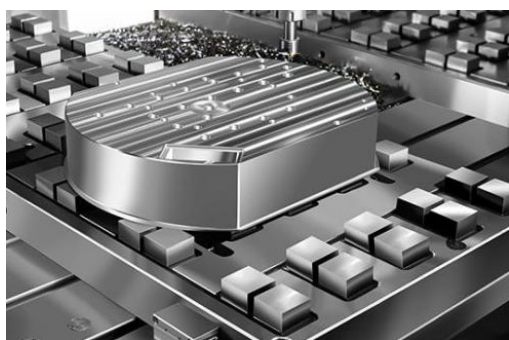


Рисунок 1.8 – Магнітний стіл



Рисунок 1.9 - Кутова монтажна плита

Таким чином, столи фрезерних верстатів зазвичай простіші й орієнтовані на базові переміщення та кріплення, тоді як столи обробних центрів є високотехнологічними вузлами, що забезпечують багатокоординатну обробку, автоматизацію та швидку переналагоджуваність

1.2.2 Огляд наукових статей за тематикою роботи

В праці [5] запропоновано систему компенсації помилок для 5-осьових верстатів. Модель об'ємної помилки побудована за допомогою методу однорідної матриці перетворення, з якої можна отримати значення компенсації як помилок орієнтації, так і помилок положення. Тридцять сім помилок на 5-осьовому верстаті класифікуються на три категорії – функціональні, випадкові та незначні помилки, серед яких вплив першої на об'ємну точність вважається достатньо великим, щоб бути включеним до описаної моделі. Обговорюються деякі типові методи моделювання помилок позиціонування та прямолінійності, враховуючи як геометричні, так і теплові ефекти. Автори пропонують метод реалізації компенсації, заснований на функції зсуву нульової точки зовнішнього верстата та протоколі передачі даних Ethernet для верстатів. Нарешті, були проведені лазерні діагональні вимірювання для перевірки ефективності запропонованої системи компенсації об'ємної помилки.

У статті [6] пропонується узагальнена модель об'ємної похибки та метод компенсації розподіленої похибки для багатOVERстатних верстатів. Побудовано детальну узагальнену кінематичну модель для три- та п'ятиосьових верстатів. Її можна застосувати до 4 типів триосьових верстатів та 12 типів п'ятиосьових верстатів. Простим введенням номерів поступального та обертового типів конкретного верстата можна отримати кінцеву кінематичну модель без подальшого втручання людини. Запропоновано новий метод компенсації, заснований на розподіленій системі числового керування Ethernet. Розроблено програмне забезпечення для розподіленого числового керування Ethernet,

інтегроване з узагальненою кінематичною моделлю, для верстатів з системами Fanuc та Siemens. На основі розподіленої системи числового керування Ethernet одночасно компенсуються об'ємні похибки багатOVERстатних верстатів у реальному часі. Запропонована узагальнена кінематична модель та розподілені системи числового керування Ethernet експериментально перевірені на трьох верстатах, об'ємні похибки яких значно зменшуються після компенсації.

В роботі [7] основною метою дослідження є аналіз динаміки руху столу 3-осьового фрезерного верстата з ЧПК FV580A (рис.1.10 – 1.12) під час обробки з фіксованими технологічними параметрами різання. Дослідження включає вимірювання швидкості, прискорення та уповільнення, а також параметрів відстані та часу, пов'язаних з рухом столу верстата під час запуску та гальмування під час робочих випробувань.

Результати вимірювань були записані за допомогою високошвидкісної відеокамери Phantom v1610, оснащеної об'єктивом Nikon ED AF NIKKOR 80:200 мм 1:2,8D, призначеного для аналізу високошвидкісних явищ. Аналіз, представлений у публікації, включає порівняння результатів параметрів руху, отриманих як функції швидкості подачі v_f .



Рисунок 1.10 – Обробний центр МОС
Mechanics FV580A

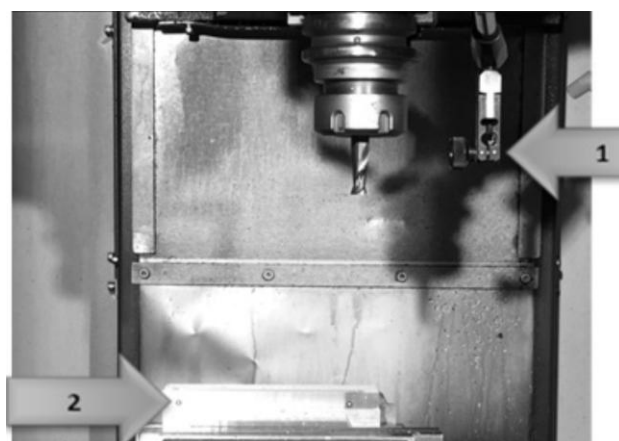


Рисунок 1.11 – Розміщення опорних точок: 1– фіксовані опорні точки на відстані 6 мм одна від одної, 2– рухома точка, прикріплена до заготовки



Рисунок 1.12 – Тестування динаміки запуску та гальмування верстатного столу для запису швидкозмінних явищ за допомогою камери машинного зору Phantom v1610

На основі випробувань, проведених відповідно до прийнятої моделі, були отримані набори значень лінійного руху фрезерного столу, швидкості та прискорення під час запуску та затримки під час гальмування. Результати випробувань були усереднені з окремих серій випробувань (5 повторень) для кожного встановленого руху подачі. На рис. 1.13 – 1.15 представлено часові залежності зміни руху s , (рис. 1.13), швидкості v , (рис. 1.14), а також прискорення a та затримки $-a$ (рис. 1.15), як функції часу t .

Діаграма, представлена на рис.1.13, показує шлях, що відповідає відстані обробки $s=0,1$ м, зафіксованому при встановленій швидкості руху $v=3000$ мм/хв при $t_p=2,3$ с.

На рис.1.14 представлено характер зміни швидкості руху v , як функції часу t під час руху столу верстата з ЧПК по осі X. Рис. 1.14 показує хід зміни швидкості v , як функції часу t під час руху столу верстата з ЧПК по осі X, чітко видно зростаючий нахил виміряної швидкості v за час t_r , протягом якого досягається стабільний, постійний рівень виміряного значення швидкості v руху столу верстата.

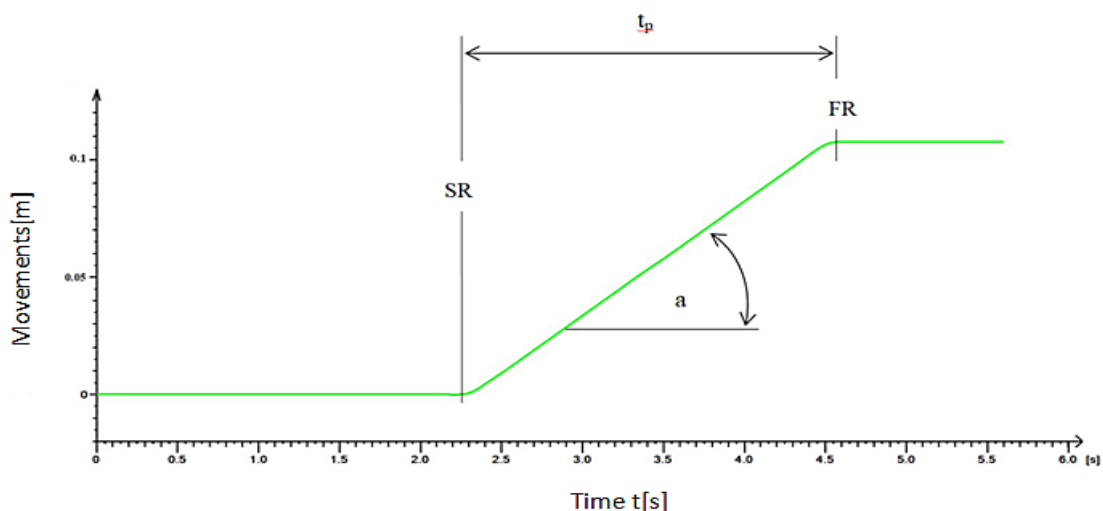


Рисунок 1.13 – графік зміни руху s як функції часу t під час руху столу верстата по осі X : t_p – час руху, a – кут нахилу пройденої відстані в часі, SR – початок руху, FR – кінець руху

При гальмуванні лінійного руху столу верстата чіткий та повторюваний спадаючий нахил записаної швидкості руху намічається в момент часу t_h . Коли стіл верстата досягає швидкості руху v_f , визначеної в програмі, видно незначні та повторювані коливання швидкості руху v , що виникають на довжині вимірювальної ділянки $s=0,1$ м. Найбільші коливання швидкості руху v спостерігалися в центральній частині вимірювального сегмента, що відповідає t .

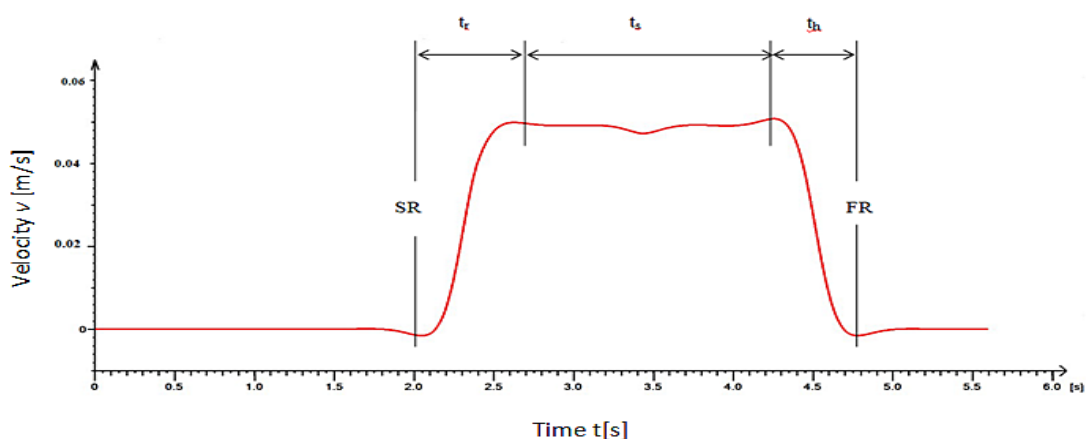


Рисунок 1.14 – Приклад залежності зміни швидкості v як функції часу t під час руху столу верстата по осі X : SR – початок руху, FR – кінець руху, t_r – час розгону, t_h – час гальмування руху, t_s – час стабілізованої роботи

На рис.1.15 представлено хід змін прискорення a , як функції часу t під час руху столу верстата по осі X . Тут чітко видно динамічний характер змін

прискорення руху a під час запуску та затримки $-a$ під час гальмування столу фрезерного верстата. Ці значення представляють 2 характерних амплітуди: амплітуду прискорення a на початку руху та амплітуду затримки $-a$ під час гальмування. Це показує, що робочий рух робочого вузла верстата є рівноприскореним (або затриманим під час гальмування) рухом і динамічно змінюється під час руху столу верстата.

Відмінною особливістю отриманих часових ходів є явище виникнення характерного піку на графіку швидкості як функції часу t для заданих значень швидкостей подачі столу v_f . Цей пік виникає, коли значення збільшення швидкості зміщується до постійного значення. Аналогічний пік виникає, коли швидкість зменшується від постійної до рівномірно спадаючої швидкості до повної зупинки лінійного руху. У випадку вищих швидкостей подачі спостерігалось зменшення швидкого переходу при запуску та гальмуванні. Для ілюстрації цього зв'язку на рис.1.8 представлено приклад ходу змін тестованих параметрів як функції часу t . Графік показує аналізовані параметри швидкості v , прискорення a , затримки $-a$ та відстані s для заданої швидкості $v=7000$ мм/хв. Червоний колір позначає швидкість v , синій - прискорення a / затримки $-a$, а зелений - рух s .

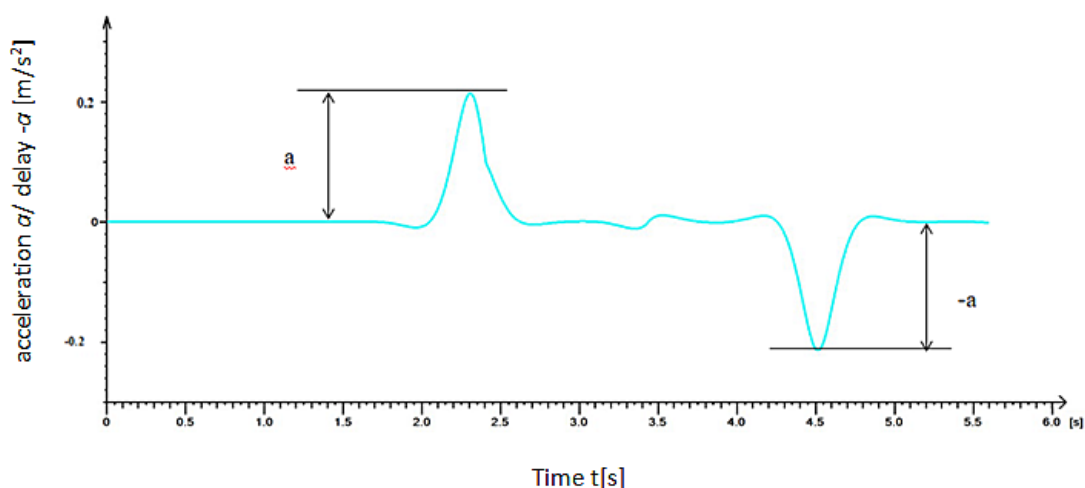


Рисунок 1.15 – Графік зміни прискорення a , як функції часу t під час руху столу верстата по осі X : a – амплітуда прискорення, $-a$ – амплітуда затримки

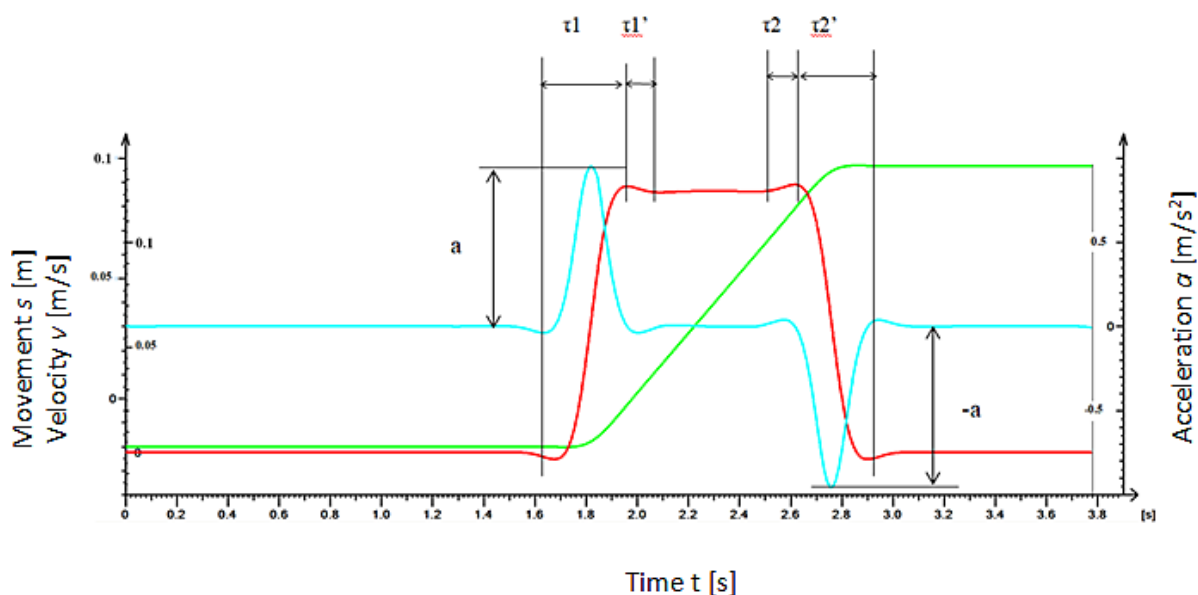


Рисунок 1.16 – Зведений графік ходу зміни руху, швидкості та прискорення як функції часу під час руху столу інструментального верстата з ЧПК по осі X для заданої швидкості подачі $v_f=7000$ мм/хв, τ_1 – час від початку до досягнення максимального значення швидкості, τ_1' – час від досягнення максимального значення швидкості до отримання постійного значення, τ_2 – час від постійного значення до досягнення максимальної швидкості, τ_2' – час від максимального значення до уповільнення

На основі цієї наукової праці можна зробити висновки, щодо важливості розуміння динамічних характеристик обробного інструменту – змін прискорення, швидкості, вібрації та часу позиціонування. Ці характеристики впливають на робочі параметри, такі як точність позиціонування та повторюваність. Приводи верстатів повинні мати високу точність позиціонування, стабільність руху, особливо на низьких швидкостях, а також низький опір руху внаслідок мінімізації коефіцієнта тертя в напрямних та гвинтах. Це призводить, серед іншого, до зниження споживання енергії двигунами. Водночас, приводи повинні забезпечувати широкий діапазон швидкостей подачі, високі швидкості обертання шпинделя, а також високу жорсткість усієї системи, щоб забезпечити стабільність рухів та належні умови обробки. Беручи до уваги проведені експериментальні випробування, можна зробити висновок, що:

- рухи стабільні,
- точність руху, швидкість та прискорення є повторюваною,
- запуск та гальмування столу верстата пов'язане зі створенням збільшеної амплітуди швидкості та прискорення руху,
- стабілізація параметрів швидкості та прискорення (затримки) вимагає часу, який сильно залежить від заданої швидкості руху,
- збільшення заданої швидкості руху передбачає зменшення амплітуди коливань швидкості та прискорення (позитивно впливає на хід тестованих параметрів),
- рух стає стабільнішим зі збільшенням швидкості руху обробного інструменту, найбільші значення амплітуди пов'язані з низькими швидкостями подачі фрезерного верстата.

Отримання вищих значень швидкості та прискорення столу під час запуску столу могло бути пов'язане з явищем заїдання – ковзання, яке виникає при низьких швидкостях подачі елементів, між якими виникає тертя. Коли верстат працює на вищих швидкостях, це явище зводиться до нуля, оскільки потужність приводів верстата настільки висока, що перевищує опір обробного столу як статичне тертя. Після аналізу значень середніх швидкостей при запуску та гальмуванні для тестованого діапазону швидкості подачі v_f столу можна побачити, що робота верстата є правильною, і явище заїдання – ковзання, що виникає, не впливає негативно на лінійний рух столу під час робочого випробування.

Підсумовуючи, значення швидкостей запуску та гальмування обробного столу, отримані в експериментальних випробуваннях, описаних у цій статті, значною мірою залежать від загального стану технологічної машини та умов, в яких проводиться експеримент. Завдяки визначенню характерних динамічних параметрів руху обробного столу, можна легко визначити його динаміку, що вплине на правильну роботу

У статті [8] пропонується комплексний метод вимірювання та ідентифікації геометричної похибки для похилого столу, оснащеного 5-осьовим верстатом з двома поворотними столами, з використанням подвійного ballbar. Три похибки

положення гнізда, спричинені як об'ємною похибкою, так і похибкою зчеплення похилого столу, вимірюються в чутливих напрямках за допомогою простих кругових траєкторій. Математична модель застосовується для відображення зв'язку між нічними результатами, отриманими з трьох положень встановлення гнізда, та всіма похибками похилого столу. Спочатку всі результати вимірювань застосовуються для встановлення середньої осі, яка точно відповідає похибці зчеплення похилого столу, використовуючи нещодавно розроблений метод кругової апроксимації, замість розв'язання великомасштабних лінійних рівнянь. Потім похибка зчеплення розглядається як елемент тренду в результатах вимірювань, оскільки вона залишається постійною під час обертання похилого столу. Отже, об'ємна похибка визначається рештою результатів вимірювань, які отримують шляхом віднімання частини, спричиненої похибкою зчеплення, за допомогою методу псевдоінвертованої матриці. Тим часом створюється модель похибки для аналізу впливу похибок встановлення гнізда та чашки інструменту. Для усунення цих 2 помилок встановлення, перед випробуванням ballbar розроблено дві прості процедури корекції з використанням недорогого електронного затискача та легко керованого кругового руху. Нарешті, для підтвердження ефективності та правильності запропонованого методу проводиться верифікаційний експеримент шляхом порівняння прогнозованого значення на основі виявлених помилок з результатами вимірювань ballbar.

Визначення поточного технічного стану верстата та передбачуваність його змін з часом призводить до покращення його властивостей. Зрештою, це призводить до збереження основних властивостей фрезерного верстата, що впливає на точність фрезерованих виробів. Детальний опис ідентифікації помилок фрезерних верстатів з ЧПК, що використовуються, та прогнозування їх виникнення на основі історії змін технічного стану фрезерного верстата. Також описано дослідження, яке включало прикладний аналіз точності фрезерного верстата з ЧПК, визначеної методом ballbar [5, 9]. Були виявлені та описані вибрані помилки з їх відповідними причинами, а також запропоновані методи їх мінімізації. Для діагностування геометричної точності фрезерного верстата

використовують: лазерний інтерферометр, HMS (Head Measurement System) – система вимірювання головки, R – тест та QC – 20 ballbar. Ballbar – це спеціальний прилад у вигляді штанги з кульковими шарнірами на кінцях і сенсором довжини, який використовується для перевірки стану системи приводу та кінематики.

Один кінець шарнірної штанги кріпиться до шпинделя або тримача інструменту, інший – до столу або опорної точки (рис.1.17). Тоді верстат виконує запрограмований круговий рух (інтерполяція X-Y), а прилад вимірює відхилення від ідеальної траєкторії (рис.1.18).

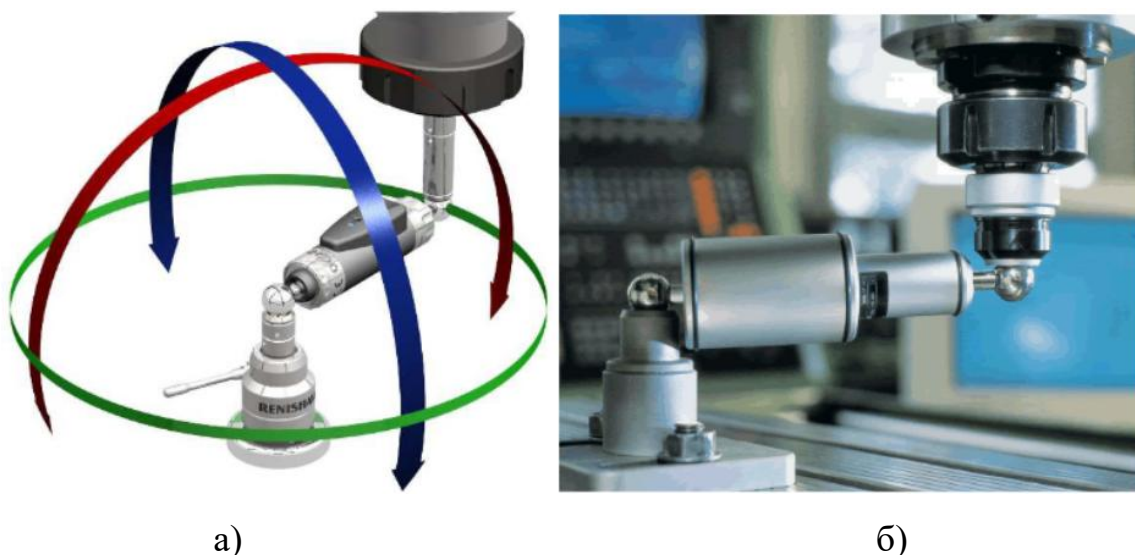


Рисунок 1.17 – Вимірювання похибок верстатів за допомогою Ballbar QC20-W (а) та DBB 110 (б) [10, Помилка! Джерело посилання не знайдено.]

Прилад дозволяє перевірити відхилення від ідеального кола, люфт у напрямних та гвинтових передачах, нелінійності в системі приводу, геометричні похибки (перпендикулярність осей, люфт, похибки масштабу), динамічні характеристики (вібрації, прискорення). До переваг варто віднести швидкість перевірки (10–15 хв) та забезпечення комплексної оцінки точності без розбирання верстата. Також цей тест виконують для планового технічного обслуговування, сертифікації та усунення несправностей.

У цій статті представлено фактори та потреби, які зумовлюють необхідність підвищення точності верстатів. Описано типи помилок верстатів, їх причини та способи їх виявлення, вимірювання, зменшення та компенсації. Обговорено та класифіковано найефективніші методи виявлення помилок верстатів. Методи та

інструменти вимірювання порівнюються з урахуванням їхнього діапазону застосування, витрат часу, вартості, доступності на ринку та основних обмежень.

Volumetric Ballbar diagnostics (μm)

Machine: Volumetric examples

Test Parameters

Radius 100.0000mm
Feedrate 1000.0mm/min

Volumetric Test Results

Maximum deviation 7.0 μm
ZX Plane @ 270.3°
Minimum deviation -5.5 μm
ZX Plane @ 34.2°
Sphericity 12.5 μm

Circularity

XY 7.0 μm
YZ 7.9 μm
ZX 12.5 μm

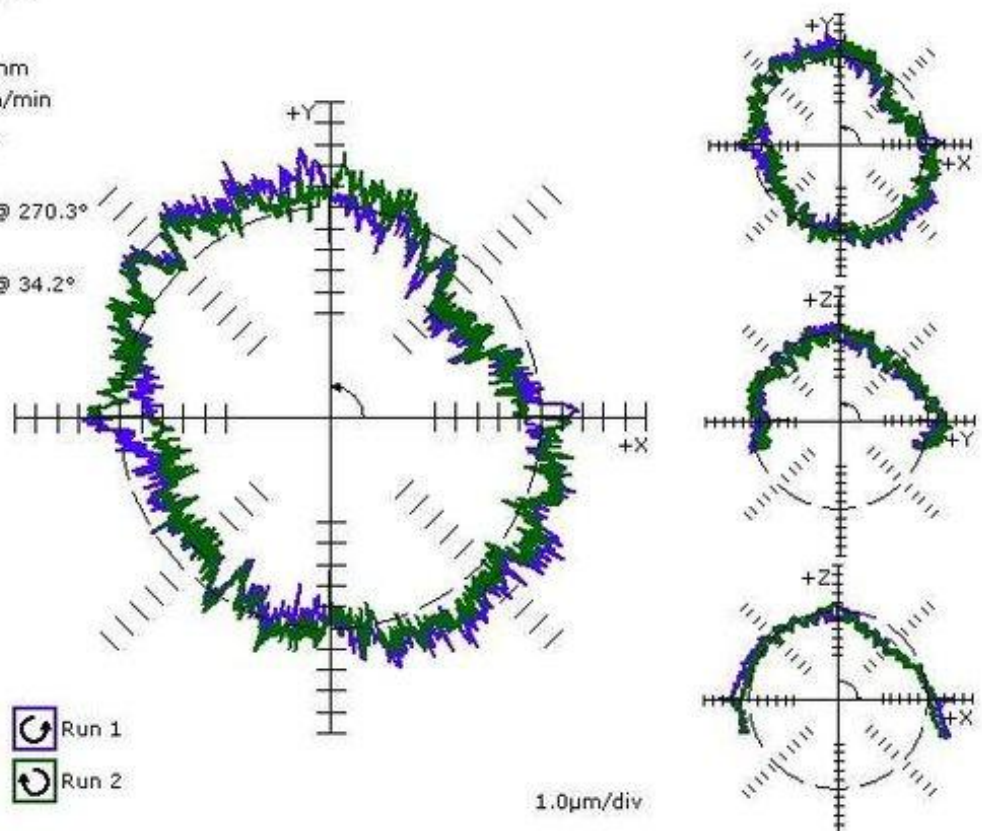


Рисунок 1.18 – Результати випробування на круглість траєкторії [10, 11]

У дослідженні [9] запропоновано виконати обробку тестового зразка з характерною заданою формою для оцінки точності тривісного фрезерного верстата з ЧПК. Чистова обробка тестових поверхонь проводилася твердосплавною кінцевою фрезою для фіксованого положення тестового зразка на столі верстата. Точність розмірів та форми тестового зразка оцінювалася за допомогою вимірювань на координатно-вимірювальній машині. Вимірювалися площинність оброблених поверхонь, їх взаємна паралельність та прямокутність. Крім того, перевірялися круглість та циліндричність обробленого отвору. Отримані результати свідчать про можливість непрямої оцінки точності фрезерного верстата.

У статті [12] розглядаються глобальні методи експериментального визначення статичної жорсткості обробних центрів. Зокрема, досліджуються різні пристрої, що використовуються для вимірювання прогину, де підкреслюється точність та зручність використання. Методи були випробувані на 3-вісному фрезерному верстаті з ЧПК, 2-вісному поворотному столі та промисловому роботі з 6 ступенями свободи. У цій статті представлені результати різних методів вимірювання статичної жорсткості. Виділено деякі труднощі вимірювання жорсткості в прецизійних багатоосьових обробних центрах, де основною проблемою були точність та час налаштування. Підкреслено важливість врахування точності як пристрою для вимірювання сили, так і прогину. З результатів видно, що високої точності вимірювання можна досягти навіть за низької точності. При рівнях навантаження, що використовувалися в випробуваннях, LVDT (Linear differential transformer) – лінійний диференціальний перетворювач виявився найперспективнішим методом для забезпечення послідовних і точних результатів для верстатів з високою жорсткістю.

Лінійний диференціальний трансформатор (LVDT) схоже на метод використання індикатора годинникового типу, відмінність якого полягає головним чином у тому, що зондувальний датчик та електроніка збору даних розділені. Хоча структура схожа, зонди LVDT та системи збору даних зазвичай мають вищу роздільну здатність та точність, ніж більшість комерційних цифрових індикаторів годинникового типу. У цьому тесті було використано LVDT Solartron ax/1/s, який має повторюваність 0,15 мкм. Збір даних проводився за допомогою системи ADDIDATA MX3700 для LVDT-датчиків з роздільною здатністю 24 біт, що еквівалентно теоретичній роздільній здатності показів 1×10^{-4} мкм. Метод використання лазерного трекера мав перевагу в скороченні часу налаштування та виконання. Однак вважається, що він застосовується лише до верстатів з меншою жорсткістю та великим відкритим робочим простором, на якому можна розмістити трекер, таких як промислові роботи. Не враховуючи жорсткість таких компонентів, як заготовка, затиск або інструмент, було виміряно наступну жорсткість. Найнижча жорсткість 3-осьового ЧПК була виміряна в межах від 14,8

Н/мкм до 21,1 Н/мкм у площині ХУ та 24,7 Н/мкм у напрямку Z. Виміряна жорсткість 2-осьової цапфи становила всього 7,4 Н/мкм у площині ХУ (відносно 3-осьового верстата) та 68,8 Н/мкм у напрямку Z. Жорсткість по 5 осях, в поєднанні цапфи та ЧПК, приблизно становила від 5,3 Н/мкм до 16,9 Н/мкм. Виміряна жорсткість промислового робота з 6 ступенями свободи становила від 0,25 Н/мкм до 1,10 Н/мкм.

В роботі [13] виконано порівняльний статичний аналіз (для чавуну і сталі) стола 3-х вісного фрезерного верстата для визначення напружень, що виникають у столі та деформацій столу під власною вагою. Метод скінченних елементів виконувався шляхом створення 3D-моделі в САПР Solidworks та аналізу за допомогою програмного забезпечення ANSYS. В результаті, загальна деформація сірого чавуну менша, ніж у сталі ANSI 1045, але більша, ніж у ANSI 304 (м'яка сталь). Еквівалентне напруження, пружна деформація та максимальне головне напруження становлять $0,02789$, $4,985 \cdot 10^{-7}$ та $0,0070949$ відповідно. Отже, для столу верстата з ЧПК сірий чавун є надійнішим, ніж інші матеріали.

В праці [14] розглядається модифікована методологія вимірювання статичної жорсткості верстата. Причиною для модифікації загальноновживаного розширеного методу вимірювання статичної жорсткості стали значні відмінності експериментально вимірянних значень статичної жорсткості в змодельованому процесі прикладання навантаження в лабораторних умовах порівняно зі стандартним методом.

Вимірювання проводилося на тривісному фрезерному верстаті з ЧПК. Оскільки модифіковане вимірювання статичної жорсткості відбувається одразу після початку запрограмованого положення, результати вимірювання жорсткості точніше відображають фактичні обставини, що відбуваються під час обробки. Класичне вимірювання жорсткості показало значення жорсткості до трьох разів більші, ніж ті, що були отримані модифікованим методом з використанням ідентичних інструментів та умов. Причини такої значної різниці в жорсткості пов'язані з розташуванням конструкції та впливом нелінійностей на контактні поверхні компонентів розсувного столу. Вимірювання виконується одразу після

руху. Можна стверджувати, що вимірювання проводиться в зоні статичного навантаження. Під час вимірювання всі частини машини були нерухомими.

Концепцію жорсткості (SSaS – статична жорсткість після ковзання) введено для того, щоб розрізнити статичну жорсткість і жорсткість під час руху або одразу після завершення ковзання машини. Це не вимірювання динамічної жорсткості, тому доречно ввести нову концепцію розрізнення.

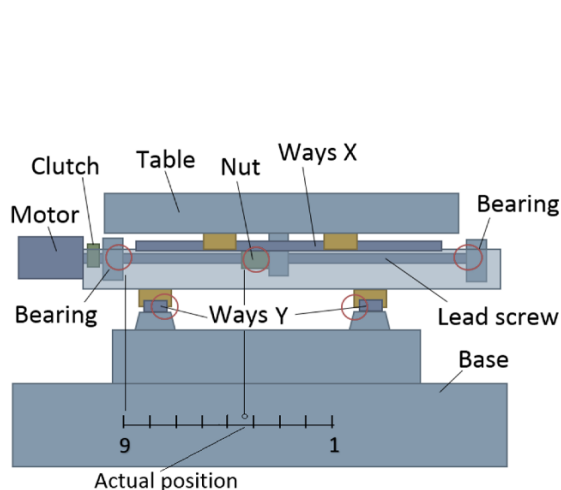


Рисунок 1.19 – Схема кінематичного ланцюга поперечного столу з критичними точками контакту (позначено колом).

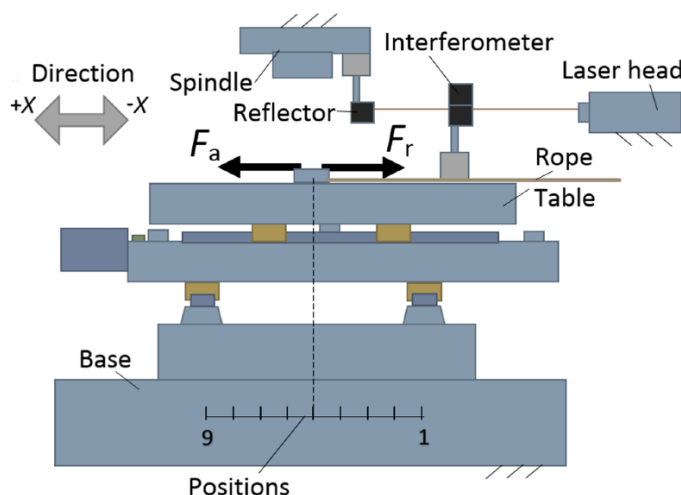


Рисунок 1.20 – Схема вимірювання в напрямку осі X на ковзному (поперечному) столі фрезерного верстата.

Вимірювання жорсткості лазерним інтерферометром відкриває нові можливості оцінки, які неможливо реалізувати у випадку класичного вимірювання за допомогою циферблатного мікрометричного індикатора. Як впливає з результатів вимірювань, статична жорсткість залежить як від попереднього способу прикладання навантаження, так і від напрямку, в якому передбачається вимірюване положення. Запропонована методологія вимірювання жорсткості SSaS дозволяє краще оцінити працездатність машини. Вона також дозволяє виявляти несправності, спричинені, наприклад, неправильним складанням компонентів машини. Метод також вказує на конструктивні недоліки машини, які не проявляються при класичному вимірюванні жорсткості.

Через значну різницю між жорсткістю, отриманою за допомогою методу SSaS, та статичною жорсткістю, було виконано та впроваджено концептуальний проект нових типів конструкцій високоточних машин.

1.3 Висновки по розділу

На основі проведеного інформаційного дослідження можна зробити наступні висновки:

9. Встановлено, що класифікація деталей за масою та габаритними розмірами є визначальним чинником під час вибору металообробного обладнання. Застосування чотирирівневої системи типорозмірів дозволяє обґрунтовано визначати тип верстата, конструкцію та розміри стола, спосіб базування і закріплення заготовок, а також необхідність використання підйомно-транспортних засобів.
10. Обґрунтовано, що конструкція та геометричні розміри стола фрезерного верстата істотно впливають на його експлуатаційні характеристики. Саме стіл сприймає основні навантаження від маси заготовки, сил різання та інерційних впливів, унаслідок чого його жорсткість є однією з ключових складових загальної жорсткості верстата.
11. Показано, що жорсткість верстата безпосередньо визначає допустимі режими різання, стабільність процесу фрезерування, точність обробки та якість поверхонь. Повна жорсткість формується як результат взаємодії жорсткостей станини, столу, напрямних, шпиндельного вузла та контактних елементів конструкції.
12. Встановлено, що для фрезерних верстатів найбільш критичною є жорсткість на згин, яка суттєво зменшується зі збільшенням довжини конструктивних елементів. Це зумовлює необхідність оптимізації форм поперечних перерізів силових елементів, зокрема шляхом застосування коробчастих, рамних і ребристих конструкцій.
13. Доведено, що матеріал силових елементів істотно впливає на жорсткість і

стабільність конструкції. Результати чисельних та експериментальних досліджень свідчать про доцільність використання сірого чавуну для виготовлення столів фрезерних верстатів з ЧПК завдяки його високим демпфуючим властивостям та достатній жорсткості.

14. Аналіз експериментальних досліджень динаміки руху столу показав, що параметри швидкості, прискорення та гальмування істотно впливають на точність позиціонування і повторюваність. Найбільші нестабільності спостерігаються на малих швидкостях подачі внаслідок явищ заїдання та ковзання, тоді як зі зростанням швидкості рух стає більш стабільним.
15. Встановлено, що сучасні методи контролю технічного стану верстатів, зокрема ballbar-випробування, лазерна інтерферометрія та застосування LVDT-датчиків, забезпечують комплексну оцінку геометричних, кінематичних і жорсткісних характеристик верстатів без необхідності їх розбирання.
16. За результатами аналізу наукових публікацій підтверджено актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення жорсткості та точності столів фрезерних верстатів з ЧПК, оскільки саме стіл є одним із найбільш навантажених і водночас чутливих до деформацій вузлів технологічної машини.

2 ПРОЄКТНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз компоновки фрезерного верстата Haas VF-1

Як відомо, фрезерні верстати можуть мати різні компоновки: з вертикальним та горизонтальним шпинделем. Для виконання фрезерної обробки вузли верстата повинні виконуватися три лінійних рухи, а головний обертовий рух – фреза. Шпиндель може мати або вертикальне або горизонтальне розташування. Якщо вертикальний шпиндель нерухомий, то тоді лінійні переміщення вздовж осей X, Y і Z виконує стіл. Таке компонування верстата має обмеження накладене вагою оброблювальних деталей, а це дещо обмежує технологічні можливості. Переміщення стола вздовж осі Z буде створювати крутний момент у вертикальній площині від власної ваги стола і ваги заготовки на колону верстата. Для виключення впливу ваги деталі стіл виконують нерухомим вздовж осі Z, натомість це переміщення гадають шпиндельній бабці. Таке компонування дозволяє зняти обмеження накладене вагою деталі.

Якщо кожен із блоків позначити літерами відповідних лінійних переміщень X, Y, Z, а стаціонарний (нерухомий) блок цифрою «0», то кількість теоретично можливих варіантів компоновок буде:

$$P = 4! = 24 \quad (2.1)$$

Таким чином ми отримуємо по 24 варіанти при горизонтальному та вертикальному розташуванні шпинделя, що загалом 48 варіантів. Більшість з них тільки теоретичні і не мають практичного застосування. Якщо ці літери скласти в порядку рухомості блоків від деталі до інструменту і додати блок головного руху, наприклад вертикального шпинделя $\widehat{Cv}$, то ми отримаємо структурну формулу компоновки верстата Haas VF-1: $XYZ0\widehat{Cv}$. В структурних формулах записують спрощено $XYZ0$, тому що вважається що блок $\widehat{Cv}$ або $\widehat{Ch}$ (вертикальний або горизонтальний) шпиндель розташований по замовчуванню справа у структурній

формулі, тому його не пишуть, залишаючи $XYZ0$.

Ми математично обґрунтуємо доцільність компоновки даного верстату. Компоновки верстатів групують за певними ознаками, які можуть бути структурними або конструктивними. Перші використовують для визначення основних типів компоновок, а інший для додаткових. На утворення компоновок впливають розміри верстата. Саме з цими розмірами пов'язане виконання стаціонарного блока і наявність в компоновці стійки, як у фрезерного верстата. На рис.2.1.

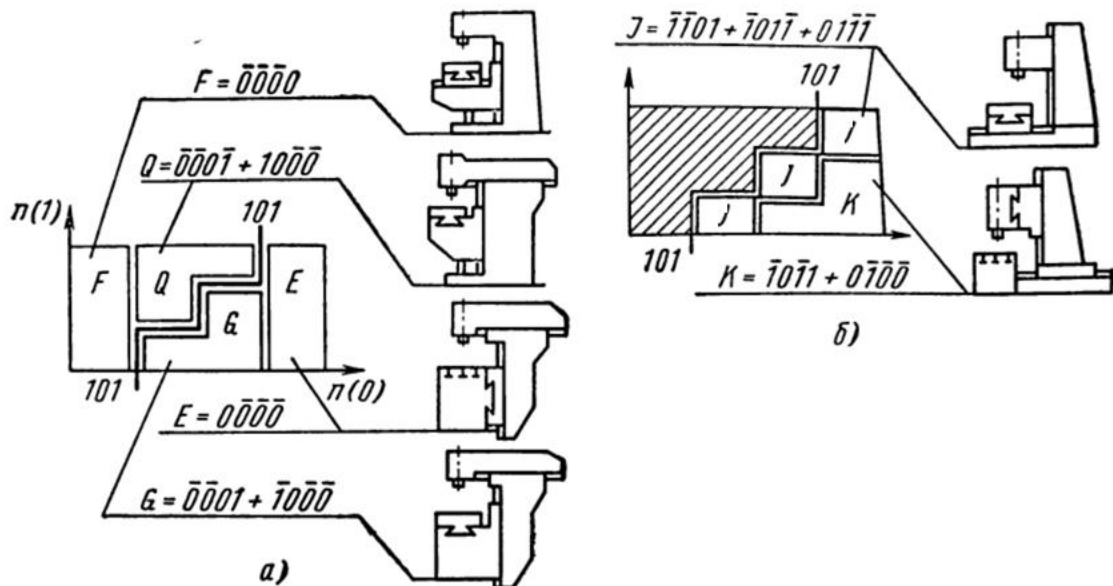


Рисунок 2.1 – Утворення множин компоновок

Матрицю компоновок поділяють на 4 підмножини: типи E, F, G і тип Q. В типі E усі рухи формотворення виконує інструмент, а стіл нерухомий. тип F всі рухи формотворення, за виключенням обертання інструменту, виконує заготовка. В типах G і Q стаціонарний блок займає проміжкове положення структурних формулах, а рух формоутворення розподіляється між інструментом і заготовкою, що відповідає вертикально-фрезерному верстату. Це компоновки з вертикальним переміщенням інструменту. Тип Q передбачає вертикальне переміщення заготовки. В компоновках типів E і G робочий простір розташований над станиною, а в типах E і Q з боку від основної частини станини.

Узагальнена формула компонування при умові нерухомого блоку шпинделя

матиме вигляд:

$$F = \bar{0}\bar{0}\bar{0}\bar{0} \quad (2.2)$$

де $\bar{0}$ – означає умову «НЕ НУЛЬ», тобто цей блок може бути X або Y або Z, але не стаціонарним блоком.

Для компоновань великих верстатів характерним є нерухома стійка або рухома для ланки переміщення інструменту. Враховуючи, що інструмент легше піднімати, ніж важку заготовку на значну висоту робить таку компоновку для важких верстатів неприйнятною. Це означає, що для масивних верстатів можуть бути використані лише компоновки з вертикальним рухомим інструментом. І відбір компоновки виконують за цією ознакою рухомості колони (матриця I) чи нерухомості (тип K). Якщо колона нерухома і вона з'єднана із стаціонарним блоком або виконана як одне ціле, означає, що вертикально-рухомий блок інструменту в структурній формулі розташований справа, одразу після стаціонарного блоку. Тоді узагальнена структурна формула компоновань типу I:

$$I = \bar{1}\bar{1}01 + \bar{1}01\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1} \quad (2.3)$$

що означає варіантність структури

$$I = \begin{vmatrix} XY0Z + X0ZY + 0ZXY \\ YX0Z + Y0ZX + 0ZYX \end{vmatrix} \text{ або } A = \begin{vmatrix} XY0Z \\ YX0Z \\ X0ZY \\ Y0ZX \\ 0ZXY \\ 0ZYX \end{vmatrix}$$

Наступною умовою структурного відбору компоновок є технологічні та конструктивні міркування, які різноманітні за своїм змістом і для зручності аналізу їх розділено на декілька груп (табл.2.1):

Таблиця 2.1

Умова відбору компонування	Формулювання структурних ознак	Позначення і формула множини варіантів компонування
Умова М ₁ : виключення впливу маси заготовки і вузлів верстата		
1.1.виключення впливу ваги заготовки при підніманні та опусканні заготовки	немає вертикального переміщення виключення маси заготовки при горизонтальних переміщеннях	$M_{1.1} = \bar{1}101 + \bar{1}0\bar{Z}\bar{Z} + 0\bar{0}\bar{0}\bar{0}$
Умова М ₂ : умови, спрямовані на підвищення точності верстата		
2.1.можливість збільшення холостого аксіального ходу для автоматичної заміни інструменту без вильоту напрямних	аксіально-рухомий блок контактує із стаціонарним через ланку інструментального блока	$M_{2.1} = \bar{Z}\bar{Z}0Z + \bar{Z}0Z\bar{Z} + 0Z\bar{Z}\bar{Z}$
2.2.скорочення розмірного ланцюга, що забезпечує паралельність осі шпинделя з аксіальним переміщенням, тобто шпиндельний блок компонування має осьове переміщення	Блок шпинделя є аксіально-рухомим	$M_{2.2} = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}$
2.3.підвищення жорсткості за рахунок рамної та гвинтової підтримок	вертикально-рухомий блок примикає до стаціонарного блоку	$M_{2.3} = \bar{1}\bar{1}10 + \bar{1}\bar{0}0\bar{0} + \bar{0}0\bar{0}\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1}$
2.5.зменшення впливу температурних деформацій шпиндельного блока	шпиндельний (інструментальний) блок є аксіально – рухомим	$M_{2.5} = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}$
Умова М ₃ : умови, пов'язані з динамічними властивостями компонування		
■ зменшення вертикально-рухомих і консольних мас	вертикально-рухомий блок є кінцевим	$M_{3.1} = 1\bar{1}\bar{1}\bar{1} + \bar{1}\bar{1}\bar{1}1$
■ підвищення стійкості мас по їх розташуванню в компоновці (у зв'язку з величинами координатних переміщень).	Чим більший хід має блок, тим ближче він має знаходитися до стаціонарного блоку	$M_{3.2} = Z\bar{Z}\bar{Z}\bar{Z} + \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z$

Коли накласти умови та обмеження то ми отримаємо:

$$M1.1 = \bar{1}101 + \bar{1}0\bar{Z}\bar{Z} + 0\bar{0}\bar{0}\bar{0}$$

$$M2.1 = \bar{Z}\bar{Z}0Z + \bar{Z}0Z\bar{Z} + 0Z\bar{Z}\bar{Z}$$

$$M2.2 = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z$$

$$M2.3 = \bar{1}\bar{1}10 + \bar{1}\bar{0}0\bar{0} + \bar{0}\bar{0}\bar{0}\bar{1} + 01\bar{1}\bar{1}$$

$$M2.5 = \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z$$

$$M3.1 = 1\bar{1}\bar{1}\bar{1} + \bar{1}\bar{1}\bar{1}1$$

$$M3.2 = Z\bar{Z}\bar{Z}\bar{Z} + \bar{Z}\bar{Z}\bar{Z}Z$$

$$M1.1 + M2.1 + M2.3 + M2.5 + M3.1 + M3.2$$

$$= \emptyset + \emptyset + XYOZ + \emptyset$$

Таким чином ми обґрунтували прийнятий верстат і його компоновки $XYOZC\bar{v}$ рис.2.2.

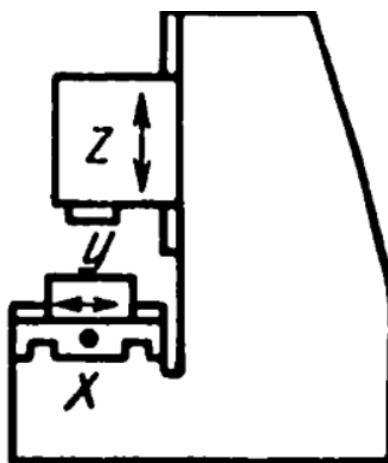


Рисунок 2.2 – компоновання $XYOZC\bar{v}$

2.2 Силіві та міцнісні розрахунки станини

Для проведення досліджень напружено-деформованого стану використаємо змодельовану нами несучу систему верстата-аналога Haas VF-1. Станина є головним несучим елементом конструкції котра забезпечує орієнтацію і взаємне розташування усіх вузлів верстата, зокрема колони та шпиндельної бабки. Тому окрім статичного аналізу станини необхідно виконати розрахунок безступеневого приводу та ходових гвинтів стола.

Напрямні забезпечують орієнтацію та переміщення стола. Основною

функцією станини разом із іншими елементами несучої системи є забезпечення закладеної базової точності роботи верстата протягом усього періоду експлуатації. Це можливо за умови правильного добору матеріалу станини, її геометричної форми, поперечного перерізу та технології виготовлення. Форма поперечного перерізу типових горизонтальних станин (рис. 2.1) визначається під впливом багатьох факторів. Конструкцію станини повинна забезпечити два ключових критерії – жорсткість та стійкість до температурних деформацій. Жорсткість конструкції безпосередньо впливає на точність обробки, оцінюючись показником зміщення інструмента відносно заготовки. Жорсткість базових елементів залежить від їхніх властивостей під час навантажень на згин, крутіння, зсув тощо.

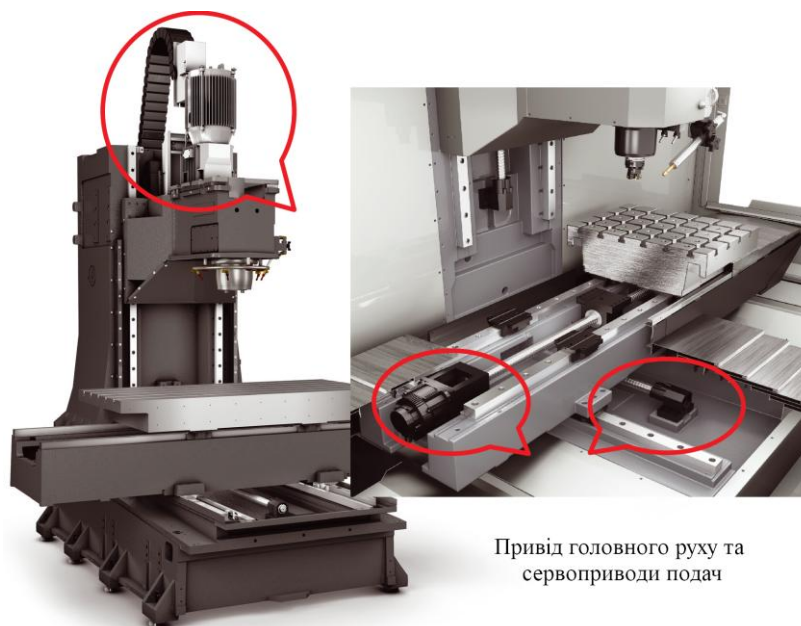


Рисунок 2.3 – Несуча система Haas VF-1 і розміщення приводів верстату

Станини виготовляють з чавуну. Їх демпфувальна здатність в 10 разів більша, ніж сталі. Саме тому виробники використовують чавунне лиття для всіх основних елементів верстата. Виливки посилюються зсередини за допомогою надміцних ребер, забезпечуючи стійкість до згинальних навантажень та демпфування вібрацій. Чавунна станина трапецієвидної форми з широкою основою забезпечує жорстку і стабільну основу для обробки деталей, стійку до згинальних навантажень.

Вхідними даними для аналітичного розрахунку станини є розміри і форма

перерізу станини (рис.4.6). Станина обробного центру Haas VF-1 складається з двох частин – основи і колони. Розрахунок основи П- подібного профілю виконуємо подібно до розрахунку станини токарного верстату, а колони, як стержня.

а) Жорсткість станини у вигляді двох стінок з перпендикулярними перегородками

Основні розміри станини, мм:

$$a = 777 \text{ мм}, \quad b = 620 \text{ мм}, \quad c = 450 \text{ мм}, \quad \delta = 35 \text{ мм}, \quad L = 135 \text{ мм}$$

Основні параметри станини:

$$L_1 = 1400 \text{ мм}, \quad d = 220 \text{ мм}, \quad N_{\text{дв}} = 22.4 \text{ кВт}, \quad V_{\text{хв.}} = 50 \frac{\text{м}}{\text{хв.}}$$

Визначаємо сили, які діють на верстат:

$$P_z := \frac{1000 \cdot N_{\text{дв}}}{V_m} = (1.613 \cdot 10^9) \text{ Н}$$

Для визначення інших сил використаємо співвідношення:

$$P_z : P_x : P_y = 1 : 0,5 : 0,3$$

$$P_x = 0.5 \cdot P_z = 13445 \text{ Н};$$

$$P_y = 0.3 \cdot P_z = 8067 \text{ Н}$$

$$P_z := \frac{1000 \cdot N_{\text{дв}}}{V_m} = (1.613 \cdot 10^9) \text{ Н}$$

$$Px := Pz \cdot 0.5 = (8.064 \cdot 10^8) \text{ N} \quad Py := 0.3 \cdot Pz = (4.838 \cdot 10^8) \text{ N}$$

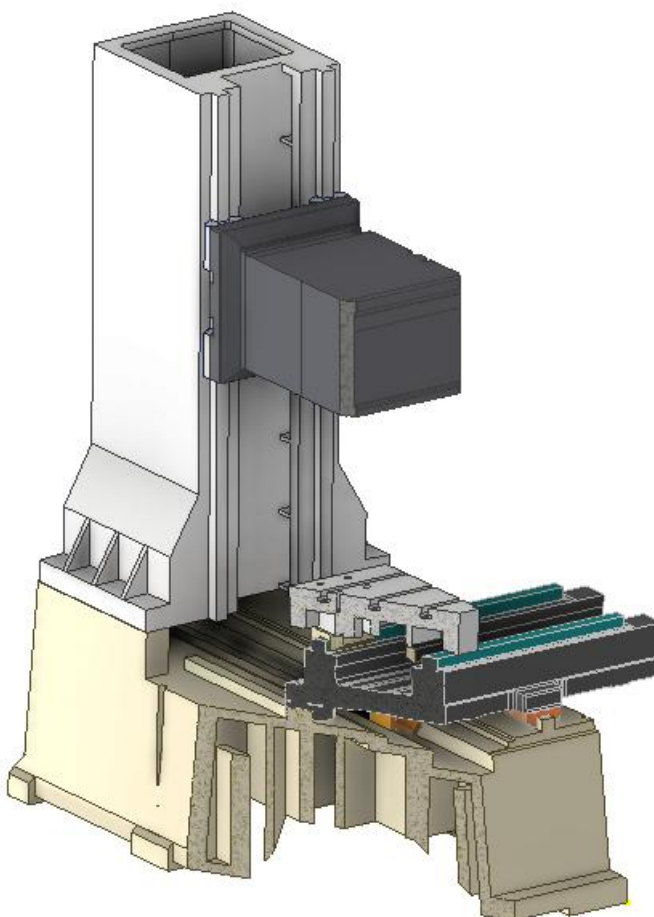


Рисунок 2.4 - 3D-модель несучої системи Haas VF-1

Визначаємо приведену жорсткість.

При розрахунках деформацію станини верстата визначають так само, як і для балок постійного перерізу, які мають деяку приведену жорсткість.

$H_1 = 450$ мм – висота станини;

$H_2 = \frac{1}{2} \cdot H_1 = 450 = 225,5$ мм – відстань від напрямних станини до осі, яка проходить через центр ваги станини;

Для розрахунку центру ваги відтворюють еквівалентну схему заміщення станини (рис.2.5). Для цього необхідно розрахувати площу F_n і центри мас Y_{c_n} ділянок станини $n = 1-4$. Для цих розрахунків використаємо пакет Mathcad Prime 11.

$$F_1 := \frac{a - (b - 2 \delta)}{2} \cdot 2 \delta = (7.945 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad F_2 := (c - 3 \cdot \delta) \cdot \delta = (1.208 \cdot 10^4) \text{ mm}^2$$

$$F_3 := \left(\frac{1}{4} \cdot b \right) \cdot \delta = (5.425 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad F_4 := \delta^2 = (1.225 \cdot 10^3) \text{ mm}^2 \quad +$$

$$Y_{c1} := \delta = 35 \text{ mm} \quad Y_{c2} := \frac{(c - 3 \cdot \delta)}{2} = 172.5 \text{ mm}$$

$$Y_{c3} := c - \frac{\delta}{2} = 432.5 \text{ mm} \quad Y_{c4} := 3 \delta = 105 \text{ mm}$$

Відстань від площини напрямних станини до осі, яка проходить через центр ваги станини визначають за формулою, але ми його визначили геометрично:

$$H_2 = \frac{\sum_n (F_n \cdot Y_{cn})}{\sum_n F_n}$$

Визначаємо крутний момент на фрезі:

$$n := 8100 \text{ rpm}$$

$$M_{kr} := \frac{N_{dv} \cdot 30 \cdot 10^3}{\pi \cdot n} = (2.522 \cdot 10^5) \text{ N} \cdot \text{m}$$

Визначаємо момент інерції на згин площини меншої жорсткості бокової стінки станини:

$$J_{stZ} := \frac{(c - 3 \cdot \delta) \cdot \delta^3}{12} = (1.233 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$E = 1.5 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ – модуль пружності для чавуну; s – коефіцієнт, який залежать від кількості перегородок станини.

Для станини з П – подібними перегородками в кількості $n_{\text{п}}=5$.

$$\nu := \frac{L}{b \cdot (5 + 1)} = 0.036 \quad w := \frac{F_2}{(c - 4 \delta) \cdot (b - 2 \delta)} = 0.071$$

$$\psi := \frac{J_{stZ}}{F_2 \cdot b} = 0.165 \text{ mm} \quad J_{nZ} := \frac{(c - 4 \delta) \cdot (b - 2 \delta)^3}{12} = (4.298 \cdot 10^9) \text{ mm}^4$$

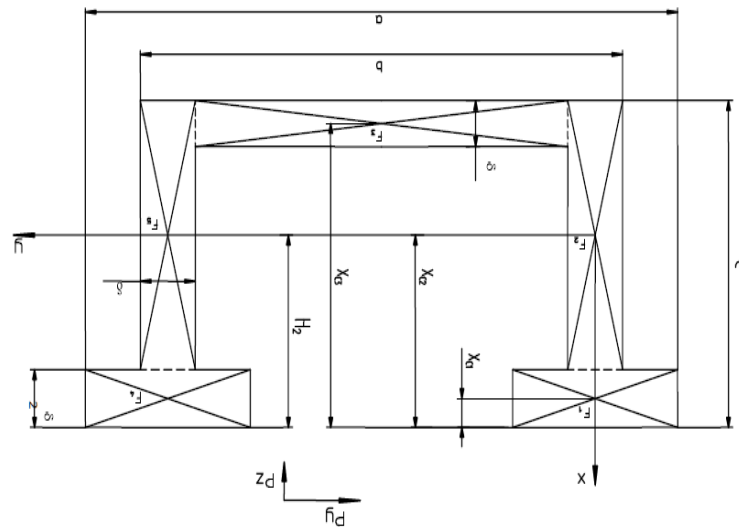


Рисунок 2.5 - Розрах ункова схема станини

$$\xi := \frac{1}{\nu} \cdot \left(\frac{J_{stZ}}{J_{nZ}} \right) \cdot (36 \cdot \psi \cdot w) = 0.003 \text{ mm}$$

$$\eta_1 := 1 + \left(\frac{36 \cdot 0.165}{0.036} \right) = 166$$

$$\eta_2 := \frac{(3 + 4 \cdot 0.003)}{3 + 0.003} + \frac{36 \cdot 0.165}{0.036^2} \cdot \left(1 + \frac{9 \cdot 0.036 \cdot 0.071}{(3 + 0.165)^2} \right) = 4.595 \cdot 10^3$$

$$\eta_1 = 1 + \frac{36\psi}{\nu} = 165; \quad \eta_2 = \frac{3 + 4\xi}{3 + \xi} + \frac{36\psi}{\nu^2} \cdot \left[1 + \frac{9 \cdot \nu \cdot w}{(3 + \xi)^2} \right] = 1.131$$

$$s_1 = \frac{32}{\eta_2} = 28.304$$

Тоді:

$$EJ_{zg_pr} = s_1 EJ_{стZ} = 8,5 \times 10^{11}$$

б) жорсткість станини на кручення

Визначаємо момент інерції на згин в площині, більшій за площину січення бокової стінки:

$$J_{stX} := \frac{(c - 3 \cdot \delta) \cdot \delta^3}{12} = (1.233 \cdot 10^6) \text{ мм}^4$$

Визначаємо приведену площу перерізу:

$$F_{stX} := \delta \cdot L = (4.725 \cdot 10^3) \text{ мм}^2$$

Модуль матеріалу чавуну:

$$G = 4.5 \times 10^5 \text{ Н/мм}^2$$

Приймаємо $K = 0,95$, тоді:

$$GJ_{kr_pr} = \frac{b^2 \cdot E \cdot J_{стX}}{\frac{K \cdot L^2}{6} + \frac{2 \cdot E \cdot J_{стX}}{G \cdot J_{стX}}}$$

$$GJ_{kr_pr} := \frac{620^2 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}{\left(\frac{0.95 \cdot 1500}{6}\right) + \left(\frac{2 \cdot 1.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}{4.5 \cdot 10^5 \cdot 1.233 \cdot 10^6}\right)} = 2.985 \cdot 10^{14}$$

2.3 Розрахунок колони

У загальному випадку стійки піддаються деформаціям згину і зсуву в 2-ох площинах кручення. Жорсткість колон на згин визначають за значенням моменту інерції розрахункового перерізу, тобто поперечного перетину, який найбільш точно відображає конструктивні особливості колони. При зміні перетинів по висоті колони за розрахунковий вибирають перетин, віддалений від найбільшого на відстань, приблизно рівне 1/3 (рис.2.8) довжини ділянки змінної жорсткості. Вплив поперечних ребер і перегородок на жорсткість згину не дуже впливає і

може не враховуватися.

Жорсткість колони на згин обчислюють за площею розрахункового перерізу. Величину переміщення точки прикладання сили можна визначити за формулою:

$$f = \frac{P \cdot l^3}{3EJ} + \frac{NPl}{GF}$$

Спочатку визначаємо відношення розмірів поперечного перерізу:

$$h := 372.6 \text{ mm} \quad b := 406.4 \text{ mm} \quad t := \frac{h}{b} = 0.917$$

$$h_1 := 302.14 \text{ mm} \quad b_1 := 336.4 \text{ mm}$$

Визначаємо коефіцієнт розподілення зсуву:

$$N := \frac{3 \cdot (t+1) \cdot (2 \cdot t^3 + 10 \cdot t^2 + 15 \cdot t + 5)}{5 \cdot t^2 \cdot (t+3)^3} = 0.55$$

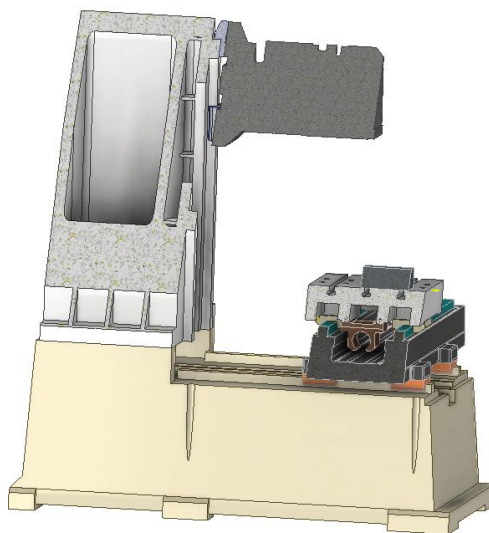


Рисунок 2.6 – Січення колони

$$F := 83308.184 \text{ mm}^2$$

Знаходимо момент інерції перерізу станини:

$$J := \frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{12} = (9.787 \cdot 10^8) \text{ } \textit{mm}^4$$

Визначаємо величину жорсткості і податливості:

$$f := \frac{Px \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J} + \frac{N \cdot Px \cdot l}{G \cdot F} = (1.303 \cdot 10^3) \text{ } \textit{mm}$$

$$j := \frac{1}{f} = (7.672 \cdot 10^{-4}) \frac{1}{\textit{mm}}$$

2.4 Розрахунок безступеневого приводу

Верстат повинен бути так спроектований, щоб забезпечувати ефективні умови обробки. Фрезерні верстати обробляють заготовки із різних матеріалів з різними властивостями, то вони повинні забезпечити регулювання режимів різання в широкому діапазоні.



Рисунок 2.7 – Головні приводи (в розрізі): із пасовою передачею, прямим приводом, редуктором

У більшості сучасних верстатів з ЧПК безступеневий прямий привід або мотор шпиндель котрий здатний налаштовуватися і коректувати швидкість

різання у процесі обробки. Також у шпиндельних вузлах може бути проміжний редуктор. Загальна методика розрахунку приводу наведена нижче. Наш верстат може бути укомплектований трьома типами електродвигунів

Розрахуємо привод головного руху із безступеневим регулюванням.

Вхідні дані: частоти обертання ротора двигуна постійного струму наступні:

$$n_{dmin} := 125 \text{ rpm} \quad n_{dmax} := 8100 \text{ rpm} \quad n_{dn} := 10000 \text{ rpm}$$

$$n_{max} := 1000 \text{ rpm} \quad n_{min} := 50 \text{ rpm}$$

Загальний діапазон регулювання шпинделя визначають за:

$$R_n := \frac{n_{max}}{n_{min}} = 20$$

Загальний діапазон регулювання електродвигуна:

$$R_D := \frac{n_{dmax}}{n_{dmin}} = 64.8$$

Діапазон регулювання електродвигуна при постійній потужності буде:

$$R_{dP} := \frac{n_{dmax}}{n_{dn}} = 0.81$$

Діапазон регулювання електродвигуна при постійному моменті:

$$R_{dM} := \frac{R_D}{R_{dP}} = 80$$

Визначаємо загальний діапазон регулювання шпинделя при постійній потужності:

$$R_p := \frac{R_n}{R_{dM}} = 0.25$$

Визначаємо необхідну кількість ступенів коробки швидкостей :

$$Z_k := \frac{\log(R_p)}{\log(R_{dP})} = 6.579$$

Тоді, приймаємо:

$$R_k := 8$$

Визначаємо діапазон електричного регулювання привода:

$$R_e := \frac{R_n}{R_k} = 2.5$$

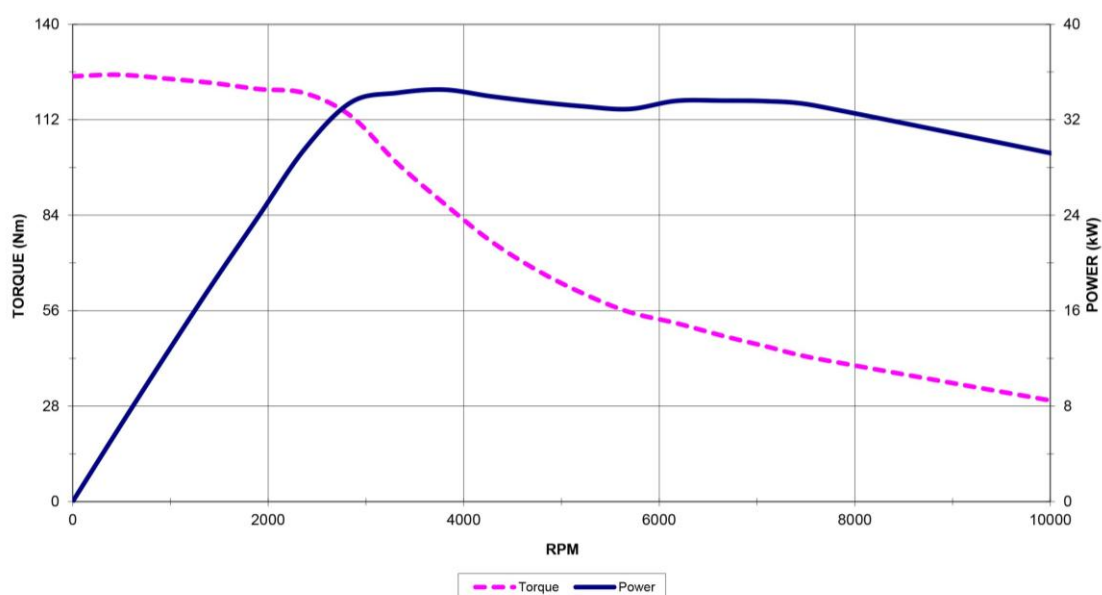


Рисунок 2.8 - Характеристики електродвигуна із прямим приводом, N=22 кВт, n=10000 об/хв.

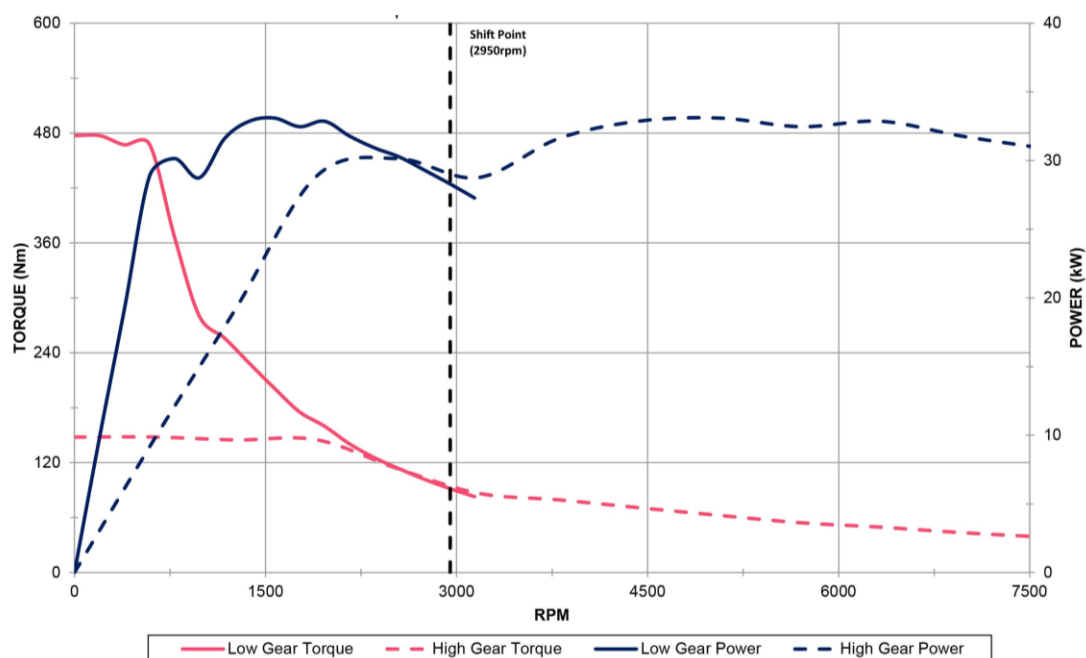


Рисунок 2.9 – Характеристики електродвигуна $N=22$ кВт, $n=7500$ об/хв із редуктором

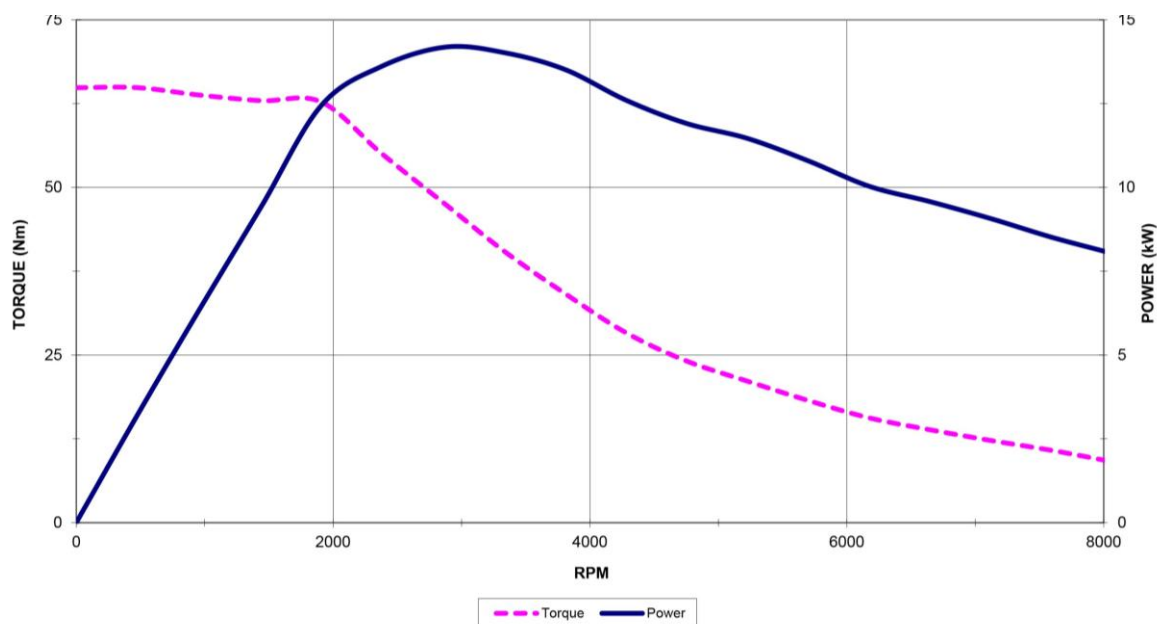


Рисунок 2.10 - Характеристики електродвигуна із пасовою передачею $N=11$ кВт, $n=8000$ об/хв.

У металорізальних верстатах використовують, так звані шпинделі картриджового типу. Це означає, що вони розташовані в корпусі і захищені від забруднення і впливу ЗОР. На відміну від шпинделів інших верстатів в цих

верстатах шпиндель не обливається оливою. Вона подається дозовано до підшипників виключно у зону тертя. Це принцип сухого картеру, як у спортивних автомобілях. За рахунок високої навантажувальної здатності їх конструкція сприймає високі осьові навантаження. Несучі поверхні шпинделів цих верстатів обробляються за одне встановлення, що гарантує взаємне розташування отворів і зовнішніх діаметрів, що зменшує тепловиділення в підшипниках. В таких фрезерних верстатах опори попередньо навантажують. Передні опори розміщені на відстані 60 – 80 мм від середніх площин підшипників що збільшує їх радіальну навантажувальну здатність.

3 ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Методика та план проведення досліджень

Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану конструкції (статичний аналіз) проводять для визначення внутрішніх напружень, прогину та коефіцієнта запасу міцності. Це дає можливість досліднику виявити зони прикладення сил, напрямки їх розподілу та оцінити вплив на інші елементи конструкції. Виконати такі розрахунки аналітично майже неможливо.

Після завершення статичного аналізу, дослідники зазвичай виконують дослідження частот (модальний аналіз) та форми коливань конструкції. Вони не обов'язкові, проте дозволяють оцінити явище резонансу, яка дуже небезпечна для роботи МРВ.

У межах цього дослідження прогину столів нас переважно цікавлять два показники: прогин елементів конструкції під впливом прикладених сил і частотні характеристики з формами коливань. Завдання, які потрібно вирішити, викладено у вступі відповідно до визначеної послідовності.

Для виконання статичного аналізу конструкції верстата використаємо 3D модель верстата Haas VF-1

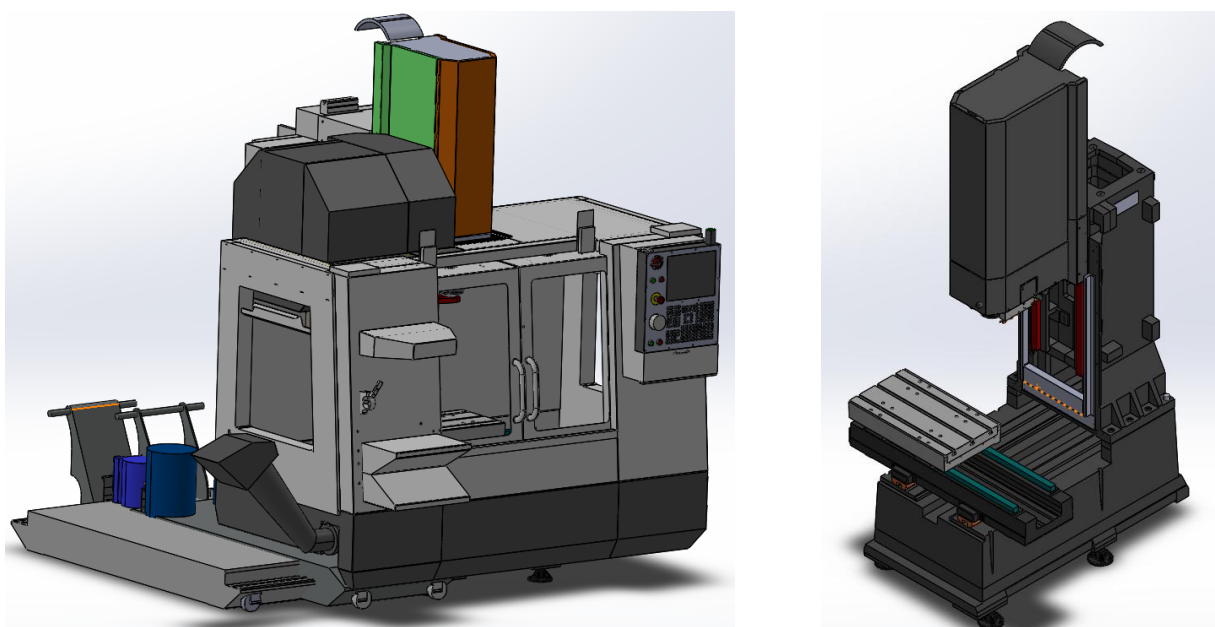


Рисунок 3.1 – 3D модель верста Haas VF-1 із захисним кожухом і без нього

Оригінальна заводська 3Д-модель верстата паренасичена дрібними деталями без вказування матеріалів, для виконання статичного аналізу вона не підходить, тому нами побудована аналогічна.

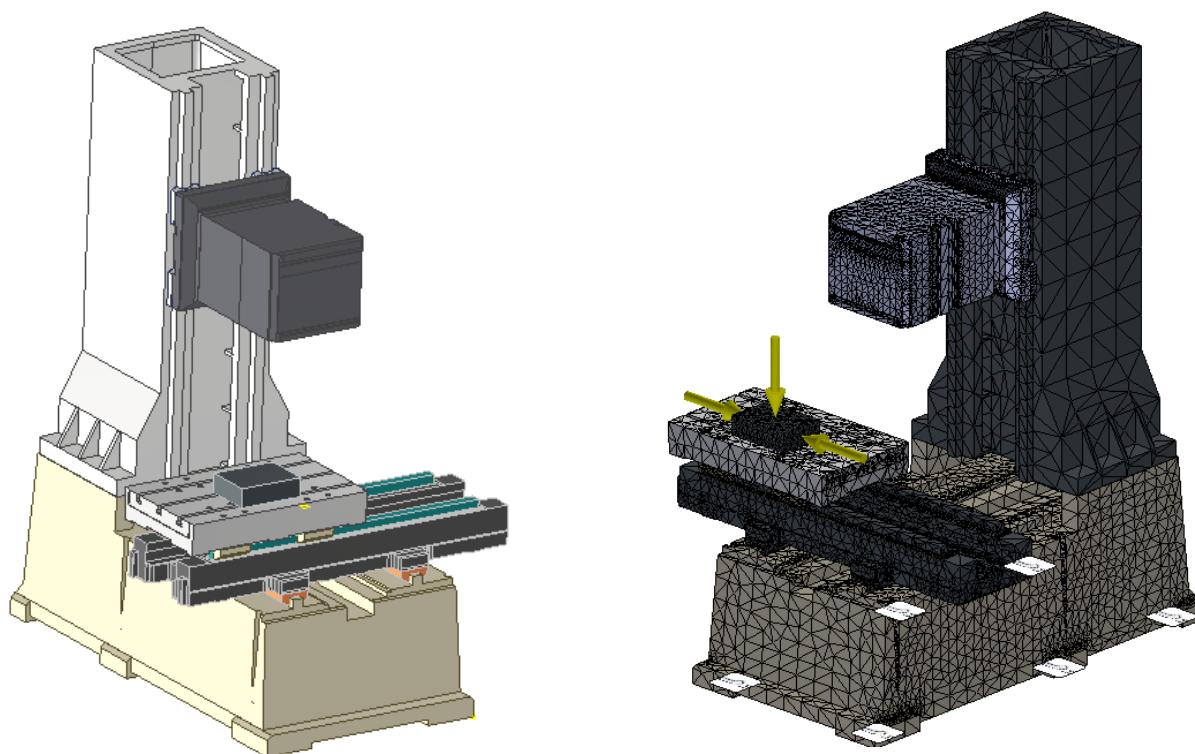


Рисунок 3.2 – Повнорозмірна 3D модель і її сітчаста структура

3.2 Дослідження 3D моделі несучої системи верстата Haas VF-1

Для проведення статичного аналізу несучої системи верстату Haas VF-1 необхідно було побудувати по розмірах 3D модель несучої системи верстата, а саме: колони, станини та стола із заготовкою.

Деталям присвоєно властивість чавуну сірого з якого виготовляють станини верстатів. Вага конструкції поздовжнього стола склала 281 кг, поперечного 133 кг, заготовка 18 кг і загалом це приблизно 434 кг. З силових факторів прикладена силу на заготовку 500 Н і сила затиску заготовки з кожного боку по 300 Н.

Загальна вага з навісним обладнанням верстата складає 3539 кг, а наша 3D модель без навісного має вагу 2362 кг. Можна вважати, що конструкція в цілому вийшла досить легкою за рахунок ребер жорсткості (рис.3.3). Оригінальний стіл

здатний отримувати на собі заготовку вагою 1390 кг.

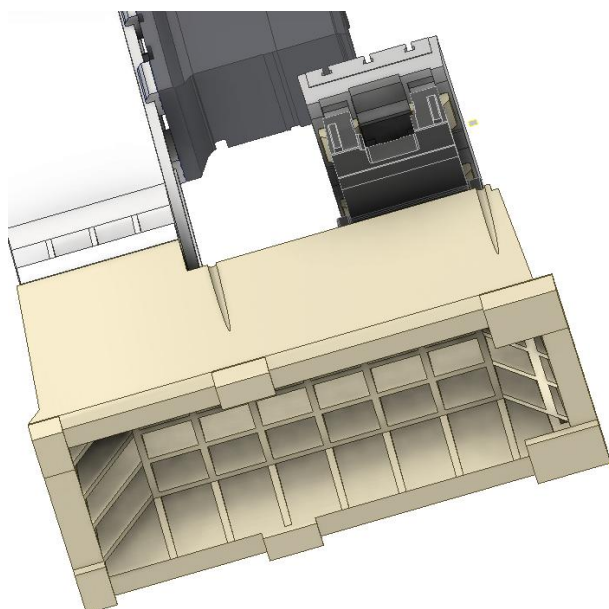


Рисунок 3.3 – ребра жорсткості товщиною 20 мм

Nodes:332819
Elements:204176
Type: Von Mises Stress
Unit: MPa
24.12.2025, 7:00:14

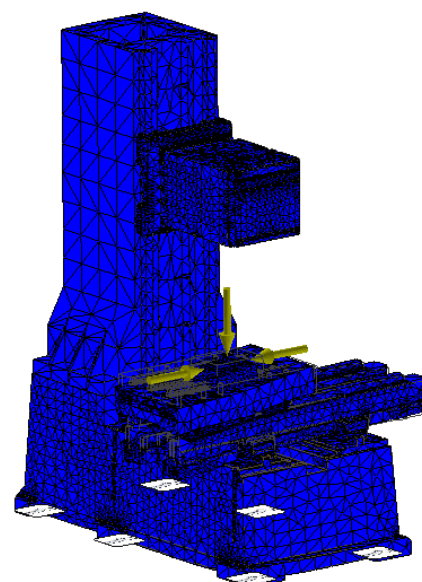
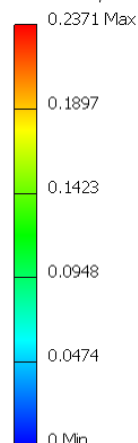


Рисунок 3.4 – напруження по Мізесу

Nodes:332819
Elements:204176
Type: 1st Principal Stress
Unit: MPa
24.12.2025, 7:01:17

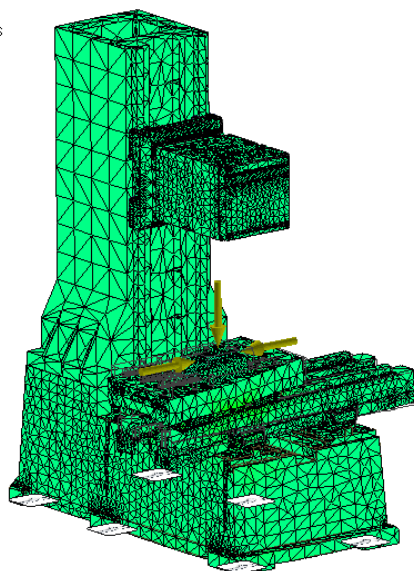
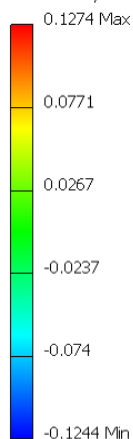


Рисунок 3.5 – 1 навантаження

Nodes:332819
Elements:204176
Type: 3rd Principal Stress
Unit: MPa
24.12.2025, 7:01:49

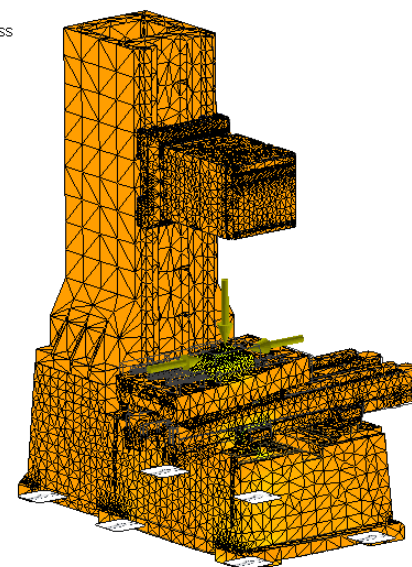
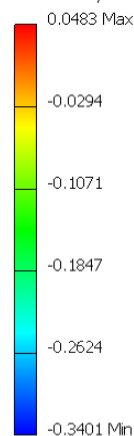


Рисунок 3.6 – 3-є головне навантаження

В статичному аналізі нас найбільше цікавить максимальний прогин вузлів конструкції, оскільки це напряду впливає на точність виготовлення і обробки деталей. Важливо, щоб конструкція була не тільки жорстка і міцна, а ще економічно доцільно у виготовленні. З діаграми прогину конструкції найбільша точка прогину складає максимально $3,9 \times 10^{-4}$. Коефіцієнт запасу міцності складає

15.

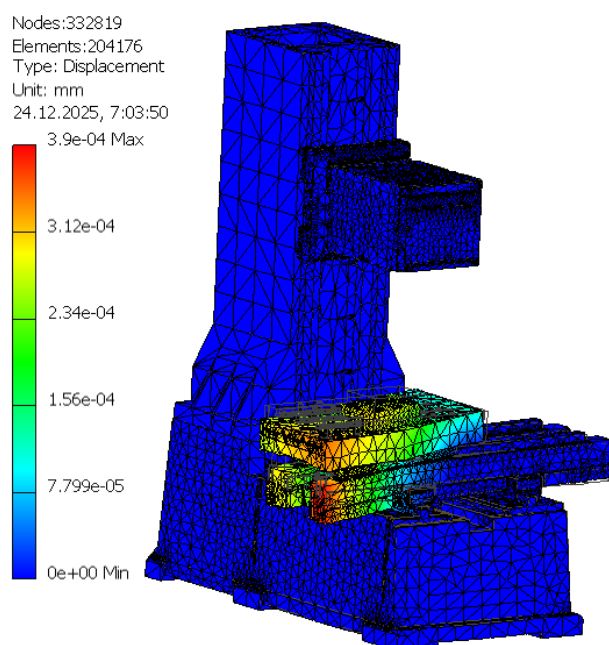


Рисунок 3.7 – діаграма зміщення

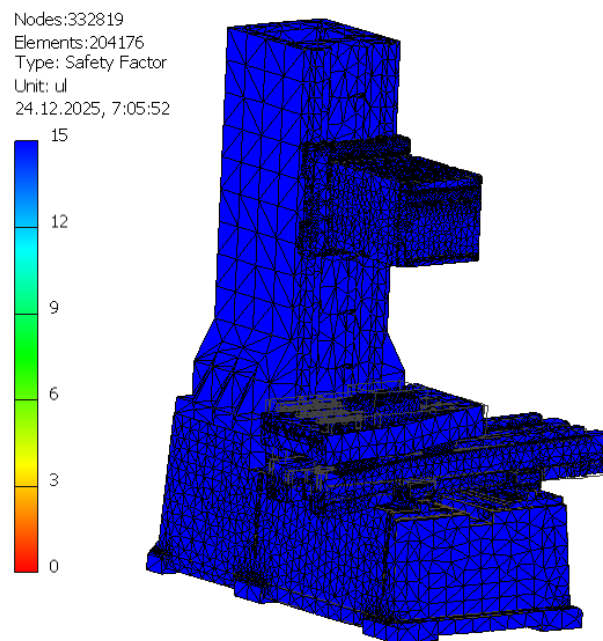
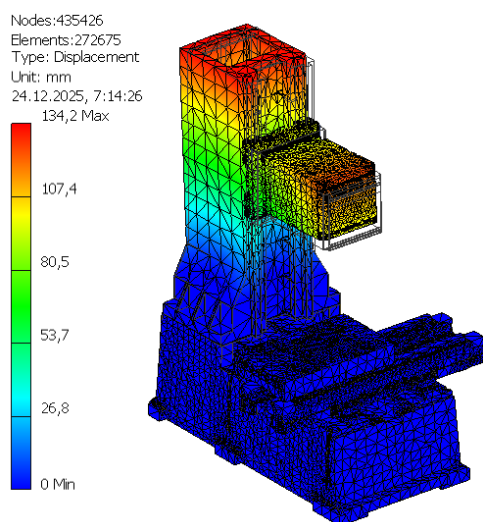
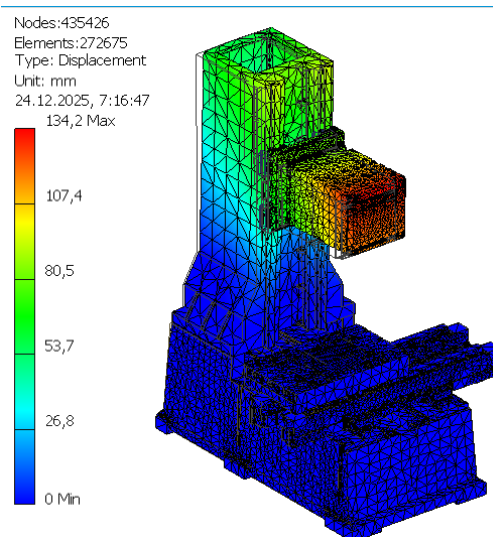


Рисунок 3.8 – Діаграма запасу міцності

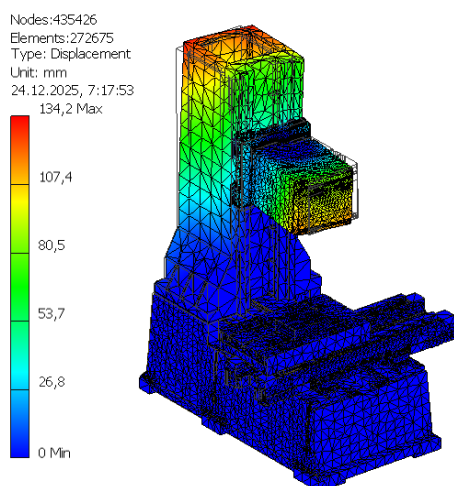
Одним із важливих параметрів, які нас цікавлять, як дослідників – це дослідження власних частот. Його ще називають модальний аналіз. Це таке дослідження для аналізу станини - це чисельне дослідження її власних форм та коливань і власних частот, а також демпфування. Його виконують за допомогою методу скінченних елементів. Він потрібен для того, щоб запобігати резонансу, який виникає внаслідок збудження від шпинделя, двигунів, процесу різання і приводів. Якщо робочі частоти в процесі різання будуть близькі до власних, то може виникнути резонанс – це вібрації шуму втрата точності і втомні руйнування. Аналіз показує, які саме ділянки найбільше деформуються, це показує де додати ребра жорсткості, змінити їх товщини внести корективи. Доцільність полягає в тому, що дешевше дослідити 3D модель, ніж виправляти дослідний зразок.



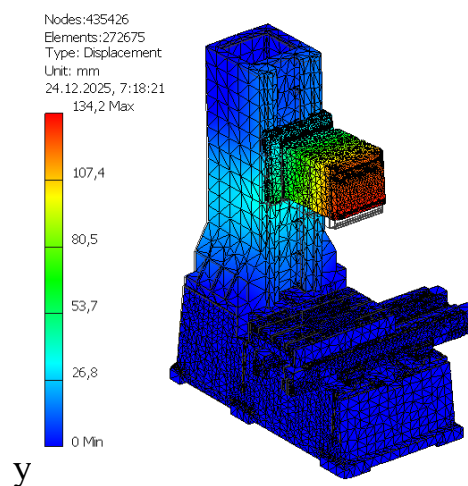
F1=49,89 Hz



F2=71,56 Hz

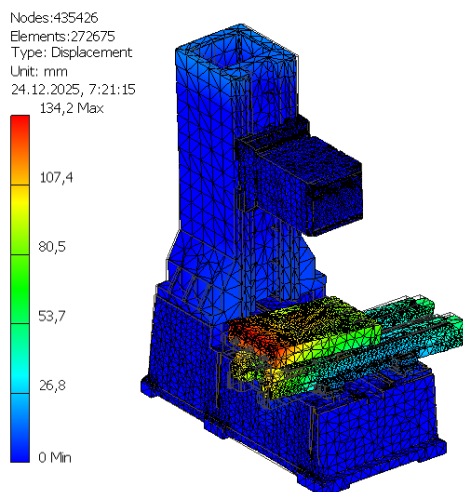


F3=140,16 Hz

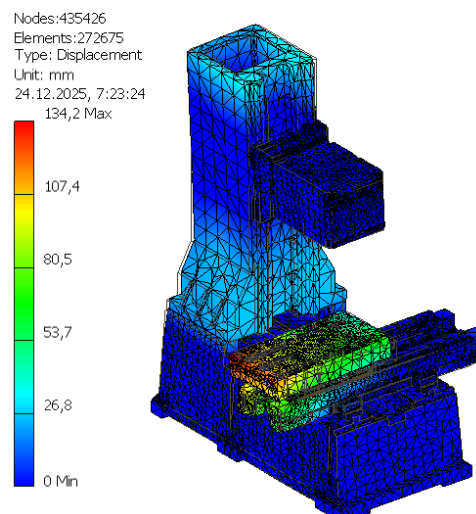


y

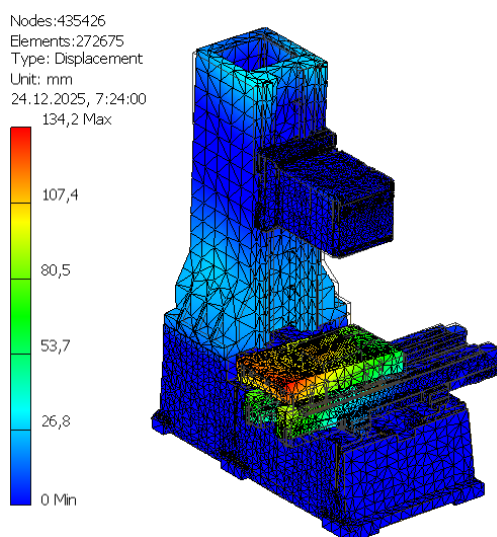
F4=189,28 Hz



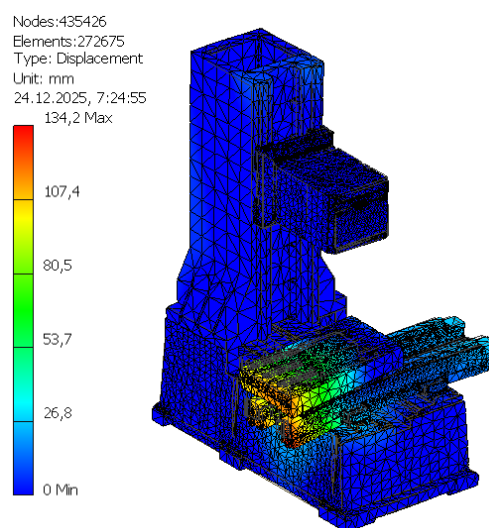
F5=215,07 Hz



F6=238,31 Hz



F7=253,18 Hz



F8=326,64

Частоти коливань станини

3.3 Обговорення та аналіз отриманих результатів* (*оприлюднені результати досліджень подаються в додатках)

В контексті нашого дослідження за тематикою роботи було опрацьовано джерела наукової літератури і практичних рекомендацій виробників, які передбачали вивчення тематики щодо точності переміщення, динаміки столів фрезерних верстатів було опубліковано тези [23]:

А.В. Гагалюк, В.С. Івасечко. Аналіз досліджень динаміки та точності переміщення столів фрезерних верстатів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 81-82

3.4 Висновки за результатами дослідження

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Дослідження 3D моделі це є необхідною і вкрай важливою процедурою, яка забезпечує якісне проектування, довговічність і можливість уникнути помилок на стадії проектування.
2. Проведення статичного аналізу є вкрай важливим, тому що ми бачимо чи

є внутрішні напруження в конструкції. Також ми можемо побачити, як буде конструкція поводитися при від прикладених навантажень дуже важливим є прогин окремих вузлів тому що він впливає на якість і точність обробки

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці під час виконання робіт на фрезерних верстатах

Охорона здоров'я та безпека праці регламентовані ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT) [15]. Стандарт ISO 45001:2018 визначає вимоги до системи управління гігієною та безпекою праці (ГБП) та надає рекомендації щодо її використання, щоб дозволити організаціям забезпечувати безпечні та здорові робочі місця шляхом запобігання травмам та захворюванням, пов'язаним з роботою, а також шляхом проактивного покращення своїх показників у сфері ГБП.

Стандарт ISO 45001:2018 застосовується до будь-якої організації, яка бажає створити, впровадити та підтримувати систему управління ГБП для покращення гігієни та безпеки праці, усунення небезпек та мінімізації ризиків у сфері ГБП (включаючи недоліки системи), використання можливостей у сфері ГБП та усунення невідповідностей у системі управління ГБП, пов'язаних з її діяльністю. Цей розділ містить інструкцію [27] з охорони праці при роботі на фрезерних верстатах без вказання типу.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Дія цієї інструкції поширюється на всі підрозділи підприємства.

1.2. Інструкція розроблена на основі ДНАОП 0.00-8.03-93 «Порядок опрацювання та затвердження власником нормативних актів про охорону праці, що діють на підприємстві», ДНАОП 0.00-4.15-98 «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», ДНАОП 0.00-4.12-99 «Типове положення про навчання з питань охорони праці», ДНАОП 1.1.10-1.04-01 «Правила безпечної роботи з інструментом та пристроями».

1.3. За даною інструкцією фрезерувальник інструктується перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 3 місяці (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносяться в «Журнал реєстрації інструктажів з питань охорони праці»; в журналі після проходження інструктажу

повинен бути підпис особи, яка інструктує, та фрезерувальника.

1.4. Власник повинен застрахувати фрезерувальника від нещасних випадків та професійних захворювань.

В разі пошкодження здоров'я фрезерувальника з вини власника, він (фрезерувальник) має право на відшкодування заподіяної йому шкоди.

1.5. За невиконання даної інструкції фрезерувальник несе дисциплінарну, матеріальну, адміністративну та кримінальну відповідальність.

1.6. До самостійного виконання фрезерувальних робіт допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд та спеціальне навчання для роботи на верстатах, вступний інструктаж з охорони праці, інструктаж на робочому місці та інструктаж з питань пожежної безпеки.

1.7. Інструкція з безпечної експлуатації верстата повинна бути вивішеною на робочому місці.

1.8. Всі рухомі частини верстата повинні бути зачинені та огорожені.

1.9. Підходи до робочого місця та проходи не повинні бути захащені.

1.10. У неробочий час все обладнання робочого місця фрезерувальника повинно знаходитись у положенні, що виключає можливість включення його сторонніми особами.

1.11. Фрезерувальник повинен:

1.11.1. Виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку.

1.11.2. Виконувати тільки ту роботу, яка доручена керівником та по якій проінструктований.

1.11.3. Не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки.

1.11.4. Не допускати присутності на своєму робочому місці сторонніх осіб.

1.11.5. Постійно пам'ятати про особисту відповідальність за додержання правил охорони праці, пожежної безпеки і безпеки товаришів по роботі.

1.11.6. Знати розташування медичної аптечки та вміти надавати потерпілому першу долікарняну допомогу при нещасному випадку.

1.11.7. Знати розташування первинних засобів пожежегасіння та вміти ними

користуватися.

1.11.8. Користуватися за призначенням спецодягом та засобами індивідуального захисту.

1.11.9. Виконувати вимоги технологічного процесу, особливо під час обробки матеріалів з металів та сплавів, які мають схильність до самозапалення (магній, його сплави тощо).

1.12. Основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які можуть діяти на фрезерувальника під час виконання робіт.

- ураження електричним струмом;
- рухомі частини фрезерного верстата та незахищений робочий інструмент;
- підвищені рівні шуму та вібрації;
- падіння заготовок та готових деталей;
- теплові опіки рук при знятті з верстата неохолоджених деталей;
- стружка деталей, які обробляються;
- підвищена запиленість та загазованість робочої зони.

1.13. Фрезерувальник забезпечується спецодягом, спецвзуттям та засобами індивідуального захисту:

- костюм віскозно-лавсановий;
- черевики хромові;
- окуляри захисні.

1.14. Встановлювання та зняття важких заготовок, деталей та пристосувань (масою більше 16 кг) виконувати тільки за допомогою підйомних механізмів.

1.15. Користуватися підйомними механізмами дозволяється фрезерувальникам, які пройшли спеціальне навчання і мають відповідне посвідчення.

1.16. Подані на обробку і оброблені деталі повинні стійко укладатися на підкладках та стелажах, висота штабелів не повинна перевищувати для дрібних деталей 0,5 м, середніх – 1 м, великих – 1,5 м.

1.17. На кожному робочому місці біля верстата на підлозі повинні бути дерев'яні трапи на всю довжину робочої зони і шириною не менше 0,6 м від частин

верстата, що виступають.

1.18. Крім даної інструкції, фрезерувальник повинен також керуватись інструкцією заводу-виготовлювача з безпечної експлуатації верстата, на якому працює.

2. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБОТИ

2.1. Отримати завдання від керівника робіт.

2.2. Вдягти та упорядкувати спецодяг. Застібнути спецодяг на всі гудзики, не допускаючи при цьому звисання кінців одягу. Зашнурувати та зав'язати шнурки на взутті. Прибрати волосся під головний убір.

2.3. Підготувати та перевірити справність необхідного для роботи інструменту та пристосування (згідно з технологічним процесом) та засоби індивідуального захисту.

2.4. Підготувати робоче місце для проведення робіт. Звільнити підходи та проходи до нього. Впевнитись, що робоче місце достатньо освітлене.

2.5. Перевірити наявність та справність дерев'яного настилу біля верстата.

2.6. Перевірити наявність та справність:

2.6.1. Огородження зубчатих коліс, приводних пасів, а також струмоведучих частин електричної апаратури (пускачів, рубильників, кнопок та інше).

2.6.2. Заземлюючих пристроїв.

2.6.3. Запобіжних пристроїв для захисту від стружки, охолоджуючих рідин.

2.7. Підготувати гачки для видалення стружки. Гачки повинні мати гладкі рукоятки та щиток, що запобігає порізам рук стружкою. Не дозволяється застосовувати гачки з ручкою, яка має форму петлі.

2.8. Перевірити на холостому ходу верстат.

2.8.1. Справність органів керування (механізмів головного руху, подачі, пуску, зупинки руху та інше).

2.8.2. Справність системи змащення і охолодження (впевнитись в тому, що мастило та охолоджуюча рідина подаються нормально та безперервно).

2.8.3. Справність фіксації важелів включення та переключення (впевнитись в тому, що можливість самовільного переключення з холостого ходу на робочий

виключена).

2.8.4. Чи нема заїдання або надмірного послаблення в рухомих частинах верстата, особливо в шпинделі.

2.9. Перевірити доброякісність ручного інструменту.

2.9.1. Гайкові ключі повинні відповідати розмірам гайок головок болтів і не мати тріщин та забоїв, площини зіва ключів повинні бути паралельними.

2.9.2. Молотки повинні бути надійно насаджені на дерев'яні ручки і щільно заклинені м'якими, сталевими зайоршеними клинами. Ручка повинна бути прямою, овального перерізу з незначним стовщенням до її вільного кінця. Довжина ручок повинна бути в межах 300-400 мм в залежності від ваги молотка.

3. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1. Перед встановленням на верстат очистити від стружки та мастила деталі, які будуть оброблятися та пристосування, особливо базові та кріпильні поверхні, для забезпечення правильного встановлення і міцності кріплення.

3.2. Перед встановленням фрези необхідно перевірити:

3.2.1. Надійність та міцність закріплення зубців або пластин з твердого сплаву.

3.2.2. Цілісність та правильність заточування пластин з твердого сплаву. Вони не повинні мати викришених місць, тріщин, припикання.

3.3. Якщо ріжучі кромки затупились або викришились, фрезу слід замінити.

3.4. Встановлену і закріплену фрезу слід перевірити на биття. Радіальне і торцеве биття не повинно перебільшувати 0,1 мм.

3.5. Оброблювану деталь встановлювати на верстаті правильно та надійно, щоб під час руху верстата була виключена можливість її вильоту або інші порушення технологічного процесу.

3.6. Деталь необхідно кріпити в місцях, які знаходяться найближче до оброблюваної поверхні.

3.7. Під час закріплення деталі за необроблені поверхні слід застосовувати лещата та пристосування з насічкою на затискних губках.

3.8. Під час застосування для кріплення деталей пневматичних, гідравлічних

та електромагнітних пристосувань, необхідно ретельно оберегати від механічного пошкодження труби подачі повітря чи рідини, а також електропроводку.

3.9. Деталь до фрези надавати тоді, коли вона набере робочу швидкість обертання.

3.10. Під час заміни оброблюваної деталі чи при її вимірюванні фрезу необхідно відвести на безпечну відстань.

3.11. Раніше, ніж вийняти деталь з лещат, патрона чи затискних планок, слід зупинити верстат і відвести ріжучий інструмент.

3.12. Набір фрез встановлювати на оправку необхідно так, щоб їх зубці були розташовані в шаховому порядку.

3.13. Врізати фрезу в деталь слід поступово; механічну подачу включати до стикання деталі з фрезою.

При ручній подачі не допускати різкого підвищення швидкості та глибини різання.

3.14. Під час фрезування не дозволяється вводити руку в небезпечну зону.

3.15. Неробочі частини фрези повинні бути огорожені. Працювати без огороження фрези забороняється.

3.16. Збірні фрези повинні мати пристрої, що запобігають вилітання зубців під час роботи.

3.17. Забороняється застосовувати фрези, що мають тріщини, або поламані зубці.

3.18. Якщо відсутнє огороження робочої зони, слід працювати в захисних окулярах.

3.19. Під час обробки в'язких металів слід застосовувати фрези з стружколомами.

3.20. Отвір шпинделя, хвостовик оправки чи фрези, поверхню перехідної втулки перед встановленням в шпиндель необхідно ретельно очистити, видаливши задирки та протерти. Під час установки хвостовика інструменту в отвір шпинделя треба впевнитись, що він сідає щільно, без люфту.

3.21. Фрезерну оправку чи фрезу закріплювати в шпинделі ключем після

включення коробки швидкості, щоб уникнути прокручування шпинделя.

3.22. Затискування та відтискування фрези ключем на оправці шляхом включення електродвигуна забороняється.

3.23. Під час зняття перехідної втулки, оправки чи фрези з шпинделя необхідно користуватися спеціальною виколоткою, підклавши на стіл верстата дерев'яну підкладку.

3.24. Фрезерувальнику забороняється:

3.24.1. Вмикати та вимикати (крім аварійних ситуацій) обладнання, робота на якому йому не доручалась.

3.24.2. Торкатися руками до обірваних та оголених проводів.

3.24.3. Знімати та встановлювати огорожі робочого інструменту при працюючому верстаті.

3.24.4. Торкатися руками частин верстата, що рухаються.

3.24.5. Виконувати самостійно ремонт електрообладнання верстата, заміну вимикачів, розеток, зіпсованих електрозапобіжників.

3.24.6. Навмисно виводити з ладу запобіжні та блокуючі пристрої верстата.

3.24.7. Прибирати стружку зі столу верстата та проводити чистку ріжучого інструменту під час його роботи.

3.24.8. Залишати робоче місце при працюючому верстаті.

3.24.9. Одягатися та роздягатися біля працюючого верстата.

3.24.10. Працювати в рукавичках.

3.24.11. Працювати тупими, несправними фрезами та пристосуваннями.

3.24.12. Робити обміри оброблюваної деталі при працюючому верстаті.

3.24.13. Використовувати стисле повітря для очистки стола верстата, оброблюваних деталей та одягу.

3.24.14. Тримати на корпусі верстата інструменти, пристосування, заготовки, готові вироби.

3.24.15. Залишати гайковий ключ на головці затяжного болта після встановлення фрези, оправки.

3.24.16. Мити руки маслом, гасом, мастильно-охолоджуючою рідиною та

втитрати забрудненим стружкою обтиральним матеріалом.

3.24.17. Зберігати на робочому місці використаний замаслений матеріал.

3.24.18. Палити на робочому місці та приймати їжу.

3.24.19. Знаходячись на роботі, вживати алкогольні напої та наркотичні речовини.

3.24.20. Використовувати саморобні електрообігрівальні прилади та прилади з відкритою спіраллю.

3.24.21. Опиратися та сидіти на станині верстата.

4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

4.1. Зупинити верстат. Оброблені деталі та робочий інструмент укласти на місце їх зберігання.

4.2. Прибрати робоче місце. Очистити верстат від залишків стружки. Збирати стружку з верстата та підлоги руками забороняється.

4.3. Вимкнути місцеве освітлення та відключити верстат від електромережі.

4.4. Прибрати з робочого місця замаслений обтиральний матеріал у спеціальні герметичні металеві ящики.

4.5. Зняти та очистити спецодяг та засоби індивідуального захисту та укласти їх в місце зберігання.

4.6. Вимити руки та обличчя теплою водою з милом. При можливості, прийняти душ.

4.7. Доповісти керівнику робіт про виконану роботу та про всі недоліки, які мали місце під час роботи.

5. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Аварійна та небезпечна ситуації під час виконання робіт може виникнути у разі: короткого замикання електромережі; пожежі; займання заготовок та деталей з магнію та його сплавів; виривання та розкидання погано закріплених заготовок, ріжучого інструменту; падіння важких деталей; розкидання стружки тощо.

5.2. У разі виникнення аварійної ситуації відключити верстат від електромережі, не допускати сторонніх осіб в небезпечну зону, повідомити про те, що сталося, керівника робіт.

5.3. Якщо є потерпілі, надати їм першу медичну допомогу; при необхідності, викликати швидку медичну допомогу.

5.4. Надання першої медичної допомоги.

5.4.1. Надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом.

У разі ураження електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електроустановку від джерела живлення, а при неможливості відключення – відтягнути його від струмоведучих частин за одяг або застосувавши підручний ізоляційний матеріал.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Правила поведінки в умовах надзвичайної ситуації воєнного характеру

Необхідно:

- зберігати особистий спокій, не реагувати на провокації;
- не сповіщати про свої майбутні дії (плани) малознайомих людей, а також знайомих з ненадійною репутацією;
- завжди мати при собі документ (паспорт), що засвідчує особу, відомості про групу крові свою та близьких родичів, можливі проблеми зі здоров'ям (алергію на медичні препарати тощо);
- знати місце розташування захисних споруд цивільної оборони поблизу місця проживання, роботи, у місцях частого відвідування (магазини, базар, дорога до роботи, медичні заклади тощо). Без необхідності намагатися якнайменше знаходитись поза місцем проживання, роботи та у малознайомих місцях;
- при виході із приміщень, пересуванні сходами багатоповерхівок або до споруди цивільної оборони (сховища) дотримуватись правила правої руки (як при русі автомобільного транспорту) з метою уникнення тисняви. Пропускати вперед та надавати допомогу жінкам, дітям, літнім людям та інвалідам, що значно скоротить терміни зайняття укриття;
- уникати місць скупчення людей;

- не вступати у суперечки з незнайомими людьми, уникати можливих провокацій;

- у разі отримання будь-якої інформації від органів державної влади про можливу небезпеку або заходи щодо підвищення безпеки передати її іншим людям (за місцем проживання, роботи тощо);

- при появі озброєних людей, військової техніки, заворушень негайно покинути цей район;

- посилити увагу і за можливості також залишити цей район у разі появи засобів масової інформації сторони-агресора;

- про людей, які не орієнтуються на місцевості, розмовляють з акцентом, мають нехарактерну зовнішність, здійснюють протиправні і провокативні дії, здійснюють незрозумілу роботу, тощо, – негайно поінформувати органи правопорядку, місцеву владу, військових;

- у разі потрапляння у район обстрілу – сховатись у найближчу захисну споруду цивільної оборони, сховище (укриття). У разі відсутності пристосованих сховищ, для укриття використовувати нерівності рельєфу (канави, окопи, заглиблення від вибухів тощо). У разі раптового обстрілу та відсутності поблизу споруд цивільного захисту, сховища і укриття – ляжте на землю головою в бік, протилежний вибухам. Голову слід прикрити руками (за наявності для прикриття голови використовувати валізу або інші речі). Не виходьте з укриття до кінця обстрілу;

- надавати першу допомогу іншим людям у разі їх поранення. Визвати швидку допомогу, представників ДСНС України, органів правопорядку, за необхідності – військових;

- у разі, якщо ви стали свідком поранення або смерті людей, протиправних до них дій (арешт, викрадення, побиття тощо), слід постаратися з'ясувати та зберегти якнайбільше інформації про них та обставини події для надання допомоги, пошуку, встановлення особи тощо. Необхідно пам'ятати, що ви самі або близькі вам люди, також можуть опинитись у скрутному становищі і будуть потребувати допомоги.

Не рекомендується:

- підходити до вікон, якщо почуєте постріли;
- спостерігати за ходом бойових дій;
- стояти чи перебігати під обстрілом;
- конфліктувати з озброєними людьми;
- носити армійську форму або камуфльований одяг;
- демонструвати зброю або предмети, схожі на неї;
- підбирати покинуті зброю та боєприпаси.

При виявленні вибухонебезпечних предметів забороняється:

- перекладати, перекочувати з одного місця на інше;
- збирати і зберігати, нагрівати і ударяти;
- намагатися розряджати і розбирати;
- виготовляти різні предмети;
- використовувати заряди для розведення вогню і освітлення;
- приносити в приміщення, закопувати в землю, кидати в колодязь чи річку.

Виявивши вибухонебезпечні предмети, вживайте заходів з їх означення, огороження і охороні знайдених предметів на місці виявлення. Негайно повідомити про це територіальні органи ДСНС та МВС за телефоном "101" та "102".

«Екстрена валіза»

Екстрена валіза, як правило, являє собою міцний і зручний рюкзак від 25 літрів і більше, що містить необхідний індивідуальний мінімум одягу, предметів гігієни, медикаментів, інструментів, засобів індивідуального захисту та продуктів харчування. Всі речі повинні бути новими (періодично поновлюваними) і не використовуватись у повсякденному житті. Екстрена валіза призначена для максимально швидкої евакуації із зони надзвичайної події – землетрусу, повені, пожежі, у разі загостреної криміногенної обстановки, епіцентру військових дій і т.д. Вантаж у рюкзаку треба укласти рівномірно. Добре мати рюкзак з “підвалом” (нижнім клапаном).

У рюкзак рекомендується покласти наступне:

- копії важливих документів в поліетиленовій упаковці. Заздалегідь зробіть копії всіх важливих документів – паспорта, автомобільних прав, документів на нерухомість, автомобіль і т.д. Документи треба укласти так, щоб у разі необхідності їх можна було швидко дістати. У деяких джерелах рекомендують серед документів тримати кілька фотографій рідних і близьких;

- кредитні картки та готівку. Нехай у вас буде невеликий запас грошей;
- дублікати ключів від будинку і машини;
- карту місцевості, а також інформацію про спосіб зв'язку і умовлене місце зустрічі вашої родини;

- засоби зв'язку та інформації (невеликий радіоприймач з можливістю прийому в УКХ і БМ діапазоні) та елементи живлення до радіоприймача (якщо потрібні);

- ліхтарик (краще кілька) і запасні елементи живлення до нього, сірники (бажано туристичні), запальничку, свічки;

- компас, годинник (перевагу віддавайте водонепроникним);
- багатофункціональний інструмент, що включає лезо ножа, шило, пилку, викрутку, ножиці тощо;

- ніж, сокиру, сигнальні засоби (свисток, фальшфейер і т.д.);
- декілька пакетів для сміття об'ємом 120 літрів. Може замінити намет або тент, якщо розрізати;

- рулон широкого скотчу;
- упаковку презервативів. Презерватив, за необхідності, може використовуватись для захисту від вологи сірників та запальничок, у якості джгута для зупинки кровотечі, надійного закупорювання ємкостей від комах та піску, перенесення води;

- шнур синтетичний 4-5 мм, близько 20 м;

- блокнот і олівець;

- нитки та голки;

- аптечку першої допомоги. До складу аптечки обов'язково повинні входити:

бинти, лейкопластир, вата, йод, активоване вугілля (інтоксикація), парацетамол (жарознижувальний), пенталгін (знеболююче), супрастин (алергія), имодиум (діарея), фталазол (шлункова інфекція), альбуцид (краплі для очей), жгут, шприци тощо; ліки що ви приймаєте (мінімум на тиждень) з описом способу застосування та дози; рецепти; прізвища та мобільні телефони ваших лікарів (слідкуйте за терміном придатності ліків);

- одяг: комплект нижньої білизни (2 пари), шкарпетки бавовняні (2 пари) і вовняні, запасні штани, сорочку або кофту, плащ-дощовик, в'язану шапочку, рукавички, шарф (може знадобитися в найнесподіваніших ситуаціях), зручне, надійне взуття;

- мініпалатку, поліуретановий килимок, спальник (якщо дозволяє місце);

- засоби гігієни: зубну щітку і зубну пасту, невеликий шматок мила, рушник (є такі в упаковці пресовані), туалетний папір, кілька упаковок одноразових сухих та вологих серветок, кілька носових хусток, засоби інтимної гігієни, бритву, манікюрний набір;

- приналежності для дітей (якщо необхідні);

- посуд (краще металевий): казанок, флягу, ложку, кружку;

- запас їжі на кілька днів – все, що можна їсти без попередньої обробки і не займає багато місця, довго зберігається (не швидкопсувні), наприклад: висококалорійні солодощі (чорний шоколад (з горіхами), жменю льодяників), набір продуктів (тушонка, галети, суп-пакети, м'ясні та рибні консерви), якщо дозволяє місце – крупа перлова, гречана, рис довгозерний, макарони, вермішель, сухі овочеві напівфабрикати, горілка, спирт питний;

- запас питної води на 1-2 дні, який треба періодично оновлювати (вода не повинна бути застоюною).

У літніх людей, інвалідів та дітей є особливі потреби. За необхідності, цей список доповнюється і коригується. Із практики, загальна вага “Екстреної валізи” не повинна перевищувати 50 кілограмів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На основі проведеного інформаційного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що класифікація деталей за масою та габаритними розмірами є визначальним чинником під час вибору металообробного обладнання. Застосування чотирирівневої системи типорозмірів дозволяє обґрунтовано визначати тип верстата, конструкцію та розміри стола, спосіб базування і закріплення заготовок, а також необхідність використання підйомно-транспортних засобів.
2. Обґрунтовано, що конструкція та геометричні розміри стола фрезерного верстата істотно впливають на його експлуатаційні характеристики. Саме стіл сприймає основні навантаження від маси заготовки, сил різання та інерційних впливів, унаслідок чого його жорсткість є однією з ключових складових загальної жорсткості верстата.
3. Показано, що жорсткість верстата безпосередньо визначає допустимі режими різання, стабільність процесу фрезерування, точність обробки та якість поверхонь. Повна жорсткість формується як результат взаємодії жорсткостей станини, столу, напрямних, шпиндельного вузла та контактних елементів конструкції.
4. Встановлено, що для фрезерних верстатів найбільш критичною є жорсткість на згин, яка суттєво зменшується зі збільшенням довжини конструктивних елементів. Це зумовлює необхідність оптимізації форм поперечних перерізів силових елементів, зокрема шляхом застосування коробчастих, рамних і ребристих конструкцій.
5. Доведено, що матеріал силових елементів істотно впливає на жорсткість і стабільність конструкції. Результати чисельних та експериментальних досліджень свідчать про доцільність використання сірого чавуну для виготовлення столів фрезерних верстатів з ЧПК завдяки його високим демпфуючим властивостям та достатній жорсткості.

6. Аналіз експериментальних досліджень динаміки руху столу показав, що параметри швидкості, прискорення та гальмування істотно впливають на точність позиціонування і повторюваність. Найбільші нестабільності спостерігаються на малих швидкостях подачі внаслідок явищ заїдання та ковзання, тоді як зі зростанням швидкості рух стає більш стабільним.
7. Встановлено, що сучасні методи контролю технічного стану верстатів, зокрема ballbar-випробування, лазерна інтерферометрія та застосування LVDT-датчиків, забезпечують комплексну оцінку геометричних, кінематичних і жорсткісних характеристик верстатів без необхідності їх розбирання.
8. За результатами аналізу наукових публікацій підтверджено актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення жорсткості та точності столів фрезерних верстатів з ЧПК, оскільки саме стіл є одним із найбільш навантажених і водночас чутливих до деформацій вузлів технологічної машини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Global Machine Tools Market 2024–2033. URL:
https://www.custommarketinsights.com/report/machine-tools-market/?utm_source=chatgpt.com
- 2 Machine Tools Market Size & Share Analysis - Growth Trends And Forecast (2025 - 2030) URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/machine-tools-market?utm_source=chatgpt.com
- 3 Machine Tools Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Machining Centers,Turning Machines,Grinding Machines,Electrical Discharge Machines), By Application (Machinery Manufacturing,Automobile,Aerospace & Defense), Regional Insights and Forecast to 2030.URL:
https://www.industryresearch.biz/market-reports/machine-tools-market-109851?utm_source=chatgpt.com
- 4 Machine tool producers market share in 2021, by country. URL:
https://www.statista.com/statistics/264213/leading-countries-in-machine-tool-production-based-on-market-share/?utm_source=chatgpt.com
- 5 Zhang, Y., Yang, J., Xiang, S., & Xiao, H. (2013). Volumetric error modeling and compensation considering thermal effect on five-axis machine tools. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227(5), 1102-1115.
- 6 Xiang, S., Yang, J., Fan, K., & Lu, H. (2016). Multi-machine tools volumetric error generalized modeling and Ethernet-based compensation technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 230(5), 870-882. URL:
- 7 Lelen M, Salamacha D. Machine Tool Table Dynamics Tests when Starting and Braking during an Operation Test // Advances in Science and Technology Research Journal 2023, 17(1), 64–74. DOI:
<https://doi.org/10.12913/22998624/157113>
- 8 Jian-xiong Chen, Shu-wen Lin, Xiao-long Zhou, Tian-qi Gu. A ballbar test for

- measurement and identification the comprehensive error of tilt table // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, Volume 103, p. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.12.002>
- 9 Wolny, R. Accuracy Analysis of Milling Machine Based on Test Piece Machining and Measurement, Chapter 04 in DAAAM International Scientific Book 2022, pp.047-058, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria. URL: <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2022.04>
 - 10 Ballbar testing explained. URL: <https://www.renishaw.com/en/ballbar-testing-explained--6818?srsId=AfmBOooMolHH3IPKpJzLIooWwWKGrN3sBzS30uV5jpKeFRS QW0HK7hi4>
 - 11 Kwaśny, W., Turek, P., & Jędrzejewski, J. (2011). Survey of machine tool error measuring methods. Journal of Machine Engineering, 11(4), 7-38. URL: https://www.researchgate.net/publication/282292702_Survey_of_machine_tool_error_measuring_methods
 - 12 Røsjordet J.F., Hovland G. Methods for Experimentally Determining Stiffness of a Multi-Axis Machining Centre // Modeling, Identification and Control, Vol. 40, No. 1, 2019, pp. 11–25. URL: <https://www.mic-journal.no/PDF/2019/MIC-2019-1-2.pdf>
 - 13 Nyein Chan, Than Zaw Oo, Aung Myo San Hlaing. Design and Structural Analysis of 3 Axis CNC Milling Machine Table" Published in International Journal of Trend in Scientific Research and Development (ijtsrd), Volume-3, Issue-6, October 2019, pp. 943-948, URL: <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd29197.pdf>
 - 14 Stejskal, T., Svetlík, J., Dovica, M., Demeč, P., & Král, J. (2018). Measurement of Static Stiffness after Motion on a Three-Axis CNC Milling Table // Applied Sciences, 8(1), 15. URL: <https://doi.org/10.3390/app8010015>
 - 15 Крупа В. В. Теорія технічних систем: особливості побудови, створення та розвитку : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Осадця, 2023. 308 с.

- 16 Крупа В.В., Кобельник В.Р. Призначення режимів різання при точінні табличним методом : Навчальний посібник - практикум. Тернопіль : ФОП ПАЛЯНИЦЯ, 2025. 144 с
- 17 Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках. Тернопіль : Вид-во ТДТУ, 2001. 163 с.
- 18 Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Скляр; під ред. Ю. М. Кузнецова. – Київ : ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.
- 19 Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. / Крижанівський В. А., Кузнецов Ю. М., Валявський І. А., Скляр Р. А. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
- 20 Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: / Кобельник Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2013. - 21 с.
- 21 Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
- 22 Гагалюк А.В., Паливода Ю.Є. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування : навчальний посібник Тернопіль: Осадца Ю. В., 2025. – 308 с.
- 23 А.В. Гагалюк, В.С. Івасечко. Аналіз досліджень динаміки та точності переміщення столів фрезерних верстатів. Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 10-12 грудня 2025 року – Тернопіль: ТНТУ. – С. 18-82.
- 24 Ковбашин В. І., Пік А. І. Інженерна графіка : навч. посіб. м. Тернопіль : Підруч. і посіб., 2023. 240 с.

- 25 Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти / уклад.: В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сеник, Р. А. Склярів, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. 66 с
- 26 ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT) URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88004
- 27 ДНАОП. Законодавча база. Інструкція з охорони праці під час виконання робіт на фрезерних верстатах (33062). URL: <https://dnaop.com/html/33062/doc-instrukcijaz-ohoroni-pracipid-chas-vikonannya-robitna-frezernih-verstatah>

ДОДАТКИ