

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)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження процесів фрезерування інструментами із

демпфуючими властивостями при роботі

на фрезерно-центрувальному верстаті

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи МВм-61  
спеціальності \_\_\_\_\_

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Хом'як В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

Луців І.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кобельник В.Р.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кобельник В.Р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_

(підпис)

(прізвище та ініціали)

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

Кобельник В.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 14 » листопада 2022 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Хом'як Василь Андрійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Дослідження процесів фрезерування інструментами із демпфуючими властивостями при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті

Керівник роботи Луців Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » листопада 2022 року № 4/7-908

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи Типовий технологічний процес обробки деталі, паспорт

Фрезерно-центрувального верстату.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналітичний розділ. Мета і задачі дослідження. 2) Технологічні передумови обробки поверхонь фрезеруванням.

3) Обґрунтування конструкції верстату. Математичний відбір компоновки. Структура

4) Розрахунок і конструювання елементів верстату (шпиндельного вузла). 5) Математична

модель нерівномірності процесу фрезерування 6) Обґрунтування використання

демпфуючих елементів при фрезеруванні 7) Аналіз конструкцій інструментів із

демпфуванням. 8) Охорона праці і безпека життєдіяльності. 9) Висновки

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

1) Тема, мета роботи, об'єкт і предмет дослідження; завдання роботи.

2) Технологічні передумови обробки фрезеруванням. Актуальність теми

3) Аналіз формоутворення поверхонь при обробці фрезеруванням

4) Вибір раціональної компоновки компоновки верстату

5) Конструкція формоутворюючого вузла верстату

6) Математична модель нерівномірності процесу фрезерування

7) Обґрунтування використання демпфуючих елементів при фрезеруванні

8) Результати наукових досліджень. Конструктивні схеми фрез із демпфуванням

9) Наукова новизна і практичне значення

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Сеник А.А., к.т.н., ас. каф ВІ		
Безпека надзвичайних ситуацій	Клепчик В.М., ст. викладач каф. ОХ		
Нормоконтроль	Кобельник В.Р., к.т.н., доц.,зав. каф. ВІ		

7. Дата видачі завдання

14 листопада 2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд та аналіз проблематики кваліфікаційної роботи	Тиждень 1	
2	Інформаційно-патентний пошук. Актуальність	Тиждень 1	
3	Постановка мети і завдань дослідження	Тиждень 1	
4	Опис та обґрунтування конструкцій фрезерно-центрувальних верстатів	Тиждень 2	
5	Технологічні передумови створення верстату	Тиждень 2	
6	Розробка схем формоутворення	Тиждень 2	
7	Обґрунтування і відбір компоновки верстату	Тиждень 2	
8	Конструювання формоутворюючого вузла верстату	Тиждень 3	
9	Розробка методики наукових досліджень	Тиждень 4	
10	Розвиток моделі нерівномірності фрезерування	Тиждень 4	
11	Обґрунтування використання демпфуючих елементів	Тиждень 4	
12	Побудова математичної моделі регулювання в процесі фрезерування	Тиждень 5	
13	Конструювання інструментів із демпфуючими властивостями	Тиждень 5	
14	Охорона праці щодо об'єкту	Тиждень 6	
15	Розроблення засобів безпека життєдіяльності	Тиждень 6	
16	Оформлення кваліфікаційної роботи	Тиждень 6	
17	Захист кваліфікаційної роботи	Тиждень 6	

Студент

(підпис)

Хом'як В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Луців І.В.

(прізвище та ініціали)

## Зміст

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА .....	1
ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ .....	2
РЕФЕРАТ.....	6
АНОТАЦІЇ.....	9
Вступ.....	12
1. Аналітичний розділ .....	14
1.1. Аналіз основних проблемних завдань кваліфікаційної роботи .....	14
1.2. Елементи інформаційно-патентного пошуку .....	15
1.2.1 Короткий опис процесу фрезерування.....	15
1.2.2 Фактор нерівномірності процесу фрезерування .....	15
1.2.3 Особливості динаміки процесу фрезерування.....	23
1.2.4 Моделі динаміки процесу фрезерування .....	25
Висновки по розділу 1, постановка мети та задач дослідження.....	27
2. Дослідно-проектний розділ .....	29
2.1. Аналіз відомих констукційних фрезерних верстатів різної будови .....	29
2.2. Аналіз формоутворень поверхонь і відповідних рухів верстату .....	39
2.3 Створення компанувальної схеми .....	33
2.4. Кінематичні розрахунки .....	39
2.5. Побудова кінематичної схеми .....	42
2.6. Розрахунок потужностей двигуна .....	45
2.7 Розрахунок елементів головки .....	48
2.8 Розрахунок шпиндельного вузла на жорсткість .....	51
Висновки по розділу 2 .....	55
3. Науково-дослідна частина .....	56
3.1. Мета і порядок наукових досліджень .....	56
3.2. Структурна технічної системи фрезерно-центрувально напівавтомата .....	57
3.3. Приципи регулювання процесу фрезерування .....	65
3.4. Технічні конструктивні рішення для зменшення нестабільності процесу фрезерування .....	69
3.5. Аналіз конструкції фрез із демпфувальними елементами .....	72
3.6. Розробка моделі динамічного збурень при фрезеруванні .....	76

3.7 Матиматична модель коливань інструменту при фрезеруванні із динамічними збуренням .....	80
Висновок наукового дослідження .....	90
4 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	91
4.1 Вимоги охорони праці при роботі на фрезерних верстатах.....	91
4.2 Безпека з надзвичайних ситуацій при роботі по фрезерних верстатах .	95
Висновки до розділу 4 .....	98
Загальні висновки.....	99
Бібліографія .....	101
Додатки .....	103

## РЕФЕРАТ

**Тема роботи.** Дослідження процесів фрезерування інструментами із демпфуючими властивостями при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті

**Мета дослідження** полягає у підвищенні ефективності роботи при зниженні нерівномірностей фрезерування на основі застосування демпфувальних елементів у інструментах.

**Об'єкт дослідження** - процес різання при роботі фрезерно-центрувального верстату

**Предмет дослідження** —закономірності керування навантаженнями на фрезерний верстат при фрезерно-центрувальній операції.

Виконання поставленої у кваліфікаційній роботі мети дослідження дозволило отримати такі основні **результати**:

1. Здійснений аналіз основних існуючих досліджень вчених як в Україні, так і закордоном стосовно досягнення результатів щодо зростання ефективності фрезерування плоских поверхонь, і на основі аналітичного огляду математичного моделювання засобів уникнення впливу нерівномірностей роботи при фрезеруванні запропоновані завдання кваліфікаційної роботи.
2. Показані ключові передумови впливу технології обробки плоскої поверхні деталі на фрезерно-центрувальному верстаті для розроблення принципових технічних рішень щодо конструкції верстату.
3. Показані формоутворюючі фактори утворення оброблюваної поверхні деталі і представлена процедура визначення раціональної компоновки фрезерно-центрувального верстату.
4. На основі кінематичних і силових розрахунків стосовно до приводу головного руху розроблена кінематична схема верстату і на її основі спроектовані формоутворюючі елементи цього приводу. Так здійснене конструювання формоутворюючого вузла верстату.

5. Проведений аналіз нерівномірностей, які супутні до процесу фрезерування та показані їх причини та їх зменшення за рахунок застосування демпфувальних елементів у інструментах. Розроблені конструктивні схеми таких елементів.
6. Розроблена математична модель динамічного впливу демпфувальних елементів на згладжування нерівномірних товщин зрізу .
7. Проведений оціночний аналіз динамічних навантажень при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті при застосування класичних інструментів та інструментів із демпфувальними властивостями..
8. Показані необхідні заходи з охорони праці, а також запропонована і відповідна безпека життєдіяльності.

**Наукова новизна** даної роботи така:

1. В результаті виявлення причин зниження ефективності процесу фрезерування науково обгрунтовані рекомендації щодо застосування демпфувальних елементів у конструкціях фрез.
2. Розроблена математична модель динамічного протікання процесу фрезерування з врахуванням його нерівномірності при порівнянні традиційної роботи та застосування демпфувальних елементів.

**Практичне значення результатів .**

1. Проведений вибір раціональної структури компоновки фрезерного верстату.
2. Запропоновані схеми конструкцій фрез з демпфувальними елементами для зниження нерівномірних навантажень в процесі фрезерування.

**Апробація досліджень** полягає у презентації тез доповіді на міжнародній студентській науково-технічній конференції «Актуальні задачі сучасних технологій» 7-8 грудня 2022 року, [25].

Структура роботи: вступ, 4 розділи, висновки по роботі, перелік використаних джерел (29 позицій), 4 додатки.

Обсяг тексту – 102 сторінок. Робота містить 3 таблиць, 44 рисунків.



## АНОТАЦІЇ

Хом'як В.А. " Дослідження процесів фрезерування інструментами із демпфуючими властивостями при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті". 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2022 р.

Кваліфікаційна робота стосується результатів, отриманих стосовно до застосування фрез із використанням демпфувальних елементів при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті і дослідження цього процесу. Метою роботи передбачається досягнути підвищення ефективності процесу фрезерування на вказаному верстаті стосовно зменшення впливу нерівномірностей цього процесу при застосуванні у інструментах демпфувальних елементів. Описані дослідження стосовно процесу фрезерування, що містяться у наукових працях відомих вчених України та закордону. Значна увага приділена існуючим математичним моделям що описують процес фрезерування. Проведений аналіз технології обробки деталі на фрезерно-центрувальному верстаті і власне сам процес здійснення фрезерування у фрезерно-центрувальній операції. В результаті аналізу формоутворення плоских поверхонь фрезами за допомогою відбору на основі математичних методів запропонована раціональна компоновка фрезерно-центрувального верстату. Модель-аналог такого верстату послужив основою наступного конструювання. Для цього здійснені кінематичні розрахунки, розроблена кінематична схема і спроектована конструкція формоутворюючого вузла фрезерно-центрувального верстату. Для проведення наукових досліджень розроблена їх послідовність. Підставою для аналізу послужили відомі дослідження щодо формування нерівномірностей фрезерування, які пов'язані із дискретністю процесу. Запропонована і обґрунтована пропозиція щодо застосування демпфувальних елементів у інструментах при здійсненні фрезерування. Розроблена динамічна модель поведінки інструменту з врахуванням нерівномірностей процесі для випадків класичного різання і застосування інструменту із демпфуванням. В роботі

надані заходи з охорони праці і запропоновані заходи щодо безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: фреза, фрезерно-центрувальний верстат, нерівномірність фрезерування, демпфувальні елементи

Khoimiak V. «Study of milling processes with tools with damping properties when working on a milling and centering machine». 133 – Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2022.

The Qualification Paper concerns the results obtained in relation to the use of milling cutters with damping elements when working on a milling and centering machine and the study of this process. The objective of the Paper is to achieve an increase in the efficiency of the milling process on the specified machine in terms of reducing the influence of the irregularities of this process when using damping elements in tools. Researches related to the milling process comprised in the scientific works of well-known scientists of Ukraine and abroad are described. Considerable attention is paid to the existing mathematical models describing the milling process. The analysis of the machine part manufacturing process on the milling and centering machine and the actual process of milling in milling centering operation was carried out. As a result of the analysis of the formation of flat surfaces by cutters while using the selection based on mathematical methods a rational layout of the milling and centering machine is proposed. An analog model of such a machine served the basis of the following design. For this, kinematic calculations were carried out, a kinematic scheme was developed and the construction of the forming unit of the milling and centering machine was designed. The sequence of steps has been developed for carrying out scientific research. The basis for the analysis lies in the known research on the formation of milling irregularities, which are related to the discreteness of the process. The proposal regarding the use of damping elements in tools during milling was proposed and substantiated. A dynamical model of tool behavior was developed, taking into account process irregularities for cases of classical cutting and using a

tool with damping. The Paper provides labor protection measures and proposed measures for life safety.

Key words: milling cutter, milling and centering machine, milling irregularities, damping elements.

## Вступ

Металорізальні верстати є основною частиною машинобудівних заводів. Розвиток верстатобудування в значній мірі сприяє удосконаленню машин загалом. Поряд із іншими прогресивними технологічними машинами металорізальні верстати забезпечують виготовлення обладнання з високими якісними характеристиками. Підвищення ефективності парку металорізальних верстатів пов'язане із їх автоматизацією, застосуванням програмного керування, використання прогресивних інструментів та нових матеріалів, зокрема композиційних.

Серед металорізальних верстатів значну долю займають верстати фрезерної групи. Їх удосконалення і модернізація залежить від створення передумов підвищення швидкостей формоутворюючих рухів, що визначає зростання продуктивності верстатів. Ці моменти пов'язані із забезпеченням надійності як верстатів, так і інструментів і, зрештою технологічної обробної системи загалом.

Тому збільшення ефективності техніко-економічних показників металорізальних верстатів, зокрема і фрезерних, визначається забезпеченням їх основних характеристик. Забезпечення цих характеристик зумовлене особливостями самого процесу фрезерування.

Вивчення процесу фрезерування для різних схем обробки дозволяє виявити основні причини, які стримують зростання продуктивності фрезерування та зниження його якості та точності поверхонь, які отримують як результат оброблення. Це стосується значною мірою особливо відповідальних поверхонь деталей. В даний час застосування прогресивних пристроїв і систем дозволяють досягнути реальних похибок, що вимірюються долями мікрометрів.

Якість процесу фрезерування значною мірою визначається його динамічними характеристиками, бо за своєю сутністю сам процес є почерговим різанням окремих зубів, які впливають один на одного і на обробну систему загалом.

Цим визначається негативний вплив нерівномірності фрезерування на параметри вібростійкої роботи як фрези, так і верстату. Тому засоби захисту від неприпустимих коливань для фрезерних верстатів набувають особливої ваги. Серед таких засобів можна використати демпфувальні елементи у конструкціях збірних фрез.

Серед інших завдань, які необхідно забезпечити для якісної роботи фрезерного обладнання є створення на основі удосконалених технологічних процесів прогресивних компоновок верстатів, модернізацію формоутворюючих вузлів, підвищення їх динамічної якості за рахунок застосування відповідних схем встановлення підшипників, конструювання компактних приводів затиску інструментів, обґрунтоване використання систем ЧПК, забезпечення точності позиціонування при роботі рухомих вузлів.

Вказані особливості формують актуальність виконуваної кваліфікаційної роботи. Вона визначається важливістю як наукової складової, так і практичного значення магістерського пошуку.

Тому визначення для предмету розгляду фрезерно-центрувального верстату і інструментів, які використовуються – фрези, у сукупності із дослідженням власне процесу фрезерування із використанням для підвищення динамічної стабільності процесу демпфувальних елементів є актуальним.

## **1. Аналітичний розділ**

### **1.1. Аналіз основних завдань щодо вирішення їх у кваліфікаційній роботі**

З метою вивчення розглядуваної у кваліфікаційній роботі проблематики та постановки мети і задачі дослідження виглядає доцільним провести аналітичний огляд відомих наукових і прикладних праць щодо питань підвищення ефективності фрезерування та визначення стримуючих факторів зростання вказаної ефективності, які виявляються у особливостях протікання робочого процесу, зокрема динамічних характеристик фрезерування.

Тема роботи пов'язана із роботою фрезерно-центрувального верстату. Тому необхідним є розгляд технологічних особливостей відповідної технологічної операції, визначення режимів оброблення та інших характеристик. Таке вивчення технологічних передумов дозволить прояснити основні рухи формоутворення, що реалізуються, та підійти до вирішення питання математично обґрунтованого вибору раціонального компоновочного рішення для верстату, що розглядається. При цьому слід врахувати взаємне розміщення поверхонь заготовки, що обробляється, і різальних інструментів. Компоновка верстату також створює передумови гарантування точності обробки. Таким чином, необхідно забезпечити необхідну структуру компоновки верстату. На основі компоновочного рішення приймається остаточний варіант кінематичної схеми верстату із відповідно прорахованими кінематичними параметрами та характеристиками приводу.

Завданням роботи також є розроблення конструкції одного із формоутворюючих вузлів. Така розробка супроводжується необхідними розрахунками і завершується створенням складального креслення вузла і загального вигляду верстату загалом.

В науковій частині необхідно проаналізувати основні фактори, які стримують підвищення ефективності робочого процесу і не сприяють динамічній стабільності фрезерування. Це, по-перше, нерівномірність

здійснення фрезерування, викликана його конструкторсько-технологічними особливостями, а також фактори динамічного характеру. Їх вплив можна зменшити, якщо застосовувати при фрезеруванні інструменти із демпфувальними елементами, які можуть стримувати вібрації. Такий підхід доцільно супроводити елементами структурного синтезу демпфувальних фрез. Також слід провести динамічний аналіз процесу фрезерування для двох випадків: традиційного варіанту і варіанту із застосуванням демпфувальних пристроїв. Вибір способів демпфування доцільно науково обґрунтувати у конструкціях відповідних інструментів, особливості яких треба описати. Доцільно навести рекомендації щодо застосування запропонованих інструментів при роботі фрезерно-центрувального верстату..

Завданням на кваліфікаційну роботу визначено за необхідно також передбачити конкретні засоби з охорони праці та представити обґрунтовані пропозиції в рамках розгляду питань безпеки життєдіяльності.

## **1.2. Інформаційний пошук**

### **1.2.1. Короткий опис процесу фрезерування**

Аналітичний огляд кваліфікаційної роботи розпочнемо із опису фрезерувального процесу, [1]. Це високопродуктивний технологічний спосіб оброблення різанням, як правило, плоских поверхонь деталей машин, [2].

Загалом фрезеруванням обробляють зовнішні і внутрішні, плоскі і фасонні поверхні. Це особливо стосується важелів, планок, корпусних та інших деталей, що не є поверхнями обертання. Цим методом місцеві вирізи і зрізи, прорізають прямі і гвинтові канавки, нарізають зуби коліс і різьби.

Оброблення здійснюють багатолезовим інструментом – фрезами різноманітних профілів і конструкцій. Так, площини фрезерують, як правило, торцевими і циліндричними фрезами. Особливий випадок – фрезерування плоских торців при фрезерно-центрувальних операціях. Фрезерування таких поверхонь можна віднести до фрезерування торцевими фрезами.

Цей метод є дуже продуктивним, і більш продуктивним, ніж фрезерування циліндричними фрезами, [3]. Характерним є те, що при фрезеруванні процес різання відбувається із одночасним залученням декількох зубів фрези.

Процес фрезерування можна звести до двох способів, [4]. Зустрічне фрезерування передбачає випадок, коли фреза обертається проти напрямку подачі (рис. 1.1,а). При способі попутного фрезерування, виявляється, що напрям, в якому обертається фреза, співпадає з подачею (рис. 1.1,б)

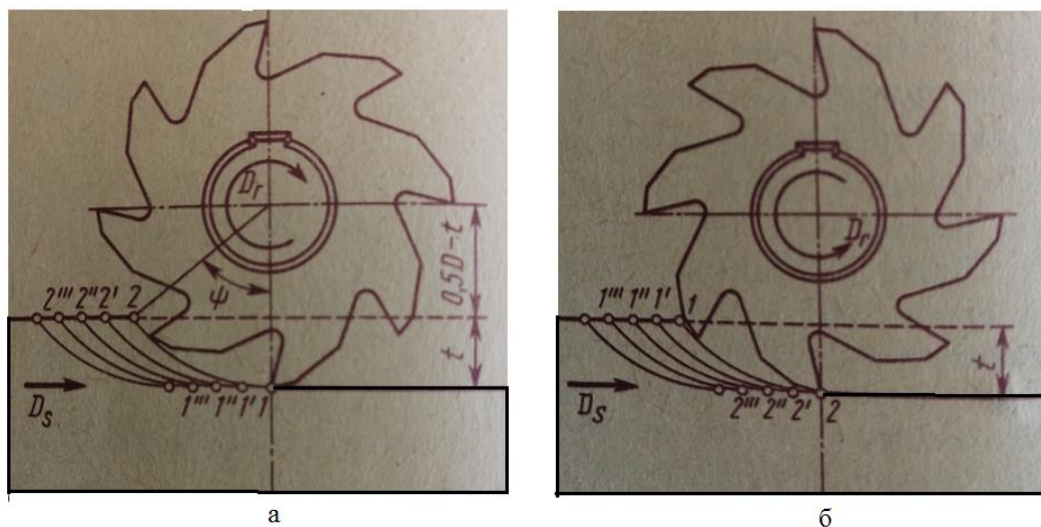


Рисунок 1.1 – Зустрічне фрезерування (а) і попутне фрезерування (б)

Оброблення здійснюється на фрезерних верстатах. Як і більшість верстатів – це технічні системи із високим ступенем складності, [5], і яскраво вираженою динамічною поведінкою, [6,7] та можуть розглядатись як об'єкти теорії автоматичного керування, [8].

Розглядають фрезерні верстати загального призначення, а також спеціалізовані і спеціальні. До верстатів загального призначення відносять горизонтальні, вертикальні і поздовжньо-фрезерні верстати. Серед спеціалізованих верстатів слід виділити шпоночно-фрезерні, копірувально-фрезерні, різе-фрезерні, а також розглядуваний в роботі фрезерно-центрувальний верстат.

За конструктивними особливостями фрезерні верстати поділяють на консольні (коли стіл розміщений на підйимальному кронштейні), без



консольні (стіл переміщається на нерухомій станині у поздовжньому і поперечному напрямках ), а також неперервної дії (карусельні і барабанні).

У всіх фрезерних верстатах головним рухом є обертання фрез. Основними розмірами, що характеризують фрезерні верстати, є розміри, що залежать від розмірів оброблюваних заготовок, що закріплюються на столі. Тому рекомендують конструкції верстатів, що мають такі розміри робочої поверхні стола: ширина 100...5000 мм, довжина 400...16000 мм і більше[1].

Очевидно, що під час оброблення заготовок на верстатах в результаті взаємодії виникають зусилля, що, [9,10], є наслідком взаємодії інструменту та заготовки. Вказані зусилля можуть носити різний характер. В більшості випадків їх змінність чинить негативний вплив стосовно якості процесу оброблення поверхонь деталей.

Торцеве фрезерування серед інших операцій грає значну роль. Відомо, що торцеві фрези відрізняють за величиною кроку зубів. Крок зубів – це відстань між сусідніми зубами. Ця величина для кожного діаметра визначається кількістю зубів  $z$ .

Типорозміри фрез передбачають три варіанти. При цьому крок зубів вважається великим, нормальним і дрібним. Наприклад, для фрези із діаметром 80 мм використовують великий крок, якщо кількість зубів – 4, для нормального кроку – кількість зубів є 6, для дрібного – 8.

Найбільш часто застосовуваний для торцевих фрез – нормальний крок. При цьому для важких умов різання або ж на нежорстких верстатах застосовують фрези із великим кроком. При цьому – значний виліт інструменту і невелика потужність приводу при невеликих подачах. Щодо фрез зі більшою кількістю зубів – дрібним кроком, то їх застосовують на верстатах великої потужності із значними подачами. Очевидно що такі фрези забезпечують більшу стабільність процесу фрезерування.

У практичній літературі щодо процесу фрезерування вказується, що підвищення його ефективності стримується втратою динамічної стабільності власне обробної системи, а також зниженими показниками надійності фрез.

Такі обмеження викликані з'явою неприпустимих автоколивань високої амплітуди. При цьому стримується зростання продуктивності оброблення, погіршується точність і якість поверхонь, що обробляються, падає термін служби інструментів та обладнання.

Тому актуальним є вивчення факторів, що стримують підвищення ефективності фрезерування і знижують його стабільність, тобто нерівномірності процесу і динамічних коливань, [2,6,11] .

### 1.2.2. Фактор нерівномірності процесу фрезерування

Стосовно схем фрезерування (зустрічного і попутного), то є зрозумілим, що попутне фрезерування характеризується значними прикладеними силами різання і різким їх зростанням при входженні зубів фрези у тіло заготовки. Тому більш часто застосовують зустрічне фрезерування, при якому товщина стружки формується поступовим зростанням по мірі того як ця товщина збільшується від різання кожного зуба. Максимальне значення товщини зрізу –  $(a)_{max}$ .

Формування товщини зрізу при зустрічному фрезеруванні можна зобразити як показано на рис. 1.2.

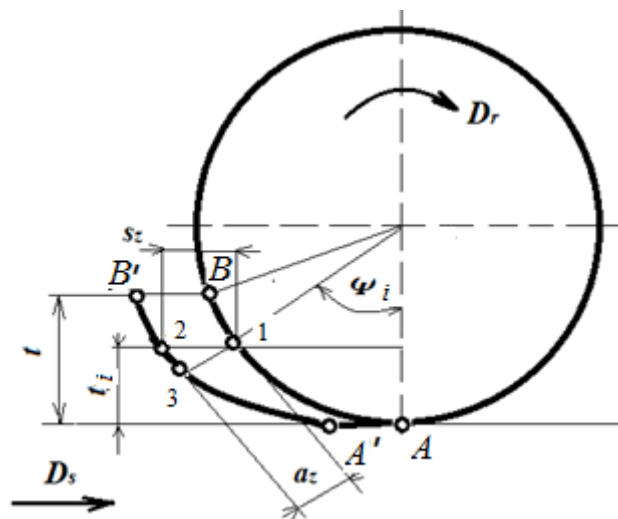


Рисунок 1.2 - Схема формування товщини зрізу при різанні зубом фрези

При цьому дуга  $A-B$  розглядається наближено як частина кола діаметром  $D$ . Наступний зуб врізається у заготовку в точці  $A'$ . Далі зуб утворює траєкторію  $A'-B'$ , яку теж можна вважати частиною кола.

Товщину  $a_z$  зрізу, що формується одним зубом фрези, визначають по нормалі між точками вказаних дуг вздовж радіуса. При цьому відрізок 1-2 фактично є подачею  $s_z$  на один зуб.

Зрозуміло, що будемо мати справу із прямокутним трикутником 1-2-3. Візьмемо до уваги кут  $\psi_i$ . Тоді миттєве значення товщини зрізу матиме вигляд

$$a_z = s_z \sin \psi_i,$$

причому кут  $\psi_i$  легко визначити як

$$\cos \psi_i = 1 - 2t_i / D,$$

де  $t_i$  – миттєва величина глибини.

Маємо, що загалом товщина зрізу одним зубом фрези виявляється величиною змінною. Її можна представити як функцію подачі на зуб. При цьому ця товщина також залежить від миттєвої глибини різання і діаметру власне фрези.

Отже, максимальне значення товщини зрізу для одного зуба можна виразити формулою ( $\psi$  - кут контакту):

$$(a_z)_{\max} = s_z \sin \psi.$$

Тепер можна звернутись до питання нерівномірності процесу при фрезеруванні. Попередній розгляд показав, що при здійсненні такого процесу різання має місце змінність товщини зрізу, отже – і площі поперечного перерізу зрізуваного шару металу. Це визначає так звану статичну динаміку фрезерування і спричиняє виникнення значних коливань у обробній системі.

В теорії різання встановлено що рівномірного фрезерування досягають при забезпеченні так званого коефіцієнту кратності, або ж постійності сумарної ширини зрізу всіма зубами, які контактують із оброблюваною деталлю, одночасно.

Покажемо як формується нерівномірність фрезерування. Вона залежить від площі поперечного перерізу зрізу всіма зубами. Ця величина є змінною.

Показано, що найбільша величина площі поперечного перерізу шару, що зрізається одним зубом, можна визначити за формулою ( $b_{\max}$  – найбільша ширина зрізу):

$$A_{\max} = \frac{a_{\max} b_{\max}}{2}.$$

У книзі [2] графічно для різних значень коефіцієнту кратності  $k$  визначені закономірності нерівномірності фрезерування (рис. 1.3) у відсотках площі зрізу до її максимального значення.

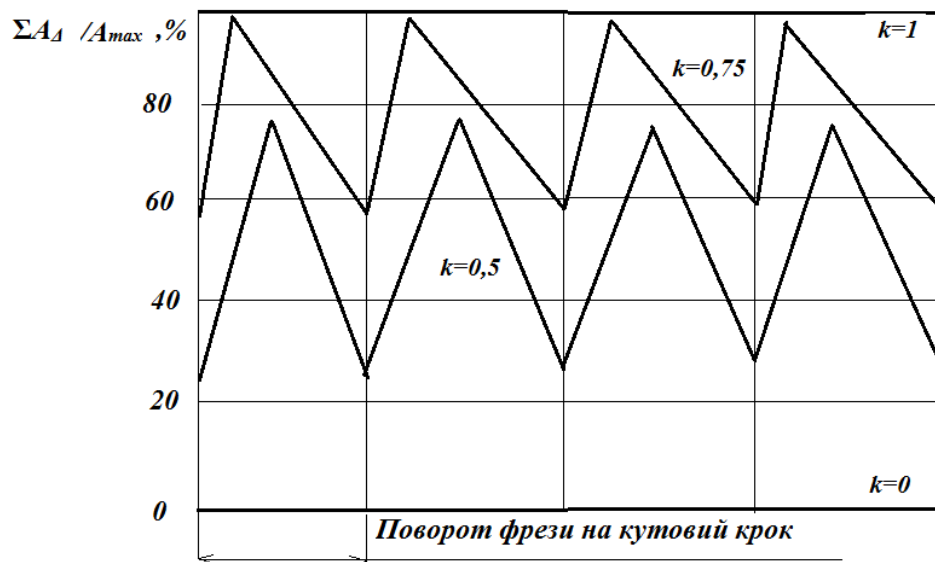


Рисунок 1.3 - Залежності нерівномірності фрезерування в процесі повороту фрези

Введене також поняття ступеню нерівномірності фрезерування [2]:

$$\varepsilon = \frac{(\sum A_{\Delta})_{\max} - (\sum A_{\Delta})_{\min}}{k A_{\max}}.$$

Графічно у функції від  $k$  це виглядає так (рис. 1.4).

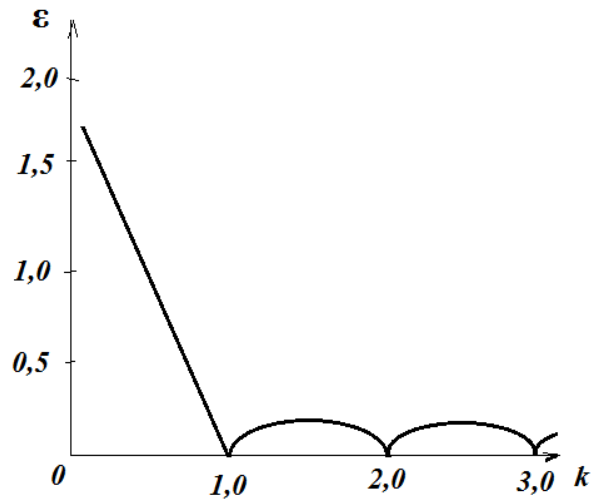


Рисунок 1.4. Зміна ступеню нерівномірності фрезерування

Зрозуміло, що нерівномірне фрезерування спричиняє виникнення динамічних змінних навантажень. Такі навантаження негативно впливають на стан фрези і загалом на обробну систему та точність і якість оброблення.

Сказане вище, показує можливість приблизно оцінити динамічні характеристики фрезерування. При цьому силові параметри визначатимуться функцією площі зрізу, бо вважається, що об'єм зрізаного матеріалу є пропорційним до площі.

Для визначення площі зрізаного шару пропонується величина[2]:

$$A = \frac{\pi D k s_z}{z \sin \omega} \int_{\psi_2}^{\psi_1} \sin \psi_i d\psi_i.$$

Якщо вважати, що питомий тиск на різальне лезо залежно від коефіцієнту  $k_p$  різання дорівнює

$$p_0 = k_p \sigma_e,$$

де  $\sigma_e$  – границя міцності, то зусилля різання, набуває значення:

$$P_{риз} = p_0 A.$$

Після інтегрування буде мати:

$$P_{piz} = \frac{k_p \sigma_s s_z \pi D k}{z \sin \omega} (\cos \psi_2 - \cos \psi_1).$$

Таким чином, нерівномірне фрезерування є залежним від повороту фрези. Змінність сил різання показана такими графіками [2] (рис. 1.5):

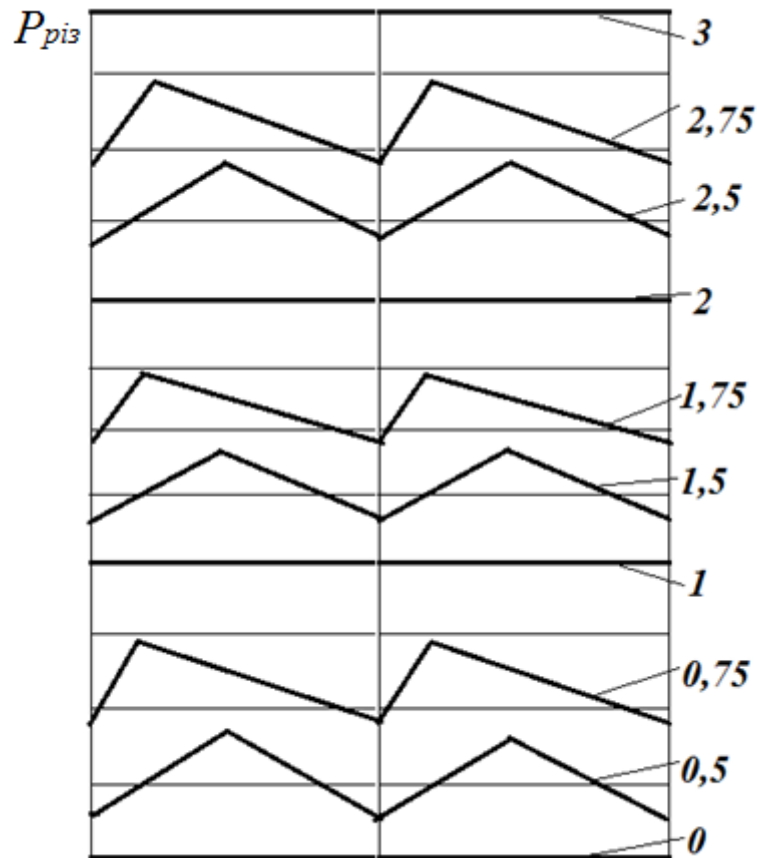


Рисунок 1.5 - Приблизні зміни зусиль різання

Приведені міркування показують, що фрезеруванні зусилля, як правило, є змінними, що викликане особливостями власне процесу фрезерування. Тому ці зміни зусиль слід стабілізувати.

### 1.2.3. Особливості динаміки процесу фрезерування

Питанню впливу динамічних процесів на обробну систему в науковій літературі приділяється значна увага. Вібрації, їх високий рівень, зокрема, знижують стійкість фрез при торцевому фрезеруванні учетверо. Посилює проблему необхідність зростання швидкостей різання для здійснення оброблення нових матеріалів, зокрема сучасних конструкційних. Ці проблеми визначили появу нових напрямків наукових досліджень неприпустимих автоколивань (само збудного типу), [6,7]. Виникненню автоколивань сприяє поява ряду факторів:

- відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу;
- запізнення пластичних деформацій;
- від'ємна залежність зусилля різання від швидкості (за певних умов);
- імпульсні збудження динамічної системи при врізанні чи виході зубів із оброблюваної заготовки та інші.

Загалом більшість дослідників поділяють автоколивання на первинні і вторинні. Первинні коливання можуть бути спричинені різними факторами, тоді як вторинні є коливаннями при різанні по сліду, який залишений попереднім проходом. Вторинні коливання можуть охоплювати до 85% всіх вібрацій.

Для розкриття природи автоколивань у верстатах В.О. Кудиновим [6] було введено поняття замкненої динамічної системи металорізального верстату (МРВ) (рис. 1.6).

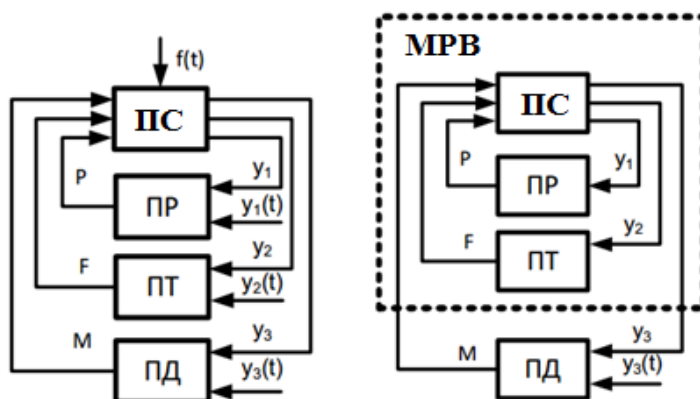


Рисунок 1.6 – Замкнена динамічна система верстату (а) типова; б) еквівалентна)

Ця система об'єднує в собі пружну систему ПС (верстат, пристосування, інструмент, заготовка), процес різання ПР, процес тертя ПТ, процеси у двигунах ПД. Схема показує дії сили різання  $P$ , сили тертя  $F$ , зусилля двигуна  $M$ , а також відповідні деформації  $y_i$ . Показаний також зовнішній вплив залежний від часу  $t$ .

Отже, динамічна система верстату виявляється замкненою і багатоконтурною. Деформації пружної системи спричиняються робочими процесами. Замикання впливів від часу утворює контури зв'язків.

У своїх роботах В.О. Кудинов [6] довів, що вторинні автоколивання мають певні особливості. Зокрема, оброблення по сліду знижує граничне значення стружки (тобто вібростійкість) приблизно вдвічі; структурно стійка динамічна система верстату залежно від величини запізнення може втрачати стійкість. Вібрації погіршують шорсткість обробленої поверхні, спричиняють зношування і руйнування різальних лез фрези.

Таким чином, вплив вторинних коливань на динаміку процесу є суттєвим.

Прийнято розрізняти два режими збудження автоколивань для торцевого фрезерування: 1) м'який, коли збудження відбувається при різанні по сліду і 2) жорсткий, коли коливання є наслідком не лінійності сил різання, залежних від товщини зрізаного шару.

Вченими встановлено також, що невеликі за амплітудою автоколивання захоплюються вимушеними коливаннями.

При фрезеруванні домінуючим чинником є динамічна підсистема інструменту.

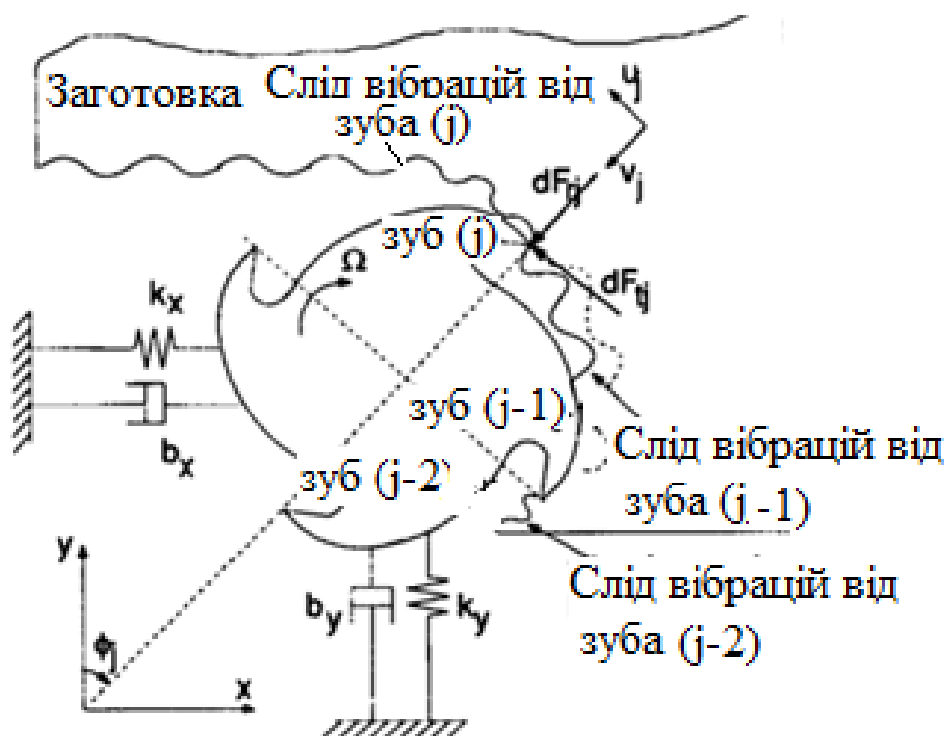


### 1.2.4. Моделі динаміки процесу фрезерування

Застосування представлення замкненої динамічної системи верстату вимагає побудови математичних моделей окремих ланок.

При цьому слід намагаться спростувати математичні вирази, представляючи динамічну систему із меншою кількістю ступенів вільності, тобто зменшувати порядок рівнянь, намагаючись зберегти адекватність моделей, [8]. Водночас у динамічній системі вводять інерційні, пружні та демпфувальні зв'язки.

За приклад можна показати (рис. 1.7) динамічну модель для вільного фрезерування. Для цієї одно масової моделі теж є характерними як інерційні, так і пружно-демпфуючі зв'язки.



Рисунк 1.7. Динамічна модель вільного фрезерування

Також до одно масової схеми тяжіє концепція Степчина Я.А., який уявляє модель обробної системи для випадку торцевого фрезерування одним зубом з обмеженими автоколиваннями у вигляді, як показано на рис. 1.8.

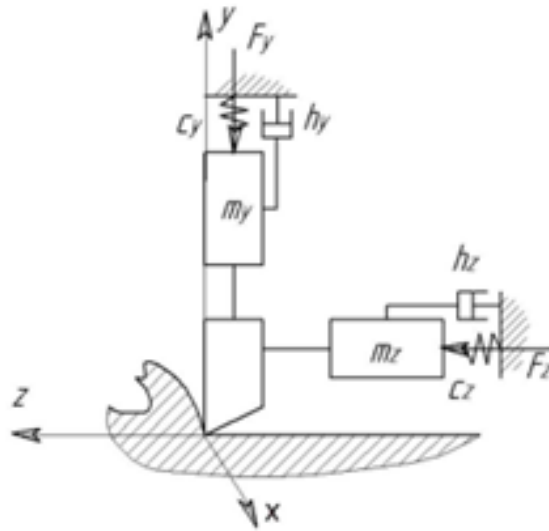


Рисунок 1.8 – Модель торцевого фрезерування при різанні одним зубом

Таким чином, вказані моделі спрощують різноманіття коливальних процесів у обробній системі фрезерного верстату до відносних коливань інструменту і заготовки, що є істотним і адекватним. Ці коливання визначають характерну динаміку різання, а також визначають якість обробленої поверхні та оцінюють стійкість інструменту.

При цьому важливим є оцінювання рівня коливань та їх характеру. Таке оцінювання вібраційних процесів може відбуватись як розрахунковим шляхом, так і експериментально.

## Висновки до розділу 1

На основі аналітичних досліджень розділу 1 можна сформулювати такі висновки:

1) Фрезерування застосовують перш за все для оброблення плоских поверхонь і це є найбільш розповсюдженим процесом;

2) Підвищення ефективності процесу фрезерування обмежується втратою динамічної стійкості обробної системи, а також зменшенням значень характеристик надійності фрез.

3) При фрезеруванні виникають процеси пов'язані із нерівномірністю самого фрезерування, яка закладена в особливостях конструкцій фрез та власне самого фрезерування і застосовуваних схем оброблення.

4) Для дослідження коливань при фрезеруванні проаналізовані різні динамічні моделі.

5) Нерівномірність фрезерування, а також обмеження викликані неприпустимими автоколиваннями (пр. відставанні сили різання від зміни товщини зрізу і при різанні по сліду) а також інші супутні динамічні процеси служать підставою для розробки заходів зменшення вібрацій, зокрема при використанні демпфувальних елементів.

Такі висновки дозволяють сформулювати основну мету дослідження, а також об'єкт і предмет дослідження.

**Метою даного дослідження** є підвищення ефективності фрезерування роботи для зменшення його нерівномірності нерівномірностей шляхом використання демпфувальних елементів у фрезах.

**Об'єкт дослідження** - процес фрезерування на фрезерно-центрувальному верстаті

**Предмет дослідження** – керування навантаженнями різання при демпфування процесу фрезерно-центрувальної операції.

.

Відповідно до мети нами формалізовані такі **завдання роботи**:

1. Вивчити літературні джерела щодо ефективності фрезерування. Здійснити аналіз відомих математичних моделей, що опсують динамічні процеси при здійсненні фрезерної операції.
2. Првести огляд відомих конструкцій фрезерних верстатів.
3. Описати особливості фрезерно-центрувальної технологічної операції.
4. Показати схему формоутворення поверхонь при здійсненні фрезерно-центрувальної операції.
5. Здійснити розроблення компоновки фрезерно-центрувального верстату.
6. Дослідити кінематику головного руху верстату.
7. Розрахувати і сконструювати формоутворюючий вузол.
8. Провести стрктурний аналіз фрезерно-центрувального напівавтомату. Побудувати мультграф структури і функцій верстату.
9. Вияснити причини динамічних явищ при фрезеруванні та описати відомі шляхи їх подолання.
10. Обгрунтувати схеми регулювання швидкості процесу різання при фрезеруванні.
11. Обгрунтувати концепцію використання пружних елементів у фрезах
12. Розробити динамічну схему системи фрези при фрезеруванні на фрезерно-центрувальному верстаті.
13. Описати математичну модель процесу фрезерування. Визначити коефіцієнти динамічності при фрезеруванні.
14. Побудувати порівняльні графічні залежності зниження динамічності процесу фрезерування при використанні пружно-демпфуючих елементів.
14. Запропонувати заходи з охорони праці та безпеки щодо надзвичайних ситуацій.





## 2. Дослідно-проектний розділ

### 2.1. Аналіз відомих конструкцій фрезерних верстатів різної будови

При фрезерування для здійснення процесу різання застосовують такі відомі конструкції верстатів (табл. 1) [1,9,10].

Таблиця 2.1

Відомі конструкції фрезерних верстатів

ВЕРСТАТИ:	
Універсальний	Горизонтальний
	
Консольно-фрезерний	Вертикально-фрезерний
	

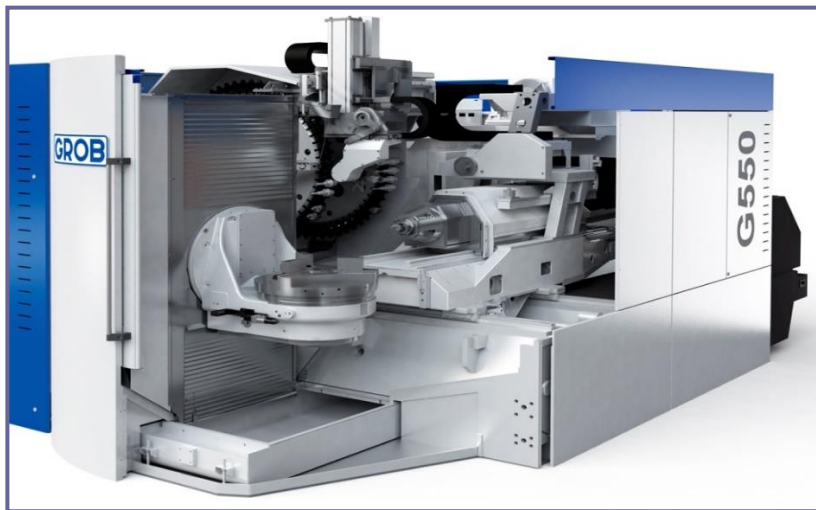
Основне призначення цих верстатів – оброблення плоских поверхонь способом фрезерування.

В даний час використовують верстати, в яких фрезерні операції поєднуються із іншими, тобто багатоцільові верстати (оброблювальні центри). Вони можуть виконувати як фрезерні операції, так і, наприклад, розточувальні та інші. Деякі із цих верстатів приведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

### Багатоцільові фрезерні верстати

Горизонтальний оброблювальний центр



Вертикальний оброблювальний центр



Завданням роботи є дослідження процесу фрезерування на фрезерно-центрувальному верстаті, загальний вигляд якого зображено на рис 2.1.



Рисунок 2.1 - Вигляд фрезерно-центрувального верстату

За аналог вибираємо верстат-напівавтомат 2Г942. При цьому фрезерно-центрувальна операція на такому верстаті передбачає фрезерне оброблення торців циліндричної деталі і їх центрування центрувальними свердлами.

## **2.2. Аналіз формоутворення поверхонь і відповідних рухів верстату**

При обробленні на верстаті в загальному випадку маємо справу відносним переміщенням заготовки та металорізального інструменту. При цьому траєкторії взаємних відносних рухів залежать від форми поверхні, яка обробляється, також від форми лез різальних інструментів, інших факторів. Необхідна швидкість різання визначається призначеним режимом оброблення. Рухи формоутворення позначають літерою  $\Phi$  і утворюються твірними і напрямними. Для утворення форми поверхні застосовують різні

методи, наприклад копіювання  $\Phi=0$  (профіль інструменту співпадає із формою деталі) чи обкату  $\Phi=1$  – коли застосовується складніший взаємний рух. Застосовують також метод сліду, що передбачає формування поверхні у вигляді сліду від взаємного переміщення інструменту і заготовки  $\Phi=1$ , а також – метод дотику, коли форма відтворюючої лінії отримується як сукупність згинаючої лінії місць дотику різальних лез  $\Phi=2$ . Вказані цифри показують кількість рухів, що необхідні.

Таким чином, дані спостереження дають змогу уявити кількість рухів, необхідних до утворення поверхонь, що підлягають обробленню.

Фрезерно-центрувальний верстат фактично є багатоцільовим, і передбачає одночасне оброблення заготовки фрезеруванням з обох боків, і потім центрування отворів – теж з обох боків. Це можна зобразити схемами рис. 2.2 і рис. 2.3.

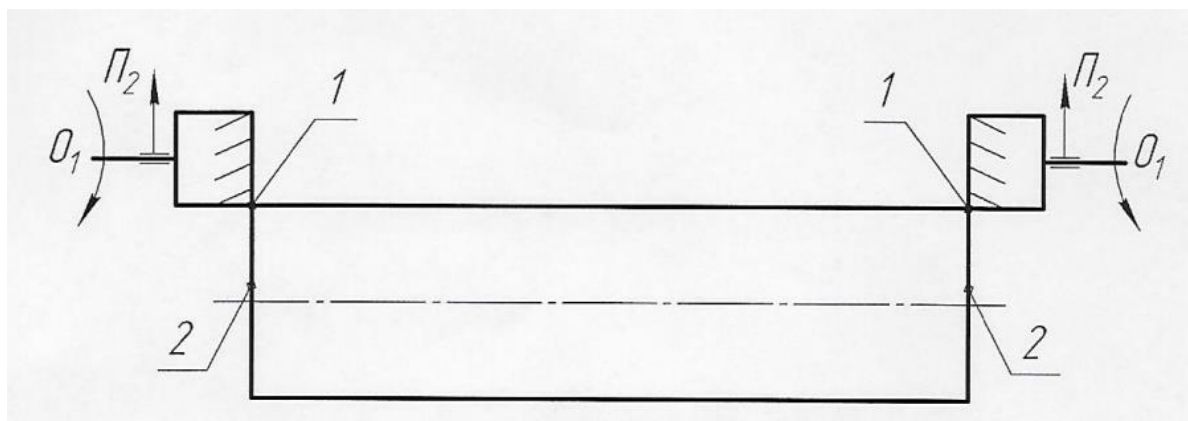


Рисунок 2.2 – Фрезерування торців

При фрезерування з обох боків торців циліндричної деталі (вала) необхідні рухи, щоб забезпечити сукупність твірної 1 за методом сліду ( $\Phi=1$ ) (причому  $\Phi_v(O_1)$  – головний рух обертання  $O_1$ ) і напрямної 2 - за методом дотику (кількість формоутворюючих рухів  $\Phi=2$ ), тобто головний рух  $\Phi_v(O_1)$ , рух подачі  $\Phi_s(P_2)$  поступальний рух  $P_2$ . Окрім того, має місце установочний рух  $U_{ст}$  ( $P_3$ ) і установочний рух  $U_{ст}$  ( $P_4$ ).



Подібним чином проаналізуємо також рухи, що забезпечують центрувальний технологічний перехід з обох боків вала за допомогою центрувальних свердел (рис. 2.3).

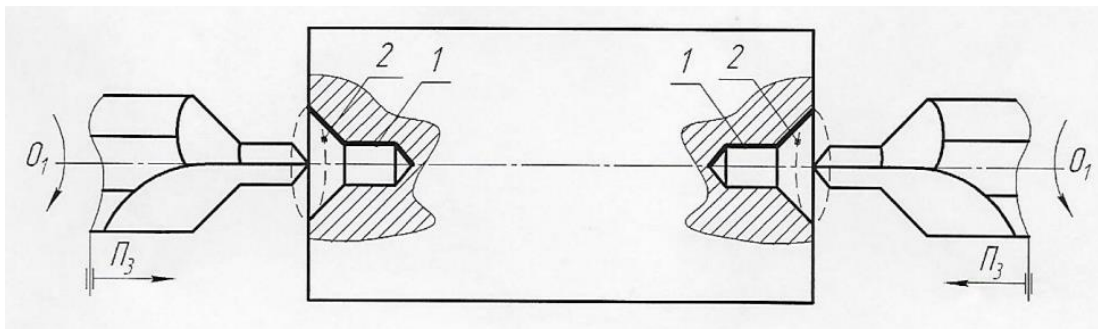


Рисунок 2.3 – Центрування отворів

При центруванні отворів твірна 1 утворена методом копіювання, що відповідає виразу для формуючого руху  $\Phi=0$ . В свою чергу за допомогою методу сліду ( $\Phi=1$ ) утворюється напрямна 2. Цьому відповідає головний рух формоутворення  $\Phi v(O_1)$ . Для здійснення оброблення також необхідним є рух врізання  $V_r(P_1)$  за рахунок поступального руху  $P_1$  і установочний рух  $U_{ст}$ .

### 2.3. Створення компоувальної схеми

Різні металорізальні верстати відрізняються своїми компоновками, причому верстати однакової структури можуть мати різні компоновки, і, навпаки, верстати різної структури – практично ідентичні компоновки.

Власне розроблення компоновки передусе конструюванню окремих вузлів. Компоновка зобов'язана забезпечити реалізацію рухів формоутворення та інших допоміжних та додаткових рухів у верстаті. Прийнято, що компоновка має блочну структуру. Така структура передбачає наявність одного стаціонарного блоку, а інші блоки є рухомими і з'єднуються із нерухомим блоком і сусідніми рухомими за допомогою напрямних, які можуть бути як лінійними, так і напрямними. Оскільки

компоновка характеризується певною структурою і властивостями, то ці компоненти представляються при розробленні компоновок причому у необхідній пропорції.

Склад рухів (формуотворюючих і додаткових) формують кінематичну структуру верстата. Ця структура і є основою розроблення компоновки. Таке поєднання виражають структурною формулою компоновки, яка дає змогу ідентифікувати верстат певного компоувального рішення.

Проаналізуємо компоувальне рішення для розглядуваного верстату. Фрезерно-центрувальний напівавтомат забезпечує фрезерування торців вала з обох боків, а також виготовлення центрувальних отворів – теж з обох боків.

Як відомо найменший склад блоків, які забезпечують функції формоутворення, називають технологічним модулем, [19,20]. Його позначають літеро сполученням ТМ. Він може складатись із мінімально 2-х блоків, тобто одного нерухомого, а іншого рухомого, бо без цього неможливо реалізувати відносний рух інструменту і заготовки.

Для відпрацювання характеристики використання компоновки з метою забезпечення необхідних установочних блоків вводиться поняття модульного комплексу (МК).

При створенні компоновок часто використовують математичні методи. Така формалізація є необхідною і доцільною. З її метою створений певний комплекс умов відбору, які дозволяють включати той чи інший блок до структури. Крім того, при створенні компоновок використовують також міркування конструкторського та технологічного плану.

Раніше вже вказувалось, що у розглядуваному верстаті маємо 2 модулі – 1) фрезерний (для фрезерування торців) і 2) свердлильний (для зацентрування).

Тому для кожного із цих модулів формалізуємо і запишемо структурні ознаки для відбору компоновок. При цьому значення технологічного модуля і модульного комплексу для обох випадків співпадають, тобто  $ТМ=МК$ .

С врахуванням формалізації матимемо:

- для модуля 1  $O\hat{X}\hat{C}_h$

- для модуля 2  $O\hat{x}Z\hat{D}_h$ .

Отже, для забезпечення формоутворення необхідно знайти значення МК.

Спочатку розглянемо випадок для  $O\hat{X}\hat{C}_h$ .

Можна сформулювати дві умови відбору.

Умова перша (M1). Відповідно до конструкції інструменту обертовий рух надаємо інструменту. При цьому блок інструменту має кінцеву позицію у гілці, що стосується інструменту:

$$O\bar{C}\bar{C} + \bar{C}O\bar{C} + 0$$

Умова друга (M2). Враховуючи те, що деталь треба обробляти з обох боків, то рух подачі має інструмент

$$O\bar{O}\bar{O} + \bar{X}O\bar{X} + 0$$

Таким чином, для шуканої компоновки проводимо процедуру математичного відбору:

$$O\bar{C}\bar{C} + \bar{C}O\bar{C} + 0$$

$$O\bar{O}\bar{O} + \bar{X}O\bar{X} + 0$$

---

$$O\hat{X}\hat{C} + 0 + 0$$

Це означає, що структурною формулою компоновки для фрезерного модуля є вираз:

$$O\hat{X}\hat{C}_h$$

Розглянемо іншу складову модульного комплекту:  $O\hat{x}Z\hat{D}_h$ .

Перша умова M1. Ідентична попередньому випадку. Обертний рух формоутворення надаємо інструменту. Блок інструменту – кінцевий в гілці інструменту:

$$\overline{D}\overline{D}\overline{D}\overline{D}$$

Друга умова M2. Ідентична першому модулю. Враховуючи, що деталь обробляється з обох боків, то рух подачі необхідно надати інструменту.:

$$O\overline{O}\overline{O}\overline{O} + \overline{Z}O\overline{O}\overline{O} + \overline{Z}\overline{Z}OZ + 0$$

Третя умова M3. Щоб об'єднати фрезерний і свердлильний модулі, що переміщуються вздовж осі X, блок, який позначений як X, повинен прилягати до блоку стаціонарного:

$$O\overline{X}\overline{X}\overline{X} + \overline{O}\overline{O}\overline{O}\overline{X} + \overline{X}O\overline{O}\overline{O} + \overline{X}\overline{X}XO$$

Таким чином можемо перейти до математичного відбору компоновки свердлильного модуля:

$$O\overline{O}\overline{O}\overline{O} + \overline{Z}O\overline{O}\overline{O} + \overline{Z}\overline{Z}OZ + 0$$

$$O\overline{X}\overline{X}\overline{X} + \overline{O}\overline{O}\overline{O}\overline{X} + \overline{X}O\overline{O}\overline{O} + \overline{X}\overline{X}XO$$

В результаті отримаємо для свердлильного модуля  $OxZ\hat{D}_h$ .

Звісно, що для обробки 2-х деталей нам необхідно мати попарно 2 фрезерних і свердлильних модулі. Тому формула компоновки для верстату матиме вигляд

$$O2X(C_h + D_h/Z)$$

В той же час треба врахувати, що на верстаті можуть оброблятися деталі різної довжини. Тому потрібно також передбачити рух  $w$ , який здійснює установочний рух вздовж осі  $Z$ . Тому остаточна формула набуває вигляду:

$$O \{ X(C_h + D_h/Z) + w X(C_h + D_h/Z) \}$$

Таким чином, на основі остаточно сформульованої структурної формули, отриманої в результаті математичного відбору, можемо представити схематично компоновальне вирішення верстату (рис. 2.4).

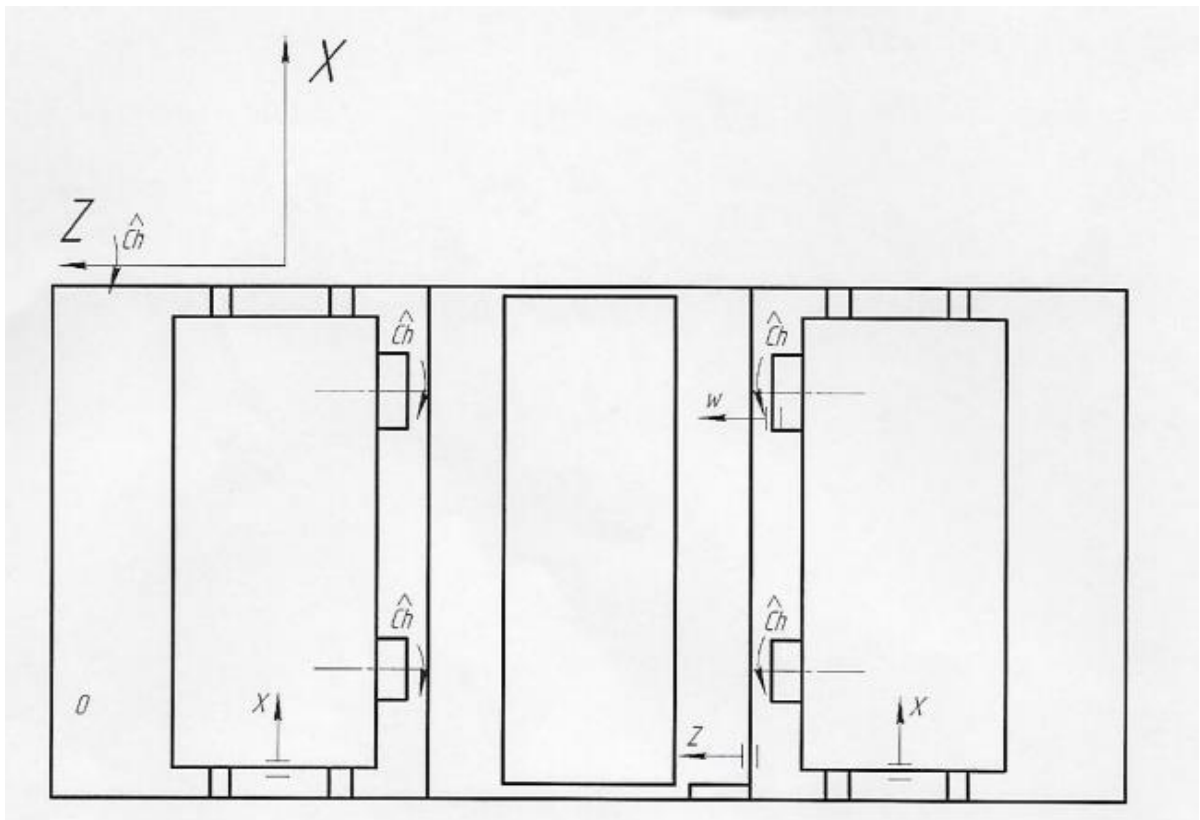


Рисунок 2.4 – Остаточне компоновальне вирішення фрезерно-центрувального верстату

Вид фрезерно-центрувального напівавтомата спереду можна представити так, як зображено на рис. 2.5.

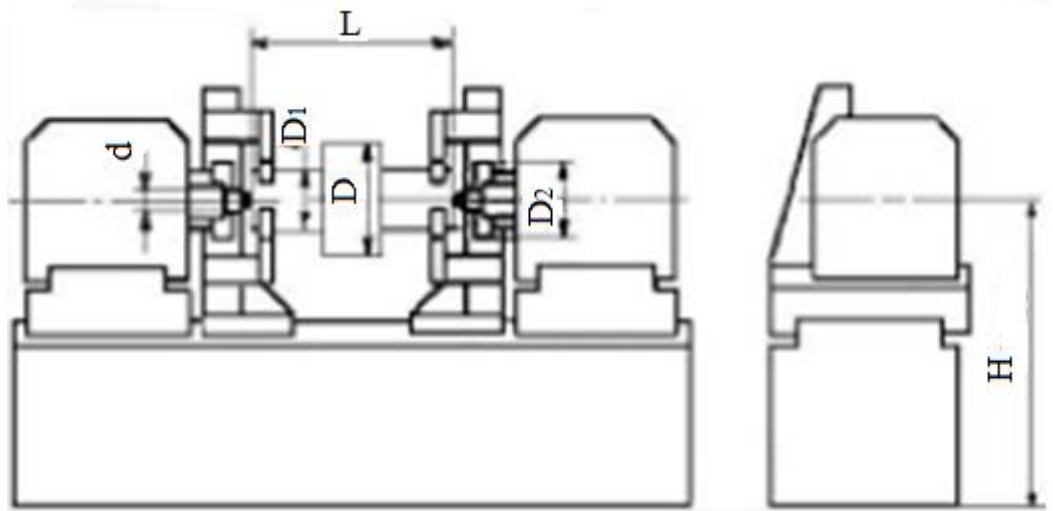


Рисунок 2.5 – Вигляд верстату спереду

## 2.4. Кінематичні розрахунки

Кінематичні розрахунки є необхідними для розроблення кінематичної схеми верстату і встановлення передумов для конструювання елементів приводів верстату та формоутворюючих вузлів. Вони реалізують завдання кінематичного забезпечення рухів формоутворення.

Елементом кінематичного розрахунку є визначення діапазону регулювання приводу. Проведемо це для приводу фрезерної і свердлильної головок фрезерно-центрувального верстату.

Якщо розглядати фрезерну головку, то визначені граничні частоти обертання шпинделя мають такі значення:

$$n_{max}= 725 \text{ об/хв.}; \quad n_{min}=126 \text{ об/хв.}$$

Тоді діапазон регулювання для фрезерної головки –

$$D_{fp} = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{725}{126} = 5,75.$$

Визначимо ті ж значення для свердлильного шпинделя.

Зокрема, для частот обертання маємо величини:

$$n_{max}= 1135 \text{ об/хв.}; \quad n_{min}=245 \text{ об/хв.}$$

Тоді діапазон для свердління:

$$D_{fp} = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{1135}{245} = 4,63.$$

Визначені діапазони регулювання є підставою для подальших кінематичних розрахунків і побудови кінематичної схеми.

Отож, зупинимось на побудові структурної сітки приводів і графіків чисел обертів.

Побудову структурної сітки проводимо за визначеною процедурою ,[9,12,17].

При цьому спочатку проводимо горизонтальні лінії, паралельні одна до одної. Інтервал між лініями дорівнює значенню  $lg\phi$ , де  $\phi$  – знаменник числового ряду чисел обертів. Кількість паралельних прямих відповідає кількості значень чисел обертів коробки. Також проводимо відповідні вертикальні прямі. Ці вертикалі відповідатимуть групам передач. На лівій вертикальній лінії відмічаємо значення 0, яке є симетричним відносно максимальної і мінімальної вертикалей. Для обох коробок приймаємо стандартне значення  $\phi=1,41$ . Відповідно із точки 0 проводимо промені, які ілюструють передачі. Таким чином, отримуємо структурну сітку, яка є ідентичною як для фрезерної, так і для свердлильної головки (рис. 2.6).

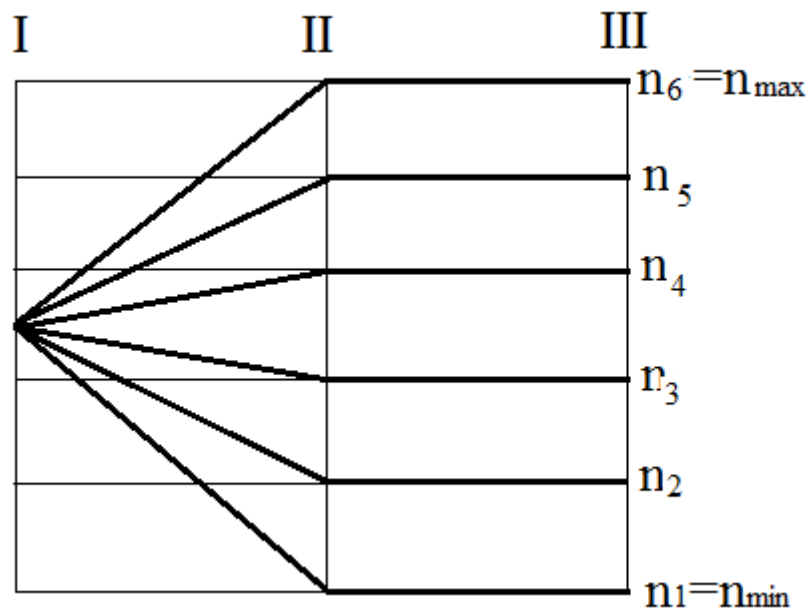


Рисунок 2.6 – Структурна сітка для фрезерного і свердлильного приводів

Графіки чисел обертів будуть з метою побудови кінематичної схеми верстату. При цьому вертикальні лінії на графіках чисел обертів означають вали. На перетині горизонтальних ліній із крайньою правою прямою



отримаємо значення чисел обертів, які має кінцевий елемент приводу, тобто шпиндель. На перетинах горизонтальних прямих із вертикальними матимемо точки, які ілюструють кількість обертів відповідного валу.

Зважаючи на значення  $\phi=1,41$  і попередньо вибрані значення чисел обертів двигунів матимемо такі рисунки, що ілюструють відповідно графіки для фрезерної коробки (рис. 2.7) і для свердлильної коробки (рис. 2.8).

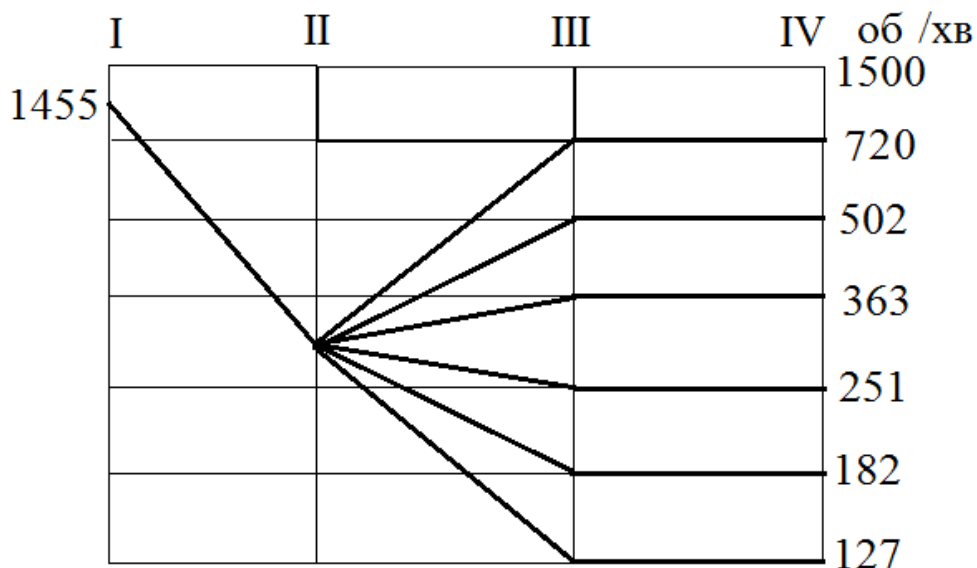


Рисунок 2.7 – Графік чисел обертів для фрезерної коробки

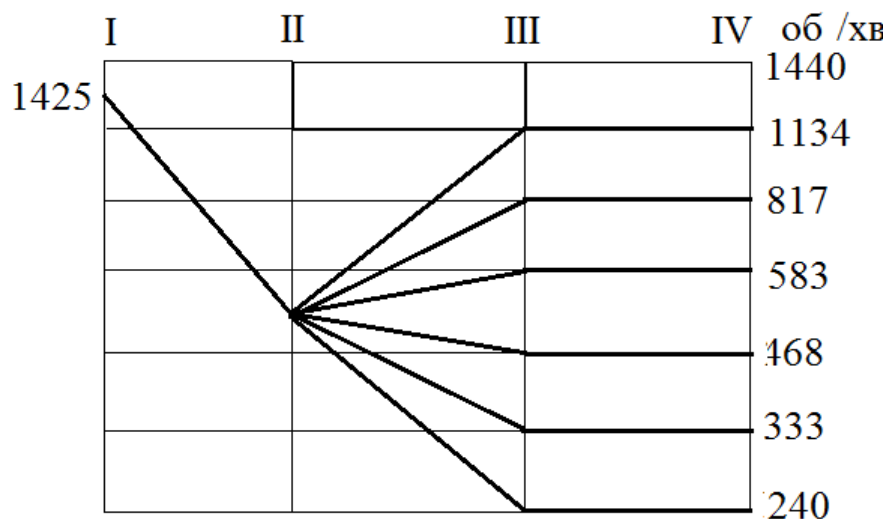


Рисунок 2.8 – Графік чисел обертів для свердлильного приводу

## 2.5. Побудова кінематичної схеми

Графіки чисел обертів дають змогу визначити числа зубів зубчастих коліс.

Спочатку зосередимось на приводі для фрезерування.

Для забезпечення режимів різання при фрезеруванні відповідно до створеного графіку чисел обертів приймемо постійні значення для зубчастих коліс  $z_1, z_2, z_3, z_4$ , а саме відповідно 24; 46; 25; 63.

Тоді можемо визначити числа зубів для змінних коліс.

Так, для першої частоти маємо

$$(n_1) = 127/1455 = 0,09.$$

Змінні колеса  $i = a/b = 26/52 = 0,5$ .

$$\text{Тоді } n_1 = 1455 \frac{24}{46} 0,5 \frac{25}{63} = 127(\text{об} / \text{хв}).$$

Для другої частоти

$$(n_2) = 182/1455 = 0,12.$$

Тож, кількості зубів змінних коліс  $i = a/b = 33/55 = 0,6$ .

$$\text{Відповідно } n_2 = 1455 \frac{24}{46} 0,6 \frac{25}{63} = 182(\text{об} / \text{хв}).$$

Для третьої частоти

$$(n_3) = 251/1455 = 0,17.$$

Тому для змінних коліс:  $i = a/b = 40/48 = 0,83$ .

$$\text{Таким чином, } n_3 = 1455 \frac{24}{46} 0,83 \frac{25}{63} = 251(\text{об} / \text{хв}).$$

Для частоти 4:

$$(n_4) = 363/1455 = 0,25.$$

Змінні колеса:  $i = a/b = 48/40 = 1,2$ .

$$\text{Відповідно, } n_4 = 1455 \frac{24}{46} 1,2 \frac{25}{63} = 363(\text{об} / \text{хв}).$$

Для п'ятої частоти:

$$(n_5) = 502/1455 = 0,35.$$

Для змінних коліс:  $i = a/b = 55/33 = 1,67$ .

$$\text{Отже, } n_5 = 1455 \frac{24}{46} 1,67 \frac{25}{63} = 502(\text{об} / \text{хв}).$$

І для максимального значення – шостої частоти маємо:

$$(n_6) = 720/1455 = 0,49.$$

Тоді змінні колеса:  $i = a/b = 62/26 = 2,38$ .

Відповідно

$$n_6 = 1455 \frac{24}{46} 2,38 \frac{25}{63} = 720(\text{об} / \text{хв}).$$

Аналогічно проведемо розрахунки для свердління. Тут прийmemo постійними такі значення для коліс  $z_5; z_6: 27; 74$ .

Тоді для частоти  $n_1$  маємо:

$$(n_1) = 240/1455 = 0,165.$$

Відповідно змінні колеса:  $i = a/b = 34/74 = 0,46$ .

Тому

$$n_1 = 1425 \frac{27}{74} 0,46 = 240(\text{об} / \text{хв}).$$

Всі необхідні значення зведемо у таблицю 2.2

Таблиця 2.2 – Значення чисел зубів змінних коліс для свердлильної

ГОЛОВКИ

$(n_i)$	$(n_1)$	$(n_2)$	$(n_3)$	$(n_4)$	$(n_5)$	$(n_6)$
$a$	34	42	51	57	66	74
$b$	74	66	57	51	42	34

Отже, будемо в цілому кінематичну схему верстата (рис. 2.9).

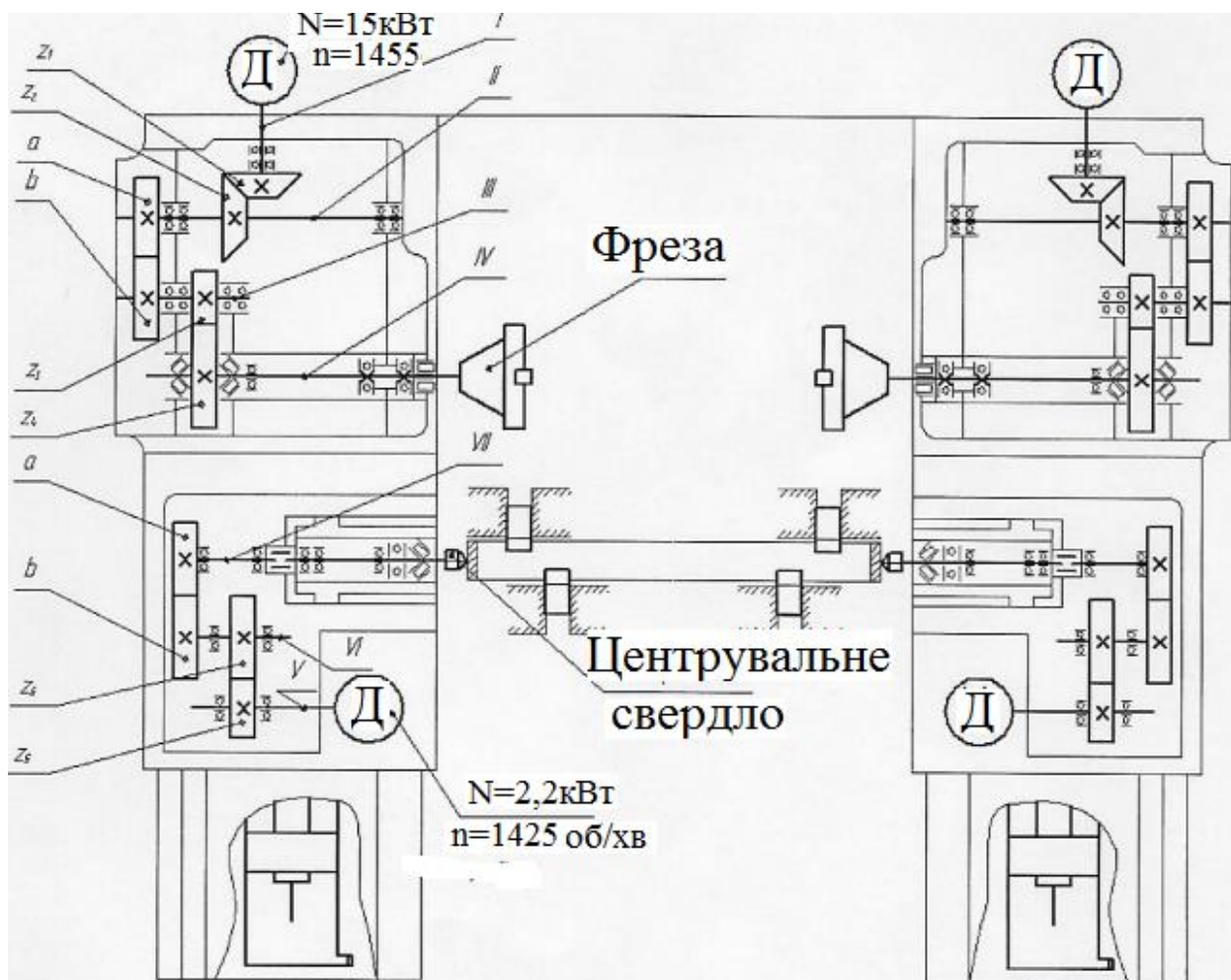


Рисунок 2.9 – Кінематична схема фрезерно-центрувального верстата-напівавтомата

## 2.6. Розрахунок потужностей електродвигунів

По кінематичній схемі ми бачимо, що ми маємо два приводи головного руху – привід головного руху, що забезпечує фрезерування торців і привід головного руху, який відповідає за центрувальне свердління.

Відповідно зрозуміло, що компоновальні рішення щодо приводів головного руху впливають із загального компоновального рішення верстату і є такими, що повинні забезпечити функції верстату, а саме здійснення фрезерних і центрувальних робіт.

Спочатку розрахуємо потужність приводу головного руху щодо свердлильних робіт.

Для цього визначимо момент свердління. Розрахуємо цей момент з врахуванням найважчого режиму роботи. Такий режим відповідатиме свердлінню отворів діаметром  $d=10\text{мм}$  з подачею  $s=0,23\text{ мм/об}$ .

Скористаємось відомою залежністю [14,15] для крутного моменту при свердлінні, а саме:

$$M_{св} = 10C_{кр} d^q s^y K,$$

де  $C_{кр}$  - коефіцієнт, що залежить від матеріалу обробки (його значення для даного випадку – 0,034); показники ступенів при діаметрі –  $q=0,2$ ; і при подачі  $y=0,8$ . Визначимо значення поправочного коефіцієнта  $K$ , який залежить від конкретних умов оброблення.

При цьому, [15],

$$K = \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{750}\right)^{0,75} = (1000/750)^{0,75} = 1,21.$$

Тоді значення крутного моменту:

$$M_{св} = 10 \cdot 0,034 \cdot 10^{0,2} \cdot 0,23^{0,8} \cdot 1,21 = 12,83(\text{Нм}).$$

Визначаємо значення ефективної потужності зі формулою [12]:

$$N_{ef} = \frac{M_{cv} n}{9750}.$$

Таким чином, при частоті обертання  $n=583$  об/хв. матимемо:

$$N_{ef} = \frac{12,83 \cdot 583}{9750} = 0,767(\text{кВт}).$$

Врахуємо коефіцієнт корисної дії головки (кількість зубчастих передач 2, кількість пар підшипників – 6):

$$\eta_{cv} = 0,97^2 0,99^6 = 0,89.$$

Таким чином, орієнтовне значення потужності двигуна для свердлильних робіт

$$N_{Дсв} = \frac{N_{ef}}{\eta_{cv}} = \frac{0,767}{0,89} = 0,86(\text{кВт}).$$

Отже, вибираємо для свердлильної головки електродвигун 4АМ90L4У3.

Його потужність – 2,2 кВт, а номінальне число обертів: 1425 об/хв.

Повторимо ці ж розрахунки щодо приводу торцевого фрезерування.

Розрахунки стосуються найважчого режиму. Для визначення ефективної потужності скористаємося формулою [15]:

$$N_{ef} = \frac{vtz}{975} = \frac{280 \cdot 3,45 \cdot 12}{975} = 11,88(\text{кВт}),$$

де використані значення для швидкості різання  $v$ , глибини різання  $t$  і кількості зубів  $z$  фрези.

Для фрезерної головки визначимо значення коефіцієнту корисної дії (у приводі маємо 3 зубчасті передачі і 9 пар підшипників). Тоді:

$$\eta_{\text{фр}} = 0,97^3 0,99^9 = 0,835.$$

Відповідно матимемо значення потужності електродвигуна фрезерного приводу:

$$N_{\text{Дфр}} = \frac{N_{\text{еф}}}{\eta_{\text{фр}}} = \frac{11,88}{0,835} = 14,23(\text{кВт}).$$

Отже,можемо вибрати електродвигун.

Приймаємо у якості двигуна фрезерної головки двигун моделі 4AM160S4У3.

Потужність такого двигуна складає 15 кВт.

Відповідно номінальна частота обертання ротора двигуна – 1455 об/хв.

## 2.7 Розрахунки елементів головок

Кінематична частина приводів була розглянута при проектуванні кінематичної схеми верстату[17,18].

Для фрезерного приводу прийняті частоти обертання шпинделя фрези в діапазоні: 127-720 об/хв. Кількість зубів  $z_1$  і  $z_2$  конічної пари становить 24 і 46. Кількість зубів циліндричних коліс  $z_3$  і  $z_4$  - це 25 і 63. Відповідно визначені і параметри пар змінних коліс ( $a$  і  $b$ ).

Відповідно визначені частоти обертання шпинделя свердлильної головки (від 240 об/хв до 1440 об/хв), а також кількості зубів постійних зубчастих пар  $z_5$  і  $z_6$  (27 і 74), а також змінних коліс ( $a$  і  $b$ ).

Призначимо значення модулів зубчастих передач.

Так, для пари конічних зубчастих коліс  $z_1/z_2$  стандартним методом проводимо розрахунки і отримуємо значення модуля  $m=2,5$  мм.

Для циліндричних коліс матимемо:

Пара  $z_3$  і  $z_4$ :  $m=3,5$  мм;

Пара  $z_5$  і  $z_6$ :  $m=2,0$  мм (свердлильна головка).

Для всіх змінних коліс фрезерного приводу призначаємо стандартний модуль  $m=3,0$  мм.

Для всіх змінних коліс свердлильного приводу призначаємо стандартний модуль  $m=2,0$  мм.

Проведемо розрахунки валів.

Примірний розрахунок проведемо для свердлильного приводу.

Для цього скористаємось значеннями максимальних крутних моментів на валах.

При цьому, враховуючи, що потужність електродвигуна свердлильного приводу складає 2,2 кВт, а ккд на валу, що йде від електродвигуна 0,94, матимемо, що крутний момент в цьому випадку, за формулою [9]:



$$M_D = 9550 \frac{2,2 \cdot 0,94}{1425} = 13,85(\text{Нм}).$$

Визначимо крутні моменти на валах свердлильної головки, що є заключними в передачі моменту від електродвигуна свердлильної головки до шпинделя.

При цьому врахуємо, що момент на вал VI передається від вала V через зубчасту пару, а на валу також є пара підшипників. Отже, коефіцієнт корисної дії при цьому

$$\eta_{VI} = 0,94 \cdot 0,97 \cdot 0,99^2 = 0,9.$$

Тоді відповідний крутний момент:

$$M_{VI} = 9550 \frac{2,2 \cdot 0,9}{456} = 41,46(\text{Нм}).$$

При цьому прийнято, що частота обертання вала згідно із графіком числа обертів складає 456 об/хв.

Далі врахуємо, що крутний момент на вал VII передається через циліндричну зубчасту пару від вала VI (на валу є пара підшипників). Отже, коефіцієнт корисної дії при цьому:  $\eta_{VII}=0,89$ .

Таким чином, можемо визначити з врахуванням частоти обертання вала VII, яка дорівнює 1134 об/хв., величину крутного моменту при цьому:

$$M_{VII} = 9550 \frac{2,2 \cdot 0,89}{1134} = 16,49(\text{Нм}).$$

Таким чином, маємо такі значення крутних моментів на валах свердлильної головки:

- на валу електродвигуна – 13,85 Нм;
- на валу VI – 41,46 Нм;
- на валу VII - 16,49 Нм.

Ці вираховані значення є підставою для конструювання валів свердлильної головки.

Розрахунок діаметрів валів проведемо із умови на кручення, зважаючи на понижені значення допустимих напружень.

При цьому скористаємось формулою [18]:

$$d_e \geq \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi[\tau_{кр}]}}$$

де враховується, що  $T$  – це максимальне значення обертового моменту, а  $[\tau_{кр}]$  – допустиме напруження при крученні.

Вали будемо виготовляти із сталі 40Х [16]. Для цього матеріалу допустиме значення напружень:  $[\tau_{кр}] = 20$  Мпа (маються на увазі понижені значення).

Тоді для вала, що виходить з електродвигуна маємо:

$$d_{вед} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 13,85}{\pi \cdot 20}} = 0,0152 \text{ м.}$$

Конструктивно приймаємо  $d_{вед} = 34$  мм.

Так само визначаємо і діаметральні розміри для інших валів.

Зокрема,

$$d_{VI} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 41,46}{\pi \cdot 20}} = 0,0219 \text{ м.}$$

Приймаємо для шийки вала VI стандартне значення діаметру:  $d_{VI} = 34$  мм.

Відповідно розраховуємо діаметр вала VII:

$$d_{VI} \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 16,49}{\pi \cdot 20}} = 0,0162 \text{ м.}$$

При цьому приймаємо із стандартного ряду значень для шийки вала:  
 $d_{VI}=28\text{мм}$ .

## 2.8. Розрахунки шпиндельного вузла на жорсткість

Конструювання шпиндельних вузлів пов'язане із певними вимогами до цих вузлів [18,21]:

1) жорсткість шпиндельних вузлів повинна бути достатньою, щоб не допускати неприпустимі деформації в процесі оброблення; таким чином це вимагає встановлення відповідних опор і забезпечення жорсткості шпиндельного вузла у межах 250 - 500Н/мкм;

2) при обертанні шпинделя повинні бути забезпечена висока точність обертання і стабільність геометричної осі шпиндельного вузла;

3) величезне значення має вібростійкість вузла, частоти його повинні перевищувати 500..600 Гц, а амплітуди коливань повинні бути мінімальними;

4) у шпиндельних вузлах повинне бути мале тепловиділення, а довговічність (яка визначається довговічністю опор) достатньою.

Конструкції шпиндельних вузлів визначені функціями верстату і відрізняються точністю, роботою шпиндельних опор та іншими факторами.

У розглядуваному верстаті ми маємо справу із двома головками, а, отже, із різними шпиндельними вузлами.

Розрахуємо шпиндельний вузол для фрезерних робіт.

Спочатку проведемо компонування шпиндельного вузла, тобто визначимо схеми його опор (рис. 2.8).

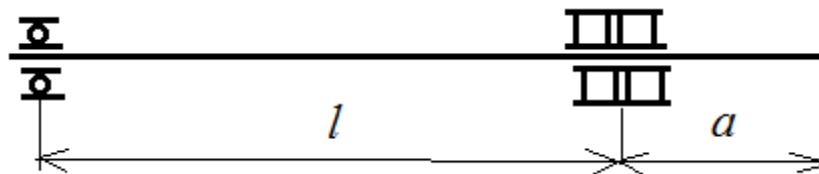


Рисунок 2.8 - Схема шпиндельного вузла (ШВ)

В передній опорі встановлений радіальний дворядний роликовий підшипник із короткими циліндричними роликами. Тип підшипника – 3182100 особливо легкої серії. Таким чином, передня опора здатна чинити опір як радіальним, так і осьовим деформаціям. У задній опорі встановлений радіальний кульковий шарикопідшипник.

На компоновальній схемі шпиндельного вузла показаний виліт шпинделя  $a$  і міжопорна відстань  $l$ .

Тепер перейдемо до розрахункової схеми (рис. 2.9).

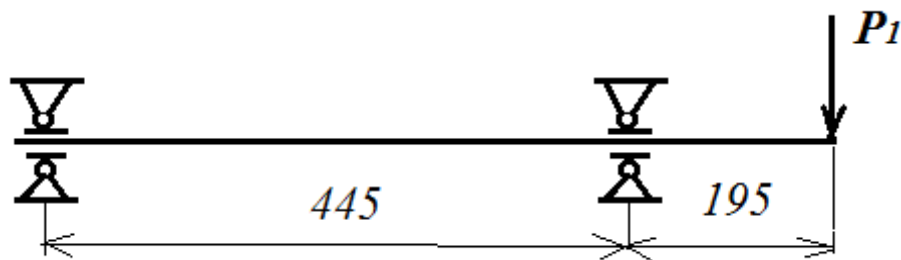


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема шпиндельного вузла

Ця розрахункова схема стосується розрахунку вузла на жорсткість проти радіальних деформацій.

Сила різання прикладена до переднього кінця шпинделя на відстані 195 мм до передньої опори. Попереднє значення відстані між серединами опор шпиндельного вузла складає 445 мм.

Шпиндель в нашому випадку – пустотілий. Вважатимемо, що значення коефіцієнту, який враховує пустотілість шпинделя  $\beta=0,4$ .

Оскільки у передній опорі є дворядний підшипник, то схема деформацій кінця шпинделя набуває вигляду схеми деформацій кінця консолі під дією зусилля  $P_1$ .

Тому деформацію кінця шпинделя можна виразити залежністю

$$y_{ul} = \frac{P_1 a^3}{3EI},$$

або

$$y_{ш} = \frac{P_1 a^3}{3E \frac{\pi D^4}{64} (1 - \beta^4)},$$

де  $E$  – модуль пружності, а  $D$  – усереднений діаметр шпинделя.

З цієї формули бачимо, що діаметр шпинделя повинен відповідати нерівності

$$D \geq \sqrt[4]{\frac{64 P_1 a^3}{3\pi E (1 - \beta^4) [y_{ш}]}}.$$

Знаходимо значення зусилля різання як середньоквадратичне між осьовою і радіальною складовою:

$$P_1 = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}.$$

Враховуючи, що  $P_x=333$  Н, а  $P_y=520$  Н, то матимемо  $P_1=619$  Н.

Тоді мінімальне значення діаметра шпинделя:

$$D_{\min} \geq \sqrt[4]{\frac{64 \cdot 619 \cdot 195^3}{3\pi 2,1 \cdot 10^5 (1 - 0,4^4) 8 \cdot 10^{-3}}} = 47,35 \text{ мм}.$$

Приймаємо для шпинделя діаметр консольної частини 50 мм.

Орієнтовно діаметр можна визначити із умови жорсткості опор і їх нормальної роботи. При цьому приймаємо нормативне значення жорсткості опор  $j=350$  Н/мкм [18]. Тоді:

$$D \geq \frac{K_n^3 j}{640 \cdot (1 - 0,0256)} = 29,85 \text{ мм}.$$

Таким чином, затверджуємо прийняте значення для консолі, а для між опорної частини встановлюємо значення діаметра у 30 мм.

Врахуємо тепер жорсткість опор. Тоді можемо перейти до розрахункової схеми рис. 2.9.

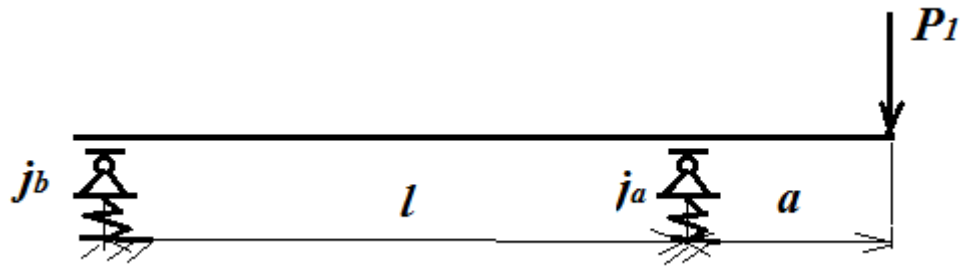


Рисунок 2.10 – Схема шпindelного вузла із пружними опорами

Знайдемо значення жорсткостей шпindelних опор за графіками, наведеними у [18].

Тоді для передньої опори отримаємо значення радіальної жорсткості  $j_a=380\text{Н/мкм}$ , а для задньої –  $j_b=90\text{ Н/мкм}$ .

Скористаємось формулою для розрахунку деформації вилітної частини шпindelного вузла при врахуванні жорсткості опор:

$$y_{u1} = P_1 \left[ \frac{(l+a)^2}{j_b l^2} + \frac{a^2}{j_a l^2} + \frac{a(l+a)}{3EI} \right].$$

За цією формулою проведені автоматизовані розрахунки.

В результаті цих розрахунків було знайдене значення деформації шпindelного вузла у розмірі  $3,76\text{ мкм}$ .

Така деформація цілком відповідає існуючим нормативним даним.

Таким чином, обрана схема опор, їх власні податливості, а також значення вильоту і між опорної відстані забезпечують достатні показники точності оброблення.

## Висновки до розділу 2

- 1) Представлений огляд відомих конструкцій фрезерних верстатів, включно із оброблювальними центрами..
- 2) Проведений аналіз формоутворення поверхонь відповідно до верстату аналогу і розроблений перелік формоутворюючих та інших рухів фрезерно-центрувального верстату.
- 3) На основі математичного відбору створена компоновальна схема верстату із формулою  $O \{ X(C_h + D_h/Z) + w X(C_h + D_h/Z) \}$ .
- 4) Проведені кінематичні розрахунки, побудовані структурні сітки і графіки кількості обертів для фрезерної і центрувальної частин приводів, і на їх базі запропонована кінематична схема верстату.
- 5) Здійснений вибір електродвигунів за необхідною потужністю.
- 6) Розраховані конструктивні елементи фрезерної та свердлильної головок фрезерно-центрувального верстату.
- 7) Проведений аналіз одного із шпиндельних вузлів на жорсткість із розрахунком максимальних можливих деформацій робочого кінця шпинделя, в результаті чого представлена конструкція шпиндельного вузла..

### 3. Науково-дослідна частина

#### 3.1. Мета і порядок наукових досліджень

Метою досліджень наукового характеру є досягнення підвищеної стабільності процесу різання при роботі на фрезерно-центрувальному верстаті фрезами із демпфуючими елементами

За основу можна прийняти методику досліджень наукового плану у наступній послідовності:

- 1) Розроблення структури системи фрезерно-центрувального автомату як замкнутої технічної системи.
- 2) Графо-аналітичне дослідження компонентів і функцій системи фрезерно-центрувального верстату.
- 3) Принципові підходи до регулювання процесом різання при фрезеруванні.
- 4) Вивчення кінематичної схеми фрезерно-центрувального оброблення і встановлення характеру нерівномірностей процесу фрезерування торців циліндричної деталі.
- 5) Дослідження характеру зміни динамічних факторів (окружного зусилля) і крутного моменту різання під час фрезерування торців вала.
- 6) Огляд комплексу технічних рішень конструкцій фрез для усунення нерівномірностей і нестабільності процесу фрезерування.
- 7) Конструкційний аналіз фрез із демпфуючими елементами.
- 8) Аналітичне дослідження математичної моделі процесу фрезерування із врахуванням його нерівномірностей.
- 9) Побудова і комп'ютерний аналіз математичної моделі фрезерування інструментами із демпфуючими елементами.
- 10) Графічна інтерпретація результатів, отриманих в процесі моделювання.
- 11) Вироблення висновків по розділу 3.



### 3.2. Структура технічної системи фрезерно-центрувального напівавтомату

Для проведення наукового дослідження зупинимось на побудові структури фрезерно-центрувального верстату-напівавтомату як технічної системи (ТС ФЦВ) [5]. Таку систему можна зобразити як об'єднання ряду підпорядкованих систем, а саме системи оброблення; системи маніпулювання об'єктами; системи керування і контролю. Між вказаними системами циркулюють різні потоки: енергетичні, інформаційні і матеріальні. Так (рис. 3.1), Від системи керування і контролю йде інформаційний сигнал до системи оброблення, і при цьому існує зворотній зв'язок. В свою чергу система оброблення знаходиться у взаємопов'язаних матеріальних потоках із системою маніпулювання об'єктами технологічної операції (заготовками, інструментами, пристосуваннями та іншими). Система оброблення також видає незворотній матеріальний потік у вигляді готової обробленої деталі. Всі системи отримують енергетичне забезпечення  $E$ .

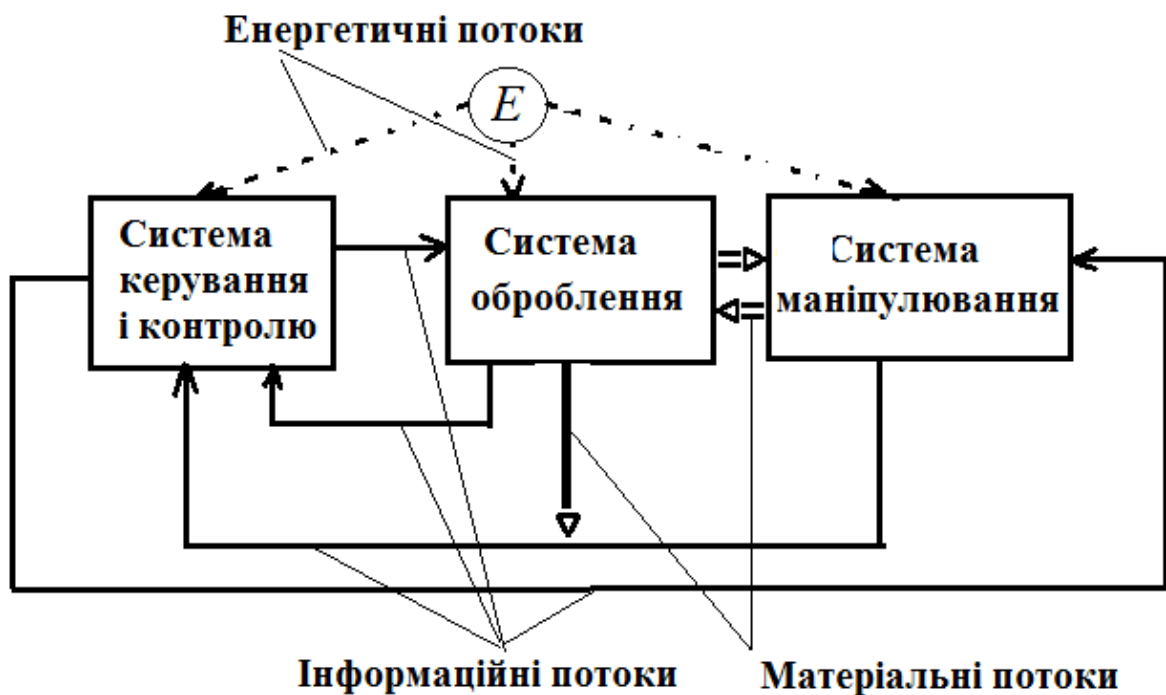


Рисунок 3.1- Система ТС ФЦВ із відповідними потоками

Система керування отримує зовнішню інформацію щодо креслення, технології на основі введеної програми і даних від давачів контролю. Ці дані поступають до системи оброблення. Система маніпулювання відповідно відповідає за завантаження і кріплення заготовок, їх переміщення, заміну інструментів і пристосувань.

Таким чином, відповідно до існуючих положень теорії технічних систем [5] фрезерно-центрувальний верстат-напівавтомат можна представити як технічну систему **TS**, яка складається із множин: компонентів верстату  $\mathbf{K}=\{k_1, \dots, k_i\}$ ; співвідношень  $\mathbf{R}=\{r_1, \dots, r_j\}$ ; властивостей  $\mathbf{P}=\{p_1, \dots, p_s\}$ . Отже, сукупність складових такої технічної системи можна зобразити векторним добутком:

$$\mathbf{TS}=\mathbf{K} \times \mathbf{R} \times \mathbf{P}.$$

Розібємо систему верстата на три описані системи: 1) оброблення, 2) керування і контролю та маніпулювання і представимо **TS** у вигляді графа (рис. 3.2).

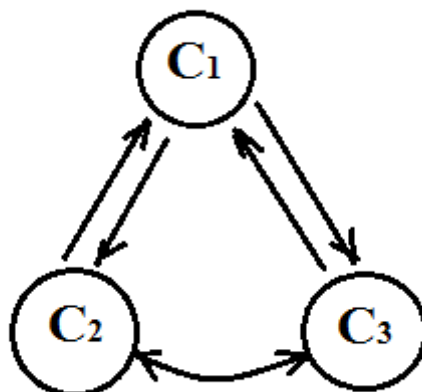


Рисунок 3.2 – Граф верстату як технічної системи

Вершинами графа є: кореневою – система оброблення  $C_1$ ; двома іншими – система керування і контролю  $C_2$  та система маніпулювання  $C_3$ .

Для побудови умовно повного графа, який би міг описати всі сторони даної технічної системи верстату необхідно проаналізувати системи  $C_1$ ;  $C_2$ ;  $C_3$  з точки зору закладених функцій.

Основною системою є система оброблення (рис. 3.3). Оброблення відбувається завдяки забезпеченню для заготовки  $Z$  та інструменту  $I$  виконання певних функцій.

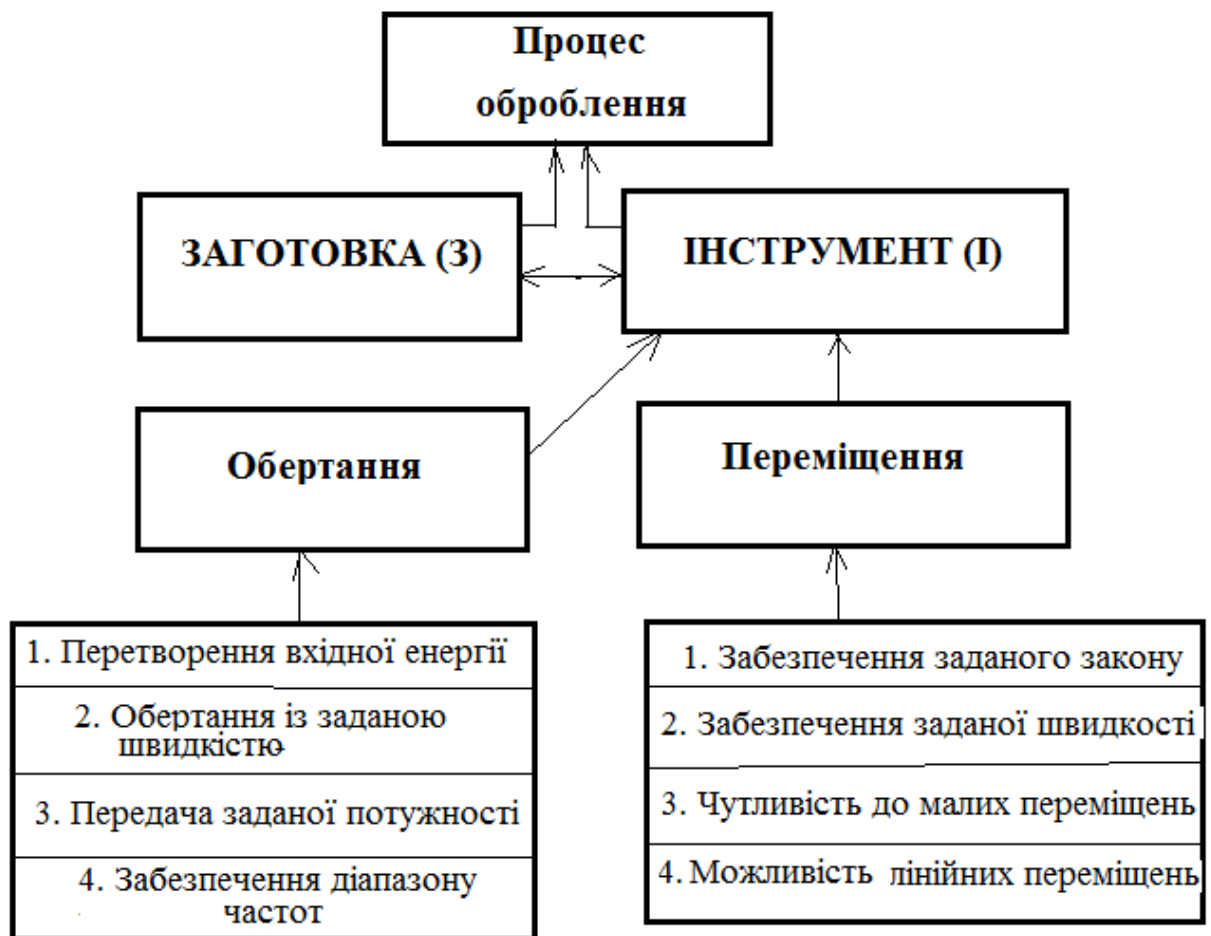


Рисунок 3.3 – Функціональна схема системи  $C_1$

В процесі оброблення заготовка та інструмент взаємодіють між собою [22]. Інструменту надаються можливості обертання і переміщення вздовж осей  $X$  і  $Z$ .

Для обертання інструменту повинно відбутись перетворення вхідної енергії у механічну; забезпечення заданої швидкості обертання; передача заданої потужності та забезпечення відповідного діапазону частот обертання.

Переміщенню теж повинен бути наданий заданий закон і забезпечена розрахована швидкість. При цьому повинні бути створені достатня чутливість до малих переміщень і можливість здійснювати лінійні переміщення.

Схема для системи  $C_2$  показана на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Функціональна схема системи  $C_2$

Ця схема передбачає функції керування і контролю. Стосовно заготовки – це керування: головним рухом верстату, затиском заготовки, системою її маніпулювання, самою системою контролю і обслуговуючою системою (не показана). Також передбачені відповідні контрольні функції. Стосовно інструменту система  $C_2$  передбачає керування і контроль: приводу подач; закріплення інструменту; власне станом інструменту та маніпулюванням

інструментом. Система керування і контролю також керує технологічним спорядженням ТС.

Ще однією дуже важливою системою є система маніпулювання  $C_3$  (рис. 3.5). Для заготовки ця система передбачає функції затиску, зняття, переміщення готових деталей. Щодо інструменту – то це: переміщення в зону оброблення; закріплення і зберігання інструменту, а також переміщення інструменту для його контролю і здійснення загострювання.

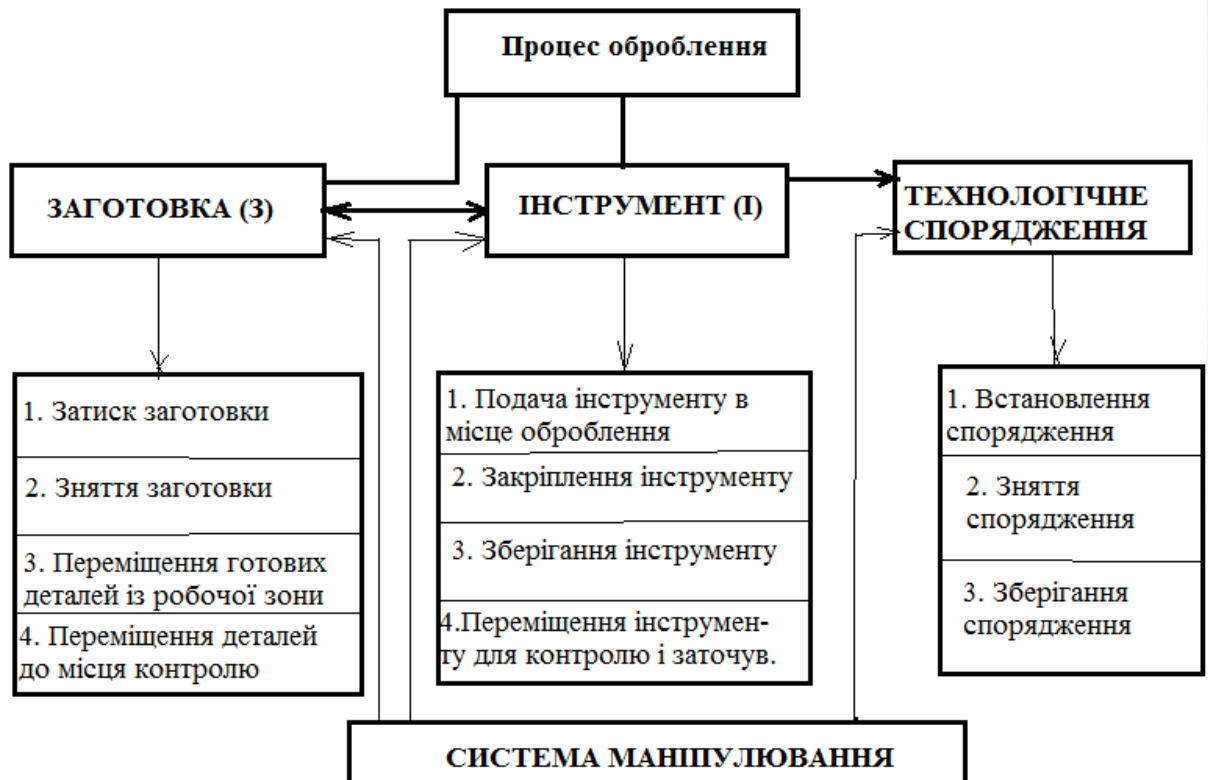


Рисунок 3.5 – Схема функцій системи  $C_3$

Тепер розділимо систему верстата на компоненти та проведемо аналіз функцій, які ці компоненти виконують.

Спочатку розглянемо систему  $C_1$ .

Система  $C_1$  складатиметься із 5 блоків: 1) заготовки  $K_1$ ; 2) приводу головного руху  $K_2$ ; 3) інструменту  $K_3$ ; 4) подач  $K_4$ ; 5) позиціонування інструменту  $K_5$ . Ці блоки виконують відповідні функції, а саме:

$K_1: F_1$  – закріплення заготовки;

$K_2: F_2^1$  - перетворення енергії приводу в механічну;

$F_2^2$  – передача потужності;

$F_2^3$  – забезпечення необхідного діапазону передач;

$K_3: F_3$  – закріплення інструменту;

$K_4: F_4$  – забезпечення закону переміщення вздовж осей X і Z;

$K_5: F_5^1$  – забезпечення чутливості до малих переміщень.

Тепер розглянемо систему керування і контролю  $C_2$ .

Ця система складається із 5 блоків, тобто систем: 1) керування приводом головного руху  $K_6$ ; 2) керування приводом подач  $K_7$ ; 3) керування технологічним спорядженням  $K_8$ ; 4) керування контролем  $K_9$ ; 5) власне контролю  $K_{10}$ .

Ці блоки виконують такі функції:

$K_6: F_6^1$  – керування приводом головного руху;

$F_6^2$  – керування затиском заготовки;

$F_6^3$  – керування маніпулюванням заготовок;

$K_7: F_7^1$  – керування приводом подач;

$F_7^2$  – керування закріпленням заготовки;

$F_7^3$  – керування маніпулюванням інструментом;

$K_8: F_8$  – керування маніпулюванням технологічним спорядженням;

$K_9: F_9$  – керування системою контролю;

$K_{10}: F_{10}^1$  – контроль приводу головного руху;

$F_{10}^2$  – контроль затиску заготовки;

$F_{10}^3$  – контроль приводу подач;

$F_{10}^4$  – контроль закріплення інструменту;

$F_{10}^5$  – контроль і діагностика інструменту;

$F_{10}^6$  – контроль технологічного спорядження.

Тепер розглянемо систему  $C_3$ .

Така система (маніпулювання) складається із 3 блоків: 1) заготовкою  $K_{11}$ ; 2) інструментом  $K_{12}$ ; 3) технологічним спорядженням  $K_{13}$ .

Функції системи  $C_2$  такі:

$K_{11}: F_{11}^1$  – затиск заготовки;

$F_{11}^2$  – зняття заготовки;

- $F_{11}^3$  – переміщення заготовки;
- $K_{12}$ :  $F_{12}^1$  - закріплення інструменту;
- $F_{12}^2$  – переміщення інструменту;
- $F_{12}^3$  – зберігання інструменту;
- $K_{13}$ :  $F_{13}^1$  – встановлення ТС;
- $F_{13}^2$  – зняття ТС.

На основі викладеного матеріалу будемо мультіграф фрезерно-центрувального верстату-напівавтомату (рис. 3. 6).

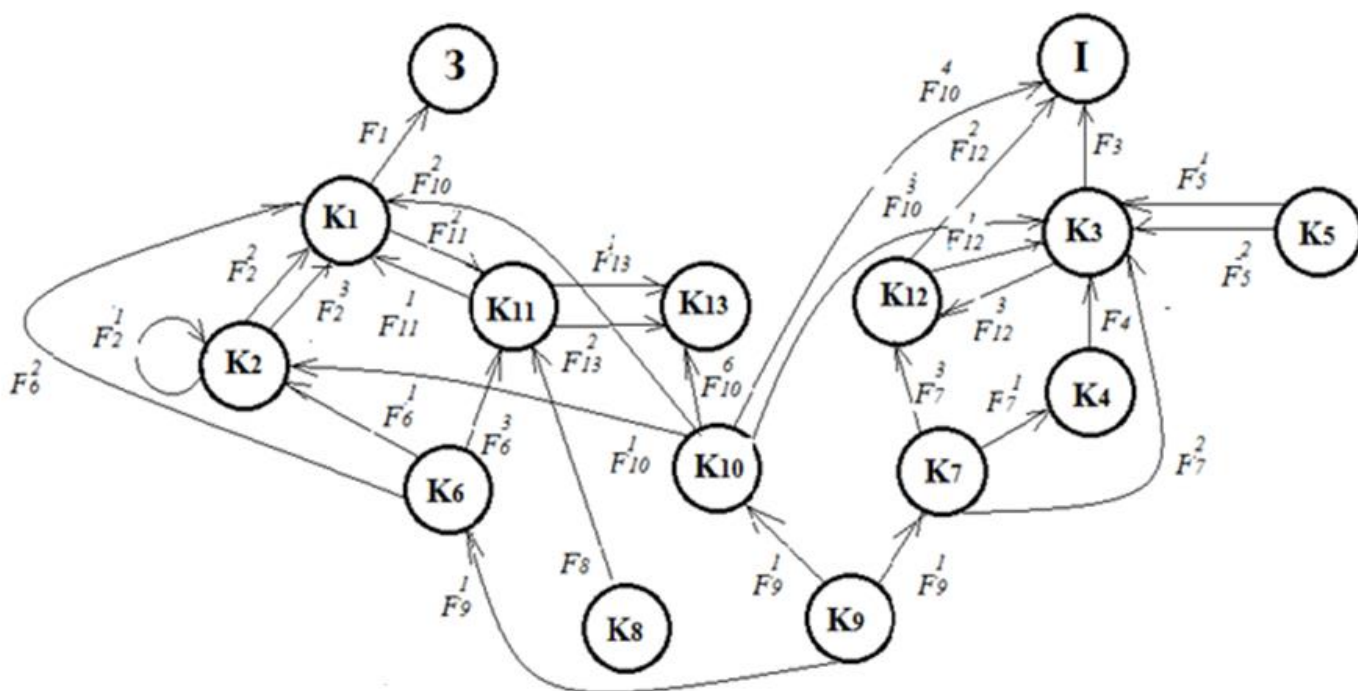


Рисунок 3.6 – Узагальнений мультіграф структури і функцій верстату

### 3.3. Принципи регулювання процесу фрезерування

Основною проблемою процесу фрезерування є виникнення вібрацій, що супроводжують процес, і вплив цих вібрацій на точність і якість обробки[6,7,8,21].

У реальному виробництві намагаються добитись зниження рівня вібрацій шляхом застосування відповідної схеми фрезерування. Також враховують технологічні фактори: матеріал оброблюваної заготовки; ширину фрезерування та інші фактори.

Переважно вважають, що попутне фрезерування є більш вібростійким порівняно із зустрічним [21]. Проте здебільшого раціональний вибір схеми не дозволяє досягти належного значення вібростійкості процесу. Тому часто схиляються до заниження режимів різання, що негативно відображається на параметрах продуктивності фрезерування.

Одним із застосовуваних на практиці методів боротьби із коливаннями є збільшення жорсткості технологічної обробної системи за рахунок підвищення коефіцієнтів жорсткості всіх її елементів[18]. Це проявляється у зміні компоновки верстано-інструментальної системи, зміцненні конструктивних елементів і підвищенні жорсткості стиків. Таких змін досягають ще на стадії проектування. Проте це вимагає значних матеріальних затрат за рахунок суттєвих змін конструкції верстата. Крім того було встановлено, що збільшення жорсткості компонентів приводу головного руху дозволяє збільшити граничну глибину різання, але це не є чинним на частотах, які формує привід подачі. Збільшення ж характеристик жорсткості власне приводу подачі не завжди призводить до забезпечення належної вібростійкості верстата загалом.

Істотно важливим є оброблювання із оптимальною швидкістю різання або із швидкістю різання, яка змінюється періодично.

Вчений Merrif запропонував метод визначення границь стійкості до коливань під час фрезерування на основі пелюсткової діаграми (рис. 3.7).





Рисунок 3.7 - Діаграма Merrifa

Ця діаграма показує, що, крім швидкості обертання шпинделя на вібростійкість впливає відношення статичних жорсткостей:  $k_c$  сили різання і  $k_m$  динамічної системи.

Таким чином, проблему забезпечення вібростійкості слід вирішувати в комплексі.

При цьому скористаємось підходом щодо керування формоутворюючими рухами при різанні, [24,26].

Граф регулювання характеристиками формоутворюючих рухів при фрезеруванні може бути зображений так, як показано на рис. 3.8. Гілки графа відображають варіанти формоутворюючих рухів на етапах врізання в заготовку, усталеного фрезерування і виходу із заготовки.

На даному етапі дослідження зупиняємось на параметрі швидкості різання. При перехідних процесах швидкість різання може бути як постійною, так і змінною.

Так, при врізанні фреза може обертатись як з постійною частотою обертання (швидкістю різання  $V_{\text{пост}}$ ), так і із змінною  $V_{\text{змін}}$ . Так само в процесі умовно усталеного процесу фрезерування швидкість різання може бути змінною і постійною. Подібне маємо і при виході фрези загальною із оброблення.

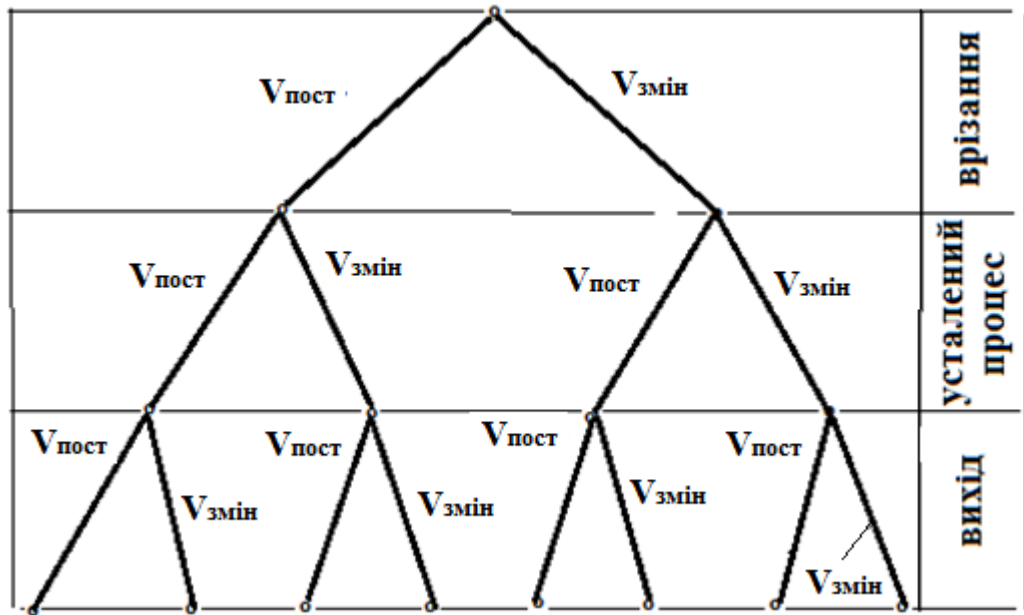


Рисунок 3.8 - Граф поєднання швидкостей різання при фрезеруванні

На рис. 3.9 показані варіанти можливих реалізацій забезпечення змінності швидкості різання при фрезеруванні,[25].

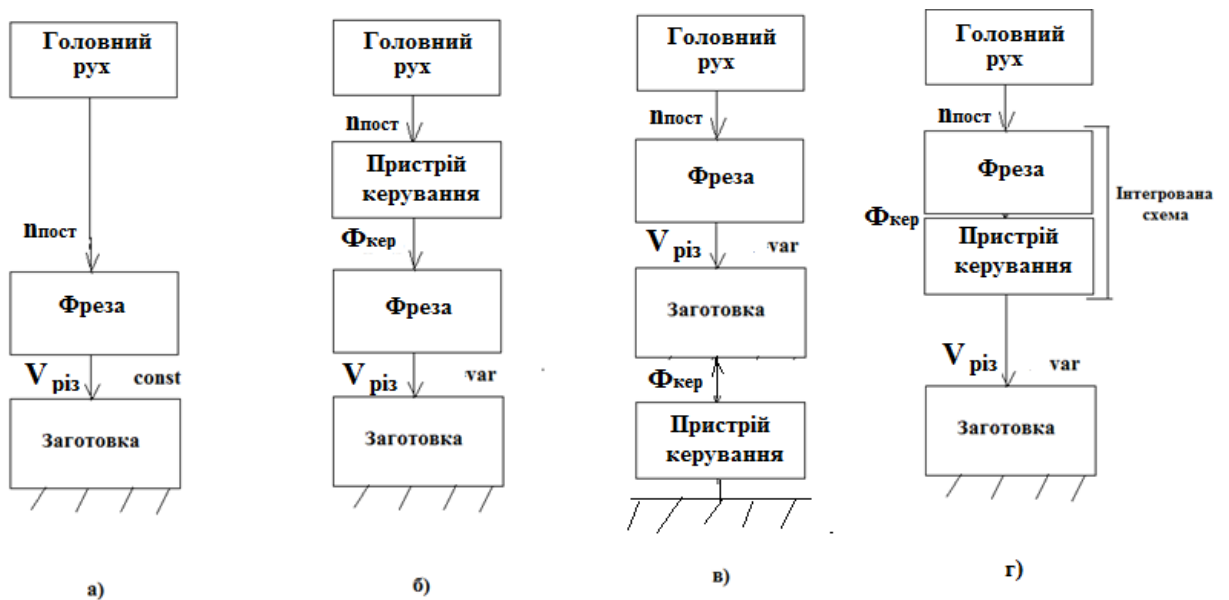


Рисунок 3.9 - Варіанти забезпечення характеру швидкості різання

Варіант (рис. 3.9, а) представляє відомий процес без будь-якого впливу. Рис. 3.9, б вже передбачає встановлення пристрою керування із функцією

керування Фкер перед фрезою. В результаті отримуємо керування швидкістю. Варіант рис. 3.9, в ілюструє встановлення керуючого пристрою для керування заготовкою. При цьому змінюється подача, що вплине на швидкість різання. Заключна картина зображає інтегровану систему керування швидкістю різання, що реалізується у спеціальній конструкції фрези (наприклад, при використанні демпфувальних елементів).

При цьому реалізується принцип встановлення узгодження між векторами швидкостей компонентів збірної фрези.

### 3.4 Технічні конструктивні рішення для зменшення нестабільності процесу фрезерування

Для того, щоб створити змінні значення швидкості різання при фрезеруванні необхідні спеціальні пристрої. Очевидно, що ці пристрої повинні відповідати певним вимогам. Це зокрема, певні параметри зміни швидкості різання (амплітуда, частота); умови гасіння коливань, мінімальні додаткові динамічні навантаження на привід, компактність і можливість встановлення у системі верстату та інші.

Серед пристроїв відповідно до схеми рис.3.9, б можна назвати імпульсні та інші варіатори, які виконують функцію регулювання; пристрої дискретного переключення частот обертання з певною періодичністю; різного роду вібратори і серводвигуни.

Розв'язання проблеми вібростабілізації можна проілюструвати конструкцією фрези із вбудованим електродвигуном (рис. 3.10).

При цьому з метою зрівноваження зусиль різання у фрезу ексцентрично до її корпусу 1 вмонтований ротор. На торці 2 корпусу 1 міститься зуб 3 фрези. У порожнині 4 корпусу співвісно із фрезою встановлена вісь 5. На цій осі з ексцентриситетом  $e_1$  змонтовано маховик 6, який примусово обертається силою магнітного поля від катушок 7. Фреза кріпиться у шпинделі вертату за допомогою хвостовика 8.

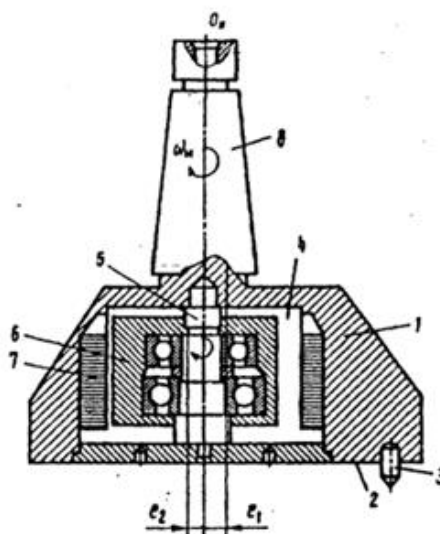


Рисунок 3.10 – Фреза із ексцентричним ротором двигуна

Робота такої конструкції полягає в тому, що в процесі здійснення різання зубом 3 відцентрові сили, викликані не врівноваженням мас корпусу 1 і маховика 6, гасять радіальну складову зусилля різання. Очевидно, що така конструкція є надто складною, і через технічні причини, пов'язані із живленням фрези може мати тільки обмежене застосування.

Очевидно, що зниження інтенсивності вібрацій можна очікувати, якщо вносити зміну у конструкцію самої фрези.

Якщо говорити про підвищення жорсткості самої фрези, то можливості у цьому є обмеженими. Так, варіації у конструктивному виконанні при цьому полягають, як правило, у збільшенні жорсткості корпусу фрези, або ж у спеціальних змінах механізмів кріплення різальних лез.

Проте є технічні рішення, які передбачають не збільшення міцності різальних елементів фрези, а певне зниження їх.

Подібний підхід реалізований у конструкції фрези, показаної на рис. 3.11.

Кожний зуб такої фрези має відмінну жорсткість від інших зубів.

Так, жорсткості цих зубів показане відповідними позначеннями  $j_1, j_2, j_3, j_4$ . Конструкцію фрези можна описати так. У її корпусі 1 міститься державка 2 із різальними пластинами 3. Кожна державка 2 опорною поверхнею дотикається до бічної поверхні 5 відповідного паза корпусу 1.

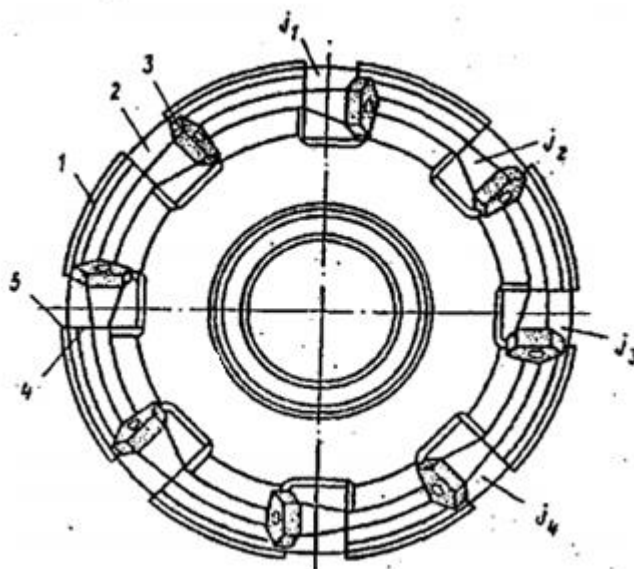


Рисунок 3.11 – Фреза із зубами із змінною жорсткістю

Державки виконані з різною жорсткістю вздовж осі перпендикулярної до своїх опорних поверхонь і, отже, мають різну жорсткість стосовно напрямку сили різання. Тому миттєва жорсткість обробної системи в процесі різання постійно змінюється і це зумовлює зміну власної частоти системи. Така система дозволяє уникати резонансних явищ, але не виключає повністю можливості виникнення неприпустимих вібрацій.

Можна також використовувати конструкції фрез із нерівномірним коловим кроком зубів фрези. Проте вони здатні гасити автоколивання лише за конкретної швидкості різання. Подібний ефект дають фрези із різнонахиленими зубами.

Аналіз показує, що більш доцільним є використання явища розсіювання автоколивань, яке виконують спеціальні демпфери, що кріпляться у різних вузлах верстату. При цьому можуть використовуватись матеріали конструкцій, що мають збільшене внутрішнє тертя. Можуть також застосовуватись спеціальні вузли тертя, або інші з'єднання, платмасові втулки чи напрямні із підвищеним демпфуванням. Такі пристрої носять назву віброгасників. При цьому відбувається істотний зсув частот коливань у за резонансну зону. Поряд з цим досить ефективним є підвищення демпфуючої здатності інструментів. Цей підхід виглядає найбільш наратіональним для подальшого дослідження.

### 3.5 Аналіз конструкцій фрез із демпфувальними елементами

Підставою для створення конструкцій фрез із підвищеною демпфувальною здатністю є спостереження, що через фактично переривчасте різання під час фрезерування технологічна обробна система (яка є пружною системою) перебуває у стані постійної зміни її потенціальної і кінетичної енергій. Відбувається дискретний процес збудження ударних навантажень. Найбільші їх значення припадають на процес врізання різального леза в заготовку і виходу із різання.

Тому доцільним є запобігання лез інструменту від перевантажень ударного характеру за рахунок зменшення миттєвої швидкості різання леза фрези відносно осі шпинделя верстату. При цьому відповідно зменшується і крутний момент різання. Це можна проілюструвати наглядно (рис. 3.12).

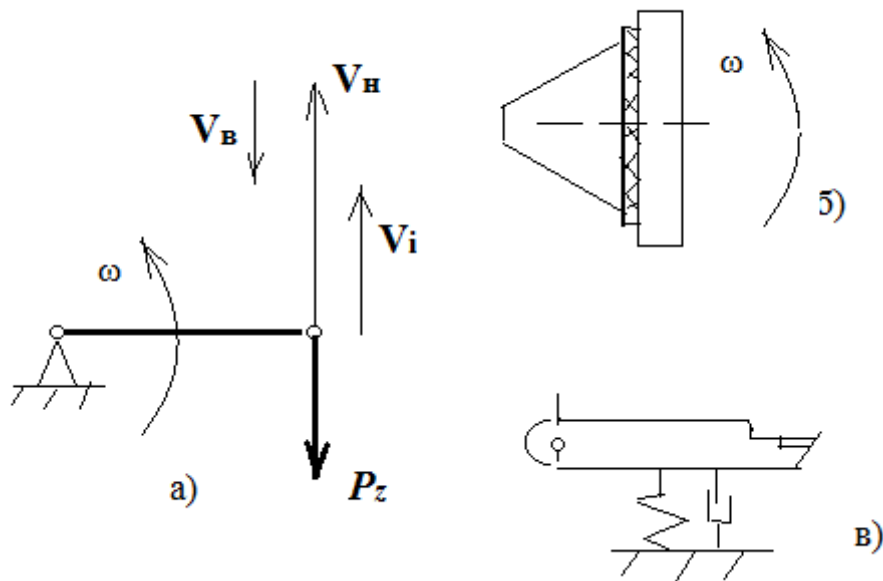


Рисунок 3.12 - Зміна векторів швидкостей при фрезеруванні і компоновки фрез

При обертанні фрези із кутовою швидкістю  $\omega$  відбувається різання із нормативною швидкістю  $V_n$  (рис. 3.12, а). Цей процес супроводжується ударними навантаженнями (зусилля  $P_z$  – змінне, а навантаження пікові). Якщо провести декомпозицію фрези і внаслідок конструктивних змін

змусити реалізувати вектор відносної швидкості  $V_b$ , то результуючою реальною швидкістю інструменту стане  $-V_i$ , яке значно менше за величиною. Такий ефект може бути досягнутим при впровадженні суцільних демпферів для фрез малих діаметрів (рис. 3.12, б), або ж пружно-демпфуючих вставок для кожного зуба фрези (рис. 3.12,в).

Прикладом такої конструкції може служити фреза, в якості пружного елемента для якої використаний торсіон (рис. 3.13).

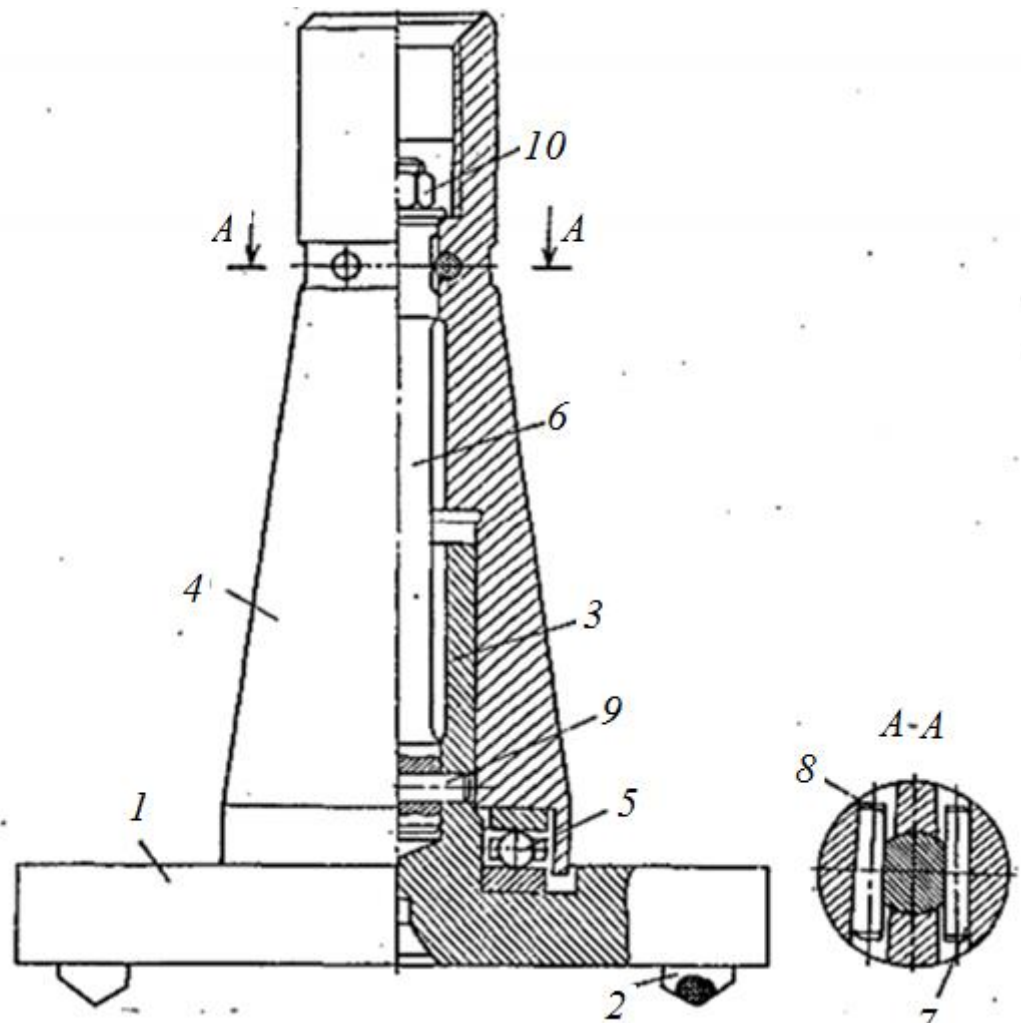


Рисунок 3.13 – Фреза з пружним торсіоном

Фреза містить корпус 1 із різальними зубами 2, які закріплені в корпусі. При цьому хвостовик 3 фрези встановлений з посадковим конусом у оправці 4. Між оправкою і корпусом встановлений підшипник 5 для сприйняття осьових навантажень. Пружний стержень 6 служить для



передавання крутного моменту. Він кріпиться двома штифтами 7 із фасками 8, а в корпусі - штифтом 9. Гайка 10 необхідна для регулювання упорного підшипника 5.

За рахунок гасіння енергії ударів через врізання зубів досягнуте зниження динамічних навантажень, а також підвищена стійкість фрези.

Подібні конструкції фрез представлені на рис. 3.14 і 3.15.

В цих фрезах відповідно до підходу, проілюстрованому на рис. 3.12, забезпечене відставання різальних зубів фрез від руху корпусу інструменту.

При цьому в конструкції фрез впроваджені пружно-демпфувальні елементи.

Фреза (рис. 3.14) побудована на подібності до пружної муфти. Оправка 1 фрези надає рух ведучій пів муфті 3, яка кріпиться до оправки пальцями 2. Через пластини 9 пальці 2 дозволяють передати крутний момент на пружно-демпфувальні елементи 9. Через ці елементи рух передається вже веденій пів муфті 4. Півмуфта 4 з'єднана з корпусом 6, в якому встановлені різальні зуби 5 фрези. Гвинти 7, що контактують із кульками 8 призначені для недопущення биття фрези в радіальному напрямку.

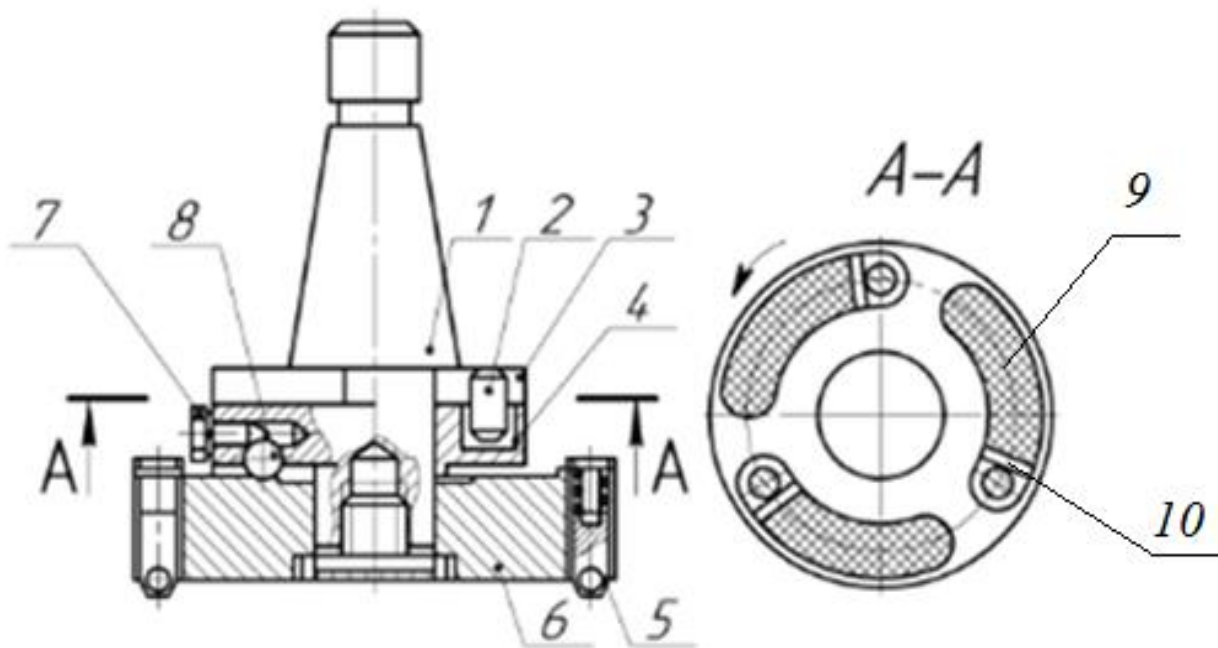


Рисунок 3.14 - Збірна фреза типу муфти пружно-демпфуючого характеру

Інша конструкція фрези передбачає схему рис. 3.12,в. Фреза показана на рис. 3.15.

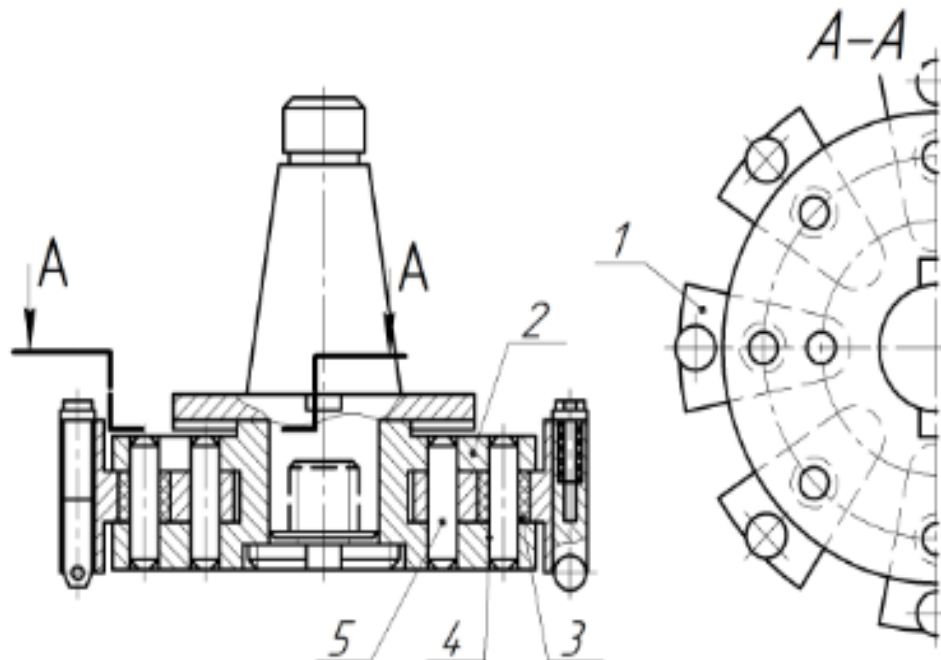


Рисунок 3.15 - Фреза з пружно-демпфувальними втулками

У фрези кріпляться шарнірно встановлені в корпусі 2 державки 1 із різальними зубами. Державки встановлені через пружно-демпфувальні втулки 3. Це дозволяє зубам фрези автономно повертатись відносно шарніра 5. Пружна деформація вказаних втулок, що супроводжується також підвищеним демпфуванням і розсіюванням коливань сприяє стабільній і безударній роботі фрези.

Описані конструкційні рішення є досить вдалимими, зокрема, також щодо чутливості до змін навантажень в процесі роботи. Такі фрези сприяють значному зменшенню ударів при фрезеруванні, зокрема при врізанні і виході зубів із оброблюваної заготовки, а також і вібрацій, які є їх наслідком. При цьому відбувається стабілізація процесу різання і збільшення стійкості фрез.

### 3.6 Розробка моделі динамічних збурень при фрезеруванні

Для початку розглянемо принципову кінематичну схему різання, [2], власне для самого процесу фрезерування, застосовану для роботи на фрезерно-центрувальному верстаті.

Важливим є те, що при здійсненні цього процесу головний рух різання  $Dr$  стосовно окремих точок різальних лез фрези змінює свій напрям. Протягом всього циклу роботи, який має форму сегмента кола напрям головного руху істотно змінюється. Це можна бачити із рис. 3.16.

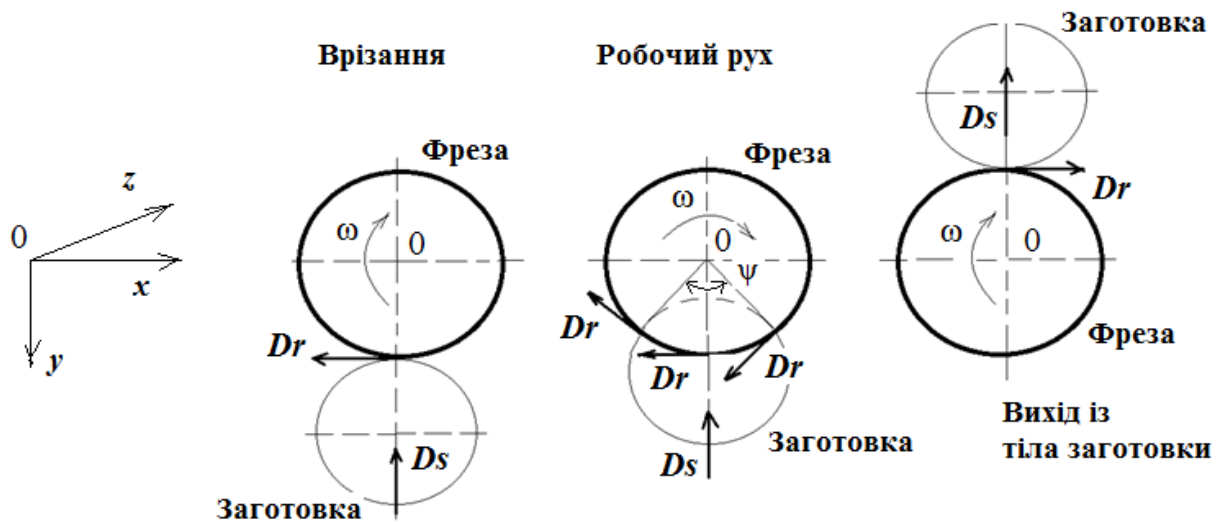


Рисунок 3.16 - Схеми фрезерування на фрезерно-центрувальному верстаті

На рис. 3.16 система координат побудована таким чином, що вісь  $x$  направлена вправо, вісь  $y$  – ліворуч, а вісь  $z$  – на спостерігача. Фреза обертається із кутовою швидкістю  $\omega$ . Таке обертання і є власне головним рухом  $Dr$ . Умови різання у будь-якій точці траєкторії результуючого руху фрезерування визначаються як сукупність зазначеного головного руху різання  $Dr$  (здійснюваного обертання фрези) і руху подачі  $Ds$  заготовки.

На рис. 3.16 показані три етапи оброблення.

На етапі контакту фрези із тілом заготовки (початку врізання) кут між напрямками  $Dr$  і  $Ds$  становить  $90^\circ$ .

При власне фрезеруванні (робочий рух) положення напрямку руху  $Dr$  постійно змінюється. При цьому в конкретний момент часу для різних зубів цей напрямок є різним. Відповідно варіюється і кут контакту  $\psi$ . Він змінюється від значення  $0^\circ$  до значення у  $180^\circ$ . Таким чином, матимемо цікавий момент, коли в процесі фрезерування (робочого ходу) маємо сукупність двох видів фрезерування одночасно – зустрічного фрезерування на першому етапі дуги і попутного фрезерування – на другій половині дуги.

При завершальному виході із тіла заготовки кут між напрямками рухів  $Dr$  і  $Ds$  теж становитиме  $90^\circ$ .

Рис. 1.2 (розділу 1) ілюструє формування товщини зрізу для загального випадку фрезерування. У книзі [2] показано, що як для зустрічного, так і для попутного фрезерування з врахування миттєвого значення кута  $\psi_j$  для вирахування товщини зрізу можна користуватись формулою

$$a_z = s_z \sin \psi_j.$$

При цьому зрозуміло, що для розглядуваного випадку фрезерування торців заготовки подача на зуб теж виявляється змінною, бо значення її фактично формується не тільки рухом подачі, але і циліндричною формою деталі. Тому можна стверджувати, що максимальне значення товщини зрізу можна записати так:

$$(a_z)_{\max} = (s_z)_{\max}.$$

Таке значення є чинним для кута контакту у  $180^\circ$ .

Зазначені міркування є підставою для визначення динамічних збурень при фрезеруванні торців валів на фрезерно-центрувальному верстаті.

Слід відзначити, що величина подачі на зуб в загальному випадку визначається залежністю

$$s_z = \frac{s_0}{z},$$

де  $s_o$  – значення подачі, що забезпечується приводом подачі, мм/об, а  $z$  – кількість зубів фрези. Подача  $s_o$  показує умовне переміщення осі фрези за один оберт фрези. Користуються також поняттям хвилинної подачі:

$$s_{xв} = s_o n = s_z z n,$$

де  $n$  – кількість обертів шпинделя, в якому кріпиться фреза.

Відомо, що кутова швидкість обертання фрези (рад/с) визначається залежністю

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Таким чином, бачимо, що як кутова швидкість  $\omega$  обертання фрези, яка характеризує рух  $Dr$ , так і хвилинна подача  $s_{xв}$ , яка характеризує рух  $Ds$ , залежать від кількості обертів шпинделя, що може визначати динамічний процес і відповідні збурення.

Приступимо до побудови моделі збурень. При цьому покладемо, що у розглядуваному випадку оброблення фрезеруванням не є нерівномірним. Загалом нерівномірність фрезерування визначають коефіцієнтом кратності  $k$  [2]. Відповідно до рис. 1.5 (розділ 1), можна побачити, що нерівномірність процесу фрезерування, виражена у значеннях колової сили різання істотно залежить від коефіцієнту кратності  $k$ .

Припустимо, що для заданої моделі припустимо визначити несприятливе значення коефіцієнту  $k=1,5$ . Таке значення коефіцієнта відобразатиме циклічні зміни зусилля різання за величиною при кутовій зміні положення кожного зуба, тобто періодичні імпульсні збудження обробної фрезерної системи під час різних стадій процесу (врізання, виходу зубів із оброблення, умовно усталеного різання).

Вказану поведінку зусилля різання (її змінну складову) доцільно в часі апроксимувати гармонійною залежністю вигляду

$$P_{зм} = P_{дин} \sin(\omega_D t).$$

Графічне це зображено на рис. 1.17.

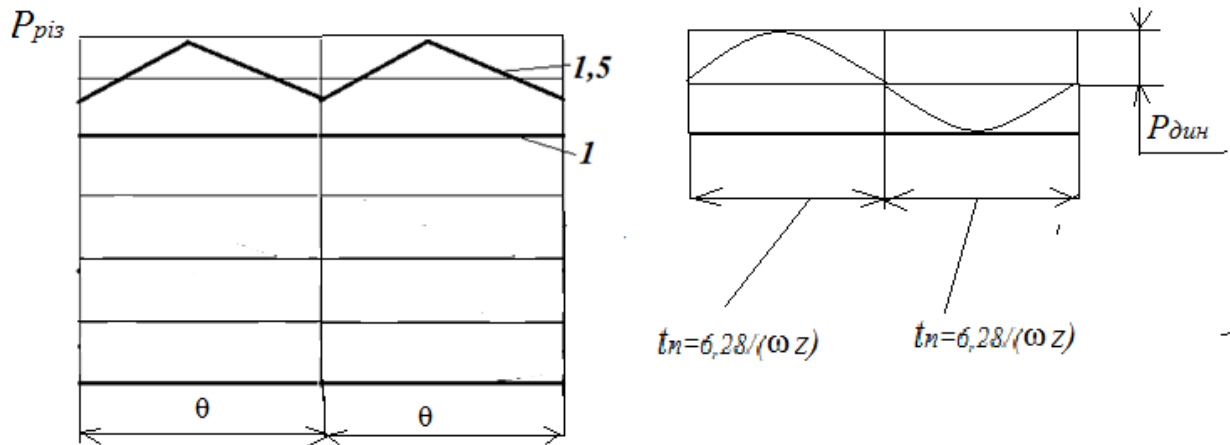


Рисунок 3.17 – Апроксимація зусилля фрезерування гармонійною кривою

При цьому амплітудне значення зміни колового зусилля має значення  $P_{дин}$ , а кругова частота значення –  $\omega_d$ .

Перевіримо адекватність такої заміни побудовою чисельних графіків. Для цього скористаємось пакетом MathCad [23] (рис. 3.18).

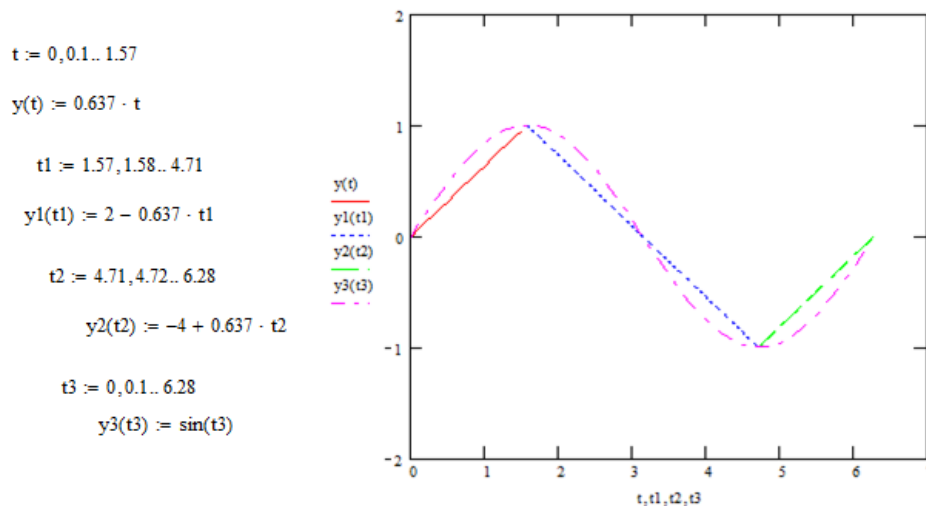


Рисунок 3.18 – Перевірка адекватності апроксимації динамічної зміни зусилля різання гармонійною залежністю

### 3.7 Математична модель коливань інструменту при фрезеруванні із динамічними збуреннями

Необхідність стабілізації рівня вібрацій, а також збільшення періодів стійкості інструментів при фрезеруванні диктує потребу у створенні відповідної математичної моделі для порівняльної оцінки різних варіантів оброблення. Математична модель повинна враховувати пружні властивості обробної системи у їх динамічній постановці, [6,21]. Побудова ж математичної моделі базується на створенні адекватної розрахункової схеми.

Часто при створенні динамічних моделей фрезерних верстатів використовують досить складні моделі, [21]. Так, для опису динаміки вертикально-фрезерного верстату пропонується схема, яка показана на рис. 3.19,.

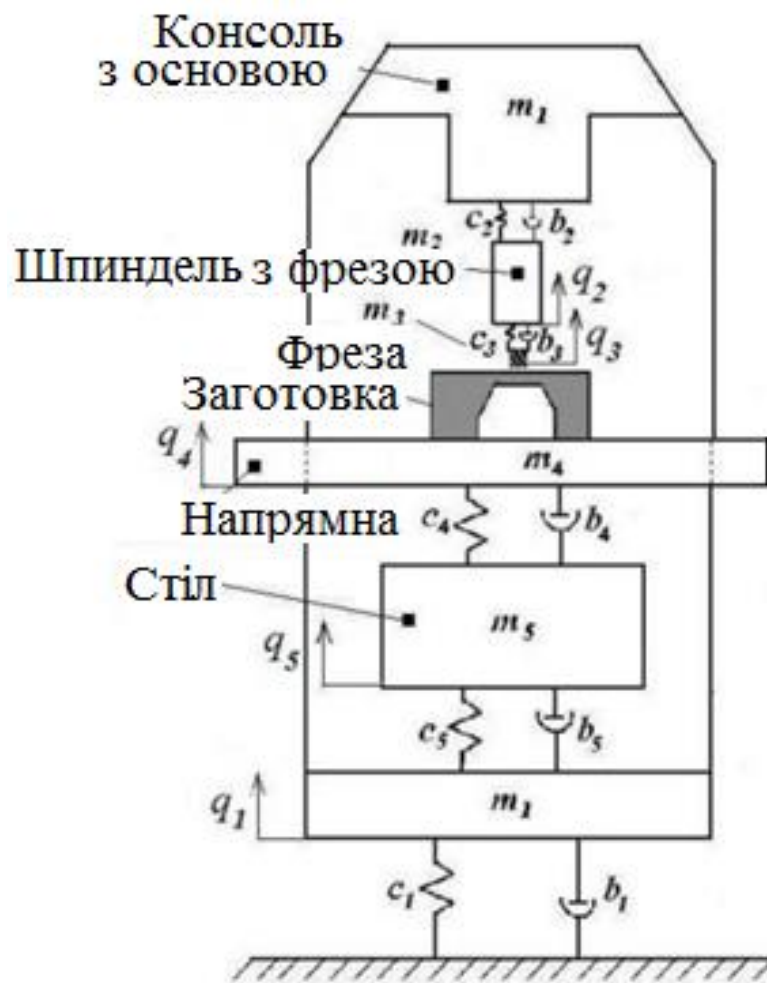


Рисунок 3.19 – Примірна модель вертикально-фрезерного верстату

Така модель враховує наявність 5 інерційних складових: консоль з основою; шпиндель з фрезою; фреза; заготовка; напрямна; стіл. Відповідно розглядаються 5 узагальнених координат:  $q_1$ ;  $q_2$ ;  $q_3$ ;  $q_4$ ;  $q_5$ .

В такій моделі визначити всі динамічні характеристики є надзвичайно важкою задачею. Для цього, як правило, використовують експериментальні підходи. Проте і при цьому виявити всі параметри не завжди вдається, навіть якщо застосовувати вимірювання амплітудно-частотних характеристик. Тому перспективним шляхом виглядає істотне спрощення моделі.

Так, якщо вважати, що блок заготовки із напрямною і столом є набагато вищої жорсткості і припустити, що коливання консолі з основою мало впливають на параметри вібростійкості, то можна перейти до простішої двомасової моделі (рис. 3.20).

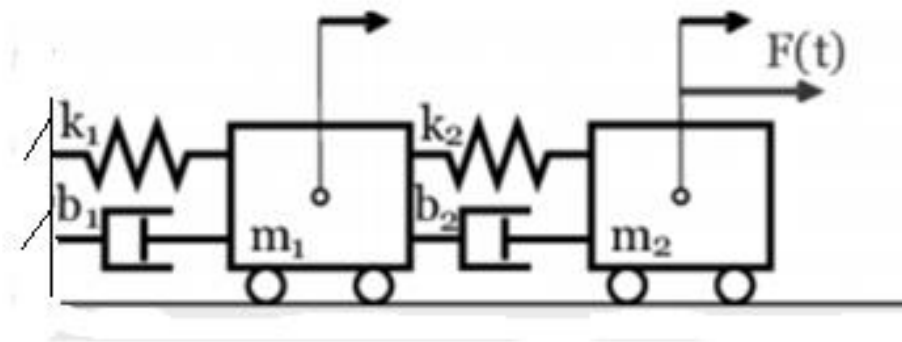


Рисунок 3.20 – Спрощене уявлення про динамічну модель фрезерного верстату

Використання цієї моделі є значно простішим і має ряд переваг. В той же час, як стверджують ряд вчених, [6,21], це не призводить до значної похибки в обчисленнях, але дозволяє піддати дослідження системи всесторонньому аналізу.

Поряд з тим, якщо взяти до уваги, що ми розглядаємо коливання динамічної системи фрезерної головки фрезерно-центрувального верстату, то, зрозуміло, що внаслідок припущення про єдність пружної системи фрезерного шпинделя із фрезою, можемо перейти до



горизонтальної моделі крутильних коливань шпинделя з фрезою при здійсненні оброблення (рис. 3.21).

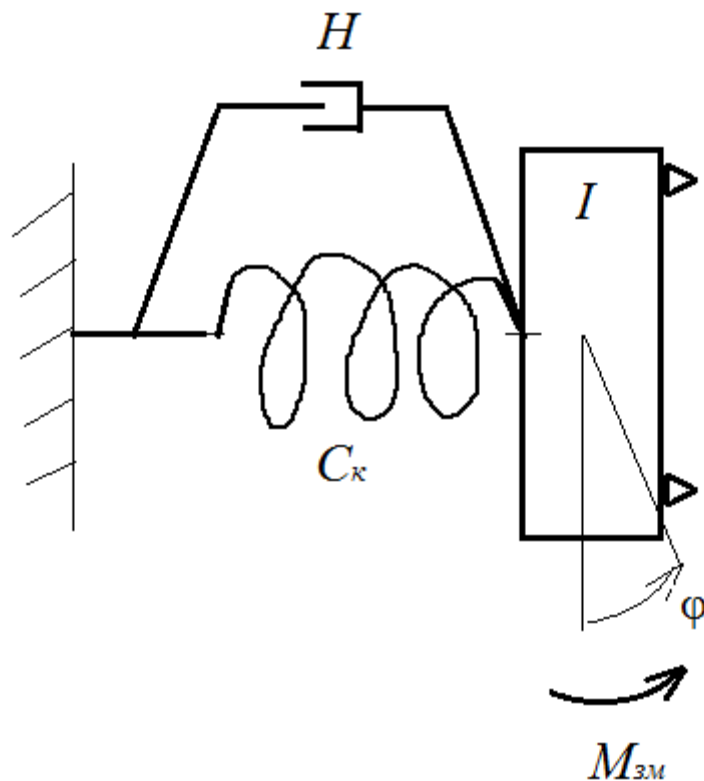


Рисунок 3.21 – Динамічна модель процесу фрезерування на фрезерно-центрувальному верстаті

Бачимо, що ця модель є одно масовою. У ній використовується припущення, що деталь, яка підлягає обробленню, є жорстко закріпленою. Інерційна складова представлена моментом інерції  $I$  маси шпинделя із фрезою. Пружно-демпфуюча система фрезерної головки ілюстрована коефіцієнтом крутильної жорсткості  $C_k$ , а система розсіювання коливань – коефіцієнтом в'язкого тертя  $H$ . Модель розглядає крутильні коливання - зміну кута повороту  $\varphi$  фрези під дією змінного моменту  $M_{зм}$ .

У розділах 1 і 3.6 встановлено, що динамічні збурення (момент  $M_{зм}$ ) в основному викликані через наявні нерівномірності процесу фрезерування через постійні зміни товщин зрізуваного шару на зубі фрези і накладання обробки одним зубом фрези на обробку іншими.

Попередньо (розділ 3.6, рис. 3.18) показано, що зміну сили різання цілком можна апроксимувати кривою, що змінюється за гармонійним законом.

Припустимо, що вектор сили різання зі зміною товщини зрізуваного шару не змінюється за напрямком орієнтовно до зуба фрези. Вважатимемо, що за сумарне навантаження відносно фрези можна вибрати сумарний момент. Тоді можемо записати для сумарного крутного моменту вираз

$$M_{кр} = M_{у} + M_{зм},$$

де  $M_{у}$  – усталене значення крутного моменту, а  $M_{зм}$  – змінні складова крутного моменту.

Таким чином стосовно розробленої динамічної схеми можна запропонувати таку математичну модель:

$$I\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + C_K(\varphi_{у} + \varphi) = M_{у} + M_{зм},$$

де  $\varphi_{у}$  – усталене значення кута повороту.

Таким чином, можна перейти до виразу, який описує зміну кута повороту при коливаннях:

$$I\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + C_K\varphi = M_{зм}.$$

Відповідно до [2], де вказано, що крутний момент на шпинделі дорівнює добутку колової сили на половину діаметра фрези, можна записати, що

$$M_{зм} = M_{дин} \sin(\omega_D t),$$

де  $M_{дин}$  – амплітуда змінної частини крутного моменту, а  $\omega_D$  – колова частота такої зміни.

Наведені міркування дозволяють підійти до закінченої форми математичної моделі крутильних коливань динамічної системи:

$$I\ddot{\varphi} + H\dot{\varphi} + C_K\varphi = M_{\text{дин}} \sin(\omega_D t).$$

Поділимо обидві частини даного рівняння на  $I$ . Тоді отримаємо:

$$\ddot{\varphi} + \frac{H}{I}\dot{\varphi} + \frac{C_K}{I}\varphi = \frac{M_{\text{дин}}}{I}\sin(\omega_D t).$$

Введемо позначення:

$$\frac{H}{I} = 2n, \quad \frac{C_K}{I} = k^2, \quad \frac{M_{\text{дин}}}{I} = h.$$

Тоді матимемо рівняння:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = h \sin(\omega_D t).$$

Розв'язок такого диференціального рівняння другого порядку складає суму загального рішення однорідного рівняння і часткового рішення неоднорідного рівняння:

$$\varphi = \varphi_{\text{заг.однор}} + \varphi_{\text{част.неодн}}.$$

Загальне рішення однорідного рівняння  $\varphi_{\text{заг.однор}}$  визначається з допомогою коренів характеристичного рівняння

$$u^2 + 2nu + k^2 = 0.$$

Зауважимо, що корені - комплексні, і тому

$$, u_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - k^2}$$

тобто загальний розв'язок однорідного рівняння матиме вигляд:

$$\varphi_{\text{заг}} = Ae^{-nt} \sin(\sqrt{k^2 - n^2}t + \alpha)$$

*однор*

В динаміці машин встановлено, що ці коливання визначені початковими умовами і швидко затухають. Тому зупинимось на частковому розв'язку.

Вигляд такого рішення ( $\varphi_{\text{част.неоднор}}$ ) визначається виглядом правої частини початкового диференціального рівняння. Вважаємо, що частоти моменту, який вимушує коливання, і власна крутильна частота динамічної системи фрези не співпадають. Тоді матимемо

$$\varphi_{\text{част}} = B \sin(\omega_{\text{Д}}t + \varepsilon)$$

*неод*

Причому постійні величини  $B$  і  $\varepsilon$  потрібно визначити.

Підставимо значення  $\varphi_{\text{част.неоднор}}$  у диференціальне рівняння руху. Також введемо  $\varepsilon$  у праву частину цього рівняння, тобто зробимо заміну

$$\sin(\omega_{\text{Д}}t) = \sin[(\omega_{\text{Д}}t + \varepsilon) - \varepsilon].$$

Після перетворень і відповідного розв'язування матимемо значення постійної  $B$

$$B = \sqrt{\frac{h^2}{(k^2 - \omega_{\text{Д}}^2)^2 + 4n^2\omega_{\text{Д}}^2}}.$$

Так само для значення  $\varepsilon$  отримаємо:

$$\text{tg}\varepsilon = \frac{2n\omega_{\text{Д}}}{k^2 - \omega_{\text{Д}}^2}.$$

Знайдене часткове рішення і є законом вимушених коливань фрезерної системи. При цьому рух відбувається з частотою сили, яка вимушує

коливання. Винесемо  $\frac{h}{k^2}$  із виразу і тоді отримаємо закономірність щодо вимушених коливань:

$$\varphi = \frac{h}{k^2 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega_D}{k}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{2n}{k}\right)^2 \left(\frac{\omega_D}{k}\right)^2}} \sin(\omega_D t + \varepsilon).$$

Проведемо порівняльне дослідження щодо коефіцієнту динамічності  $\lambda$  для випадків традиційного фрезерування і з використанням фрез із підвищеними пружно-демпфуючими властивостями.

Цей коефіцієнт можна виразити співвідношенням деформації, яка отримується системою під дією змінної вимушуючої сили до величини деформації під дією постійної вимушуючої сили:

$$\lambda = \frac{B}{B_{cm}},$$

де  $B_{cm} = h/k^2$ .

Позначимо відношення частот  $w = \omega_D/k$ . Ця величина є так званим коефіцієнтом неузгодження динамічної системи. Тоді отримаємо вираз:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{(1 - w^2)^2 + \left(2\frac{n}{k}w\right)^2}},$$

динамічні властивості обробної системи. При цьому величина  $n$  вказує на демпфуючі властивості, а величина  $k$  – на властивості жорсткості. Інакше цю формулу запишемо так:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_D^2}{k^2}\right)^2 + \left(2\frac{n\omega_D}{k^2}\right)^2}}.$$

Таким чином, отримаємо значення коефіцієнтів динамічності без підсиленого демпфування  $\lambda_1$  і з підсиленим демпфуванням  $\lambda_2$ :

$$\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_D^2}{k_1^2}\right)^2 + \left(2 \frac{n_1 \omega_D}{k_1^2}\right)^2}},$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_D^2}{k_2^2}\right)^2 + \left(2 \frac{n_2 \omega_D}{k_2^2}\right)^2}}.$$

Для порівняльної оцінки створимо програму у середовищі MathCad [Шан] (рис. 3.22).

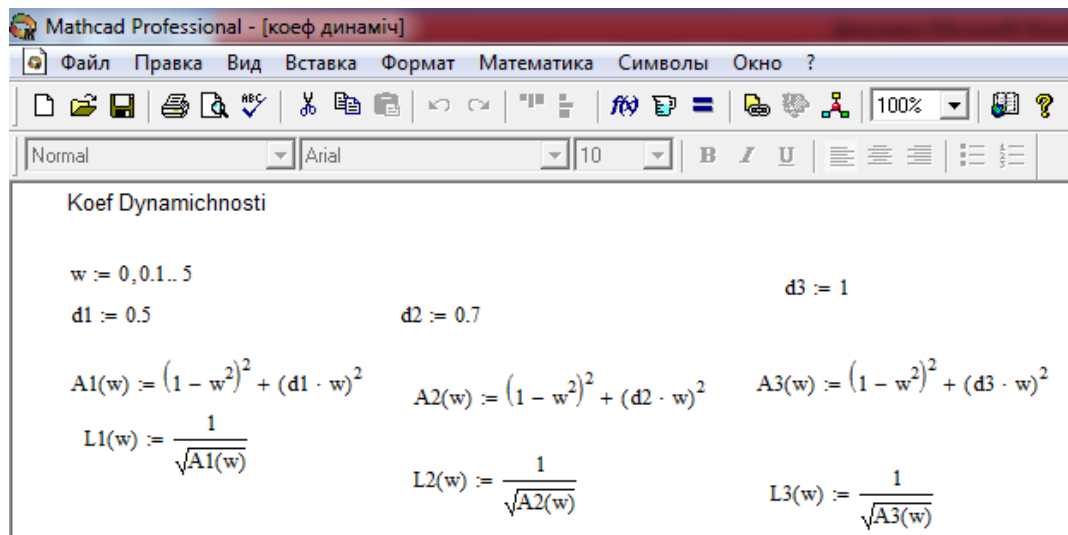


Рисунок 3.22 - Програма розрахунку зміни коефіцієнту динамічності

Спочатку проаналізуємо зміну коефіцієнту динамічності залежно від параметру  $w$ , який характеризує співвідношення частоти вимушуючої сили і частоти власних коливань, для різних значень демпфування (рис. 3.23).

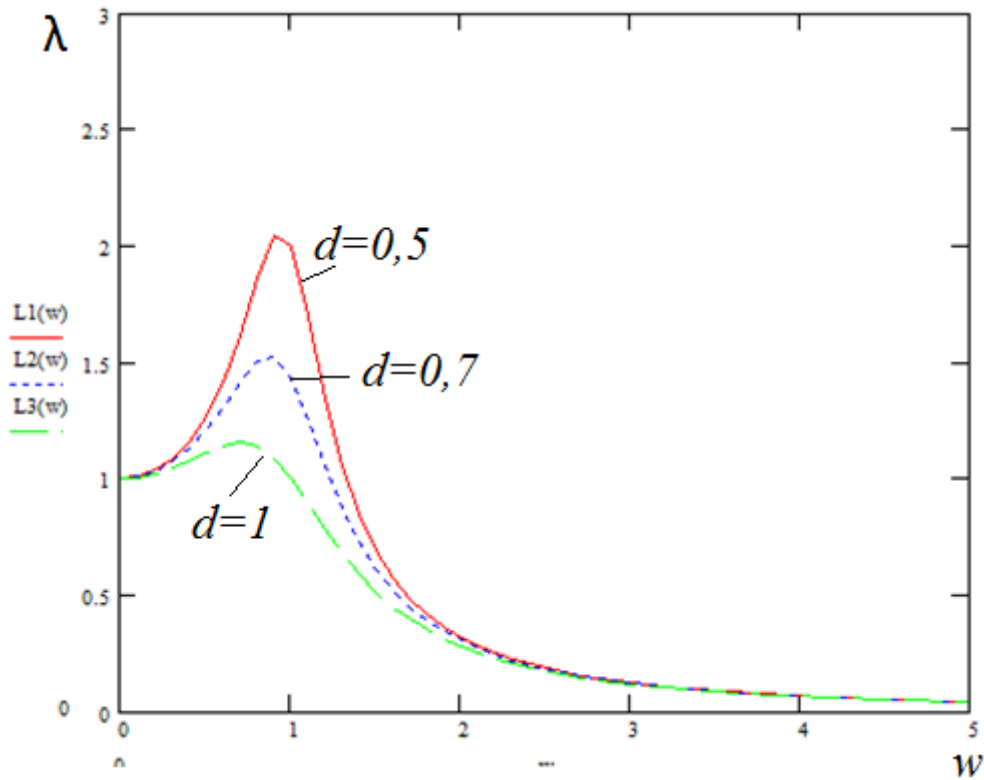


Рисунок 3.23 – Зміна коефіцієнту динамічності фрезерної системи від зміни  $\omega_d/k$  при різних значеннях величини  $d$

Цей рисунок показує, що роботу слід проводити у так званій 30% позарезонансній зоні, причому більш доцільно – у зарезонансній зоні, тобто при  $w = \omega_d/k > 1,3$ . Відповідно при збільшенні демпфування коефіцієнт динамічності спадає.

З цієї точки зору доцільно дослідити роботу системи в залежності від співвідношення коефіцієнту в'язкого тертя і власної частоти. Відповідна програма розрахунку приведена на рис. 3.24.

$$\begin{aligned}
 & d := 0,1, 0,15 \dots 2 \\
 & wd1 := 0,7 \qquad \qquad \qquad wd2 := 1,3 \qquad \qquad \qquad wd3 := 1 \\
 & K1(d) := (1 - wd1^2)^2 + (d \cdot wd1)^2 \quad K2(d) := (1 - wd2^2)^2 + (d \cdot wd2)^2 \quad K3(d) := (1 - wd3^2)^2 + (d \cdot wd3)^2 \\
 & C1(d) := \frac{1}{\sqrt{K1(d)}} \qquad \qquad C2(d) := \frac{1}{\sqrt{K2(d)}} \qquad \qquad C3(d) := \frac{1}{\sqrt{K3(d)}}
 \end{aligned}$$

Рисунок - 3.24. Текст програми розрахунку коефіцієнту динамічності від коефіцієнту в'язкого тертя

Програма передбачає розрахунок зміни коефіцієнту динамічності при двох граничних значеннях  $w=\omega_d/k$  0,7 і 1,3, а також при резонансному значенні  $w=1$  (рис. 3.25).

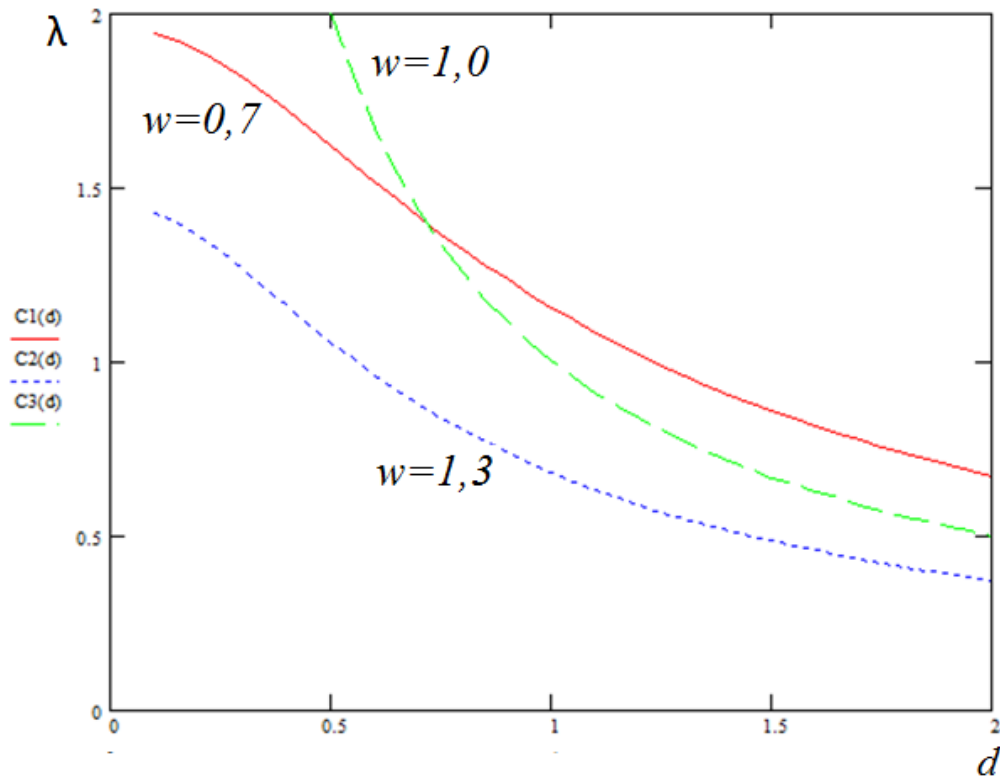


Рисунок - 3.25. Зміна коефіцієнту динамічності при зростанні демпфування. Показані графічні залежності показують, що підвищення демпфування є істотним для всіх співвідношень частот. В той же час воно найбільш доцільне у випадках  $w=\omega_d/k > 1,3$ .

Таким чином, можна зробити висновок, що фрезерування з допомогою збірних фрез із пружно-демпфуючими елементами покращує коефіцієнт динамічності фрезерної системи, є ефективним і доцільним для стабілізації процесу фрезерування і відповідного збільшення періоду стійкості інструментів.



## **.Висновки наукового дослідження**

1. Розроблена структура технічної системи фрезерно-центрувального напівавтомата і побудований узагальнений мультиграф структури та функцій верстату.

2. Запропонований принцип регулювання процесу фрезерування і представлені варіанти забезпечення раціональної швидкості різання.

3. Проаналізовані конструктивні рішення, що зменшують нестабільність при фрезеруванні. Запропоноване рішення про використання пружних елементів у конструкціях фрез.

4. Представлені конструкторські рішення інструментів із пружно-демпфуючими елементами для застосування у роботі фрезерно-центрувального верстату.

5. Проведене моделювання динамічних збурень в процесі фрезерування.

6. Розроблена математична модель, що описує вібрації фрезерної системи із врахуванням нерівномірностей процесу фрезерування.

7. На основі розв'язування динамічної моделі побудовані графічні залежності зміни коефіцієнту динамічності фрезерування в залежності від співвідношення  $w$  частоти вимушуючого моменту і частоти власних коливань, а також коефіцієнту в'язкого тертя.

8. Аналіз представлених графічних залежностей дозволив зробити висновок про доцільність використання підвищеного демпфування у системі із величиною  $w > 1,3$ .

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Вимоги охорони праці при роботі на фрезерних верстатах

Загальні вимоги безпеки розповсюджуються на всі групи металорізальних верстатів. Ці вимоги включають загальні вимоги до верстатів, електрообладнання і місцевого освітлення, а також додаткові вимоги до верстатів різних груп. Необхідно виконувати інструкції з охорони праці.

До самостійної роботи на фрезерному верстаті допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання, інструктаж з охорони праці на робочому місці, ознайомлені з правилами пожежної безпеки і засвоїли безпечні прийоми виконання робіт.

Працівник повинен користуватися справними інструментами, пристосуваннями і тільки за їх прямим призначенням.

Працівник повинен утримувати в чистоті і порядку робоче місце, не захарашувати сторонніми предметами проходи, проїзди, а також підходи до місць розташування первинних засобів пожежогасіння.

При роботі працівник повинен бути забезпечений засобами індивідуального захисту відповідно до діючих норм.

Забороняється працювати на верстаті з обірваним проводом заземлення, а також при відсутності або несправності блокувальних пристроїв.

Також забороняється знімати огороження небезпечних зон працюючого обладнання і запобіжні пристрої.

Наприклад можна запропонувати такий варіант огороження для вертикально-фрезерного верстату [28]. Огороджувальний пристрій складається із огороджувального щитка із оглядовим вікном. Це оглядове вікно виготовлене із безосколкового тришарового полірованого скла товщиною не менш, ніж 4 мм. Установка пристрою по висоті здійснюється з допомогою чотриланкового механізму.

Допускається застосування і інших видів пристроїв, що забезпечують ефективне огороження, наприклад розсувних штор із прозорого маслостійкого матеріалу та інших.

Механічні передачі та інші рухомі частини верстата, а також ті частини, що обертаються, повинні мати огорожу. Оброблювальні вироби, що виступають за габарити верстата, повинні бути огорожені стійкими запобіжними пристроями.

Механізми подачі сучасних фрезерних верстатів можуть мати у своїй конструкції запобіжні муфти [9]. Включення електродвигуна приводу шпинделя і механізму закріплення інструменту заблоковане електросхемою так, що виключається можливість обертання шпинделя при не затиснутому інструменті, і, навпаки, відкріплення інструменту при працюючому шпинделі. Надійність закріплення інструменту контролюється кінцевим вимикачем. При закріпленому інструменті виключається електродвигун механізму закріплення, а на пульті гасне сигнальна лампа.

Кожний робітник повинен добре знати і обов'язково виконувати всі правила техніки безпеки, які викладені у спеціальних інструкціях для осіб, що працюють на різних типах металообробного обладнання, зокрема на фрезерних верстатах.

Забороняється допускати до управління верстатом сторонніх осіб і залишати без нагляду включений верстат.

Працівнику забороняється вмикати і вимикати (крім аварійних ситуацій) устаткування, робота на якому йому не доручалася.

Вимоги до безпеки при роботі на фрезерному верстаті розподіляються на три групи.

Перед початком роботи необхідно привести в порядок спецодяг. Слід підготувати робоче місце, звільнивши підлогу від шматків металу, обрізків, інших предметів, а також перевірити наявність і справність захисного екрана і захисних окулярів, запобіжних пристроїв для захисту від стружки і охолоджуючих рідин.

Потрібно перевірити наявність і надійність кріплення захисних огорож, справність дерев'яного настилу, а також з'єднання захисного заземлення з корпусом верстата.

Потрібно відрегулювати місцеве освітлення та перевірити змащування верстата. При змащуванні слід користуватися тільки спеціальними пристосуваннями. Обовязково слід підготувати гачки для видалення стружки.

Особливо важливо перевірити роботу верстата на холостому ході, а саме:

- а) справність органів управління;
- б) справність системи змащення і охолодження;
- в) справність фіксації важелів включення і перемикання (впевнитись у тому, що можливість самовільного перемикання з холостого ходу на робочий виключена).

Треба встановити чи немає заїдання або надмірного послаблення в рухомих частинах верстата, особливо в шпинделі.

Різальний, вимірювальний, кріпильний інструмент і пристосування повинні бути розкладені в зручному для користування порядку. Вони повинні бути справними, а різальні інструменти - правильно зазагострені, хвостовики та посадочні місця не повинні мати пошкоджень, деформацій.

**При виконанні робіт** необхідно також дотримуватись всіх необхідних вимог.

Перед установкою на верстат оброблюваної деталі очистити її від іржі, окалини, криги, піску, стружки, масла та ін. Це ж стосується і пристосування.

Перед встановленням фрези необхідно перевірити:

- надійність і міцність кріплення зубів або пластин із твердого сплаву в корпусі фрези;

- цілісність і правильність зазагострення пластин із твердого сплаву, які не повинні мати викришених місць, тріщин, припікання.

Встановлення та зняття фрези потрібно проводити в установленому порядку.

При кріпленні деталі за необроблені поверхні слід застосовувати лещата та пристосування з насічкою на затискних губках. Оброблювану деталь встановлювати на верстаті надійно і правильно, щоб виключити можливість її вильоту в процесі обробки.

Деталь до фрези слід подавати після того, як фреза отримає робоче обертання, врізати фрезу в деталь слід поступово, механічну подачу включати до зіткнення деталі з фрезою. При ручній подачі не допускати різких збільшень швидкості і глибини різання.

Перш ніж вийняти деталь з лещат, патрона чи затискного пристрою, потрібно зупинити верстат, для чого вимкнути подачу, потім відвести фрезу від оброблюваної деталі на безпечну відстань і вимкнути обертання фрези (шпинделя).

Необхідно не допускати скупчення стружки на фрезі чи оправці. Видаляти стружку слід тільки після повної зупинки шпинделя спеціальними гачками із захисними чашками і щіткою.

Потрібно зупинити верстат і вимкнути електрообладнання в таких випадках:

- при тимчасовому припиненні роботи;
- при перерві в подачі електроенергії;
- під час прибирання, змащення, чищення верстата;
- при виявленні будь-якої несправності, яка загрожує безпекою;
- при підтягуванні болтів, гайок та інших кріпильних деталей.

**Після закінчення роботи** на верстаті необхідно вимкнути верстат, дочекатися повної його зупинки, прибрати з верстата інструмент та пристосування.

При цьому слід привести в порядок робоче місце: очистити верстат від стружки, металевого пилу та бруду, витерти і змазати тертьові частини верстата згідно схеми заводу-виробника. Вимкнути робоче освітлення.

Інструменти потрібно скласти в інструментальний ящик. Готові вироби, заготовки, інші матеріали і індивідуальні засоби захисту акуратно скласти на відведене для них місце.

Весь використаний обтиральний матеріал слід зібрати у відповідну тару.

Обов'язково потрібно доповісти керівнику робіт про виконання завдання і неполадки, які виникли в процесі в роботи.

Спецодяг слід зняти і покласти в особисту шафу для спецодягу, вимити руки і обличчя теплою водою з милом або прийняти душ.

#### **4.2. Безпека з надзвичайних ситуацій при роботі на фрезерних верстатах**

Під час роботи на фрезерних верстатах на працівника можуть впливати такі **небезпечні й шкідливі виробничі чинники**:

- можливість ураження електричним струмом;
- рухомі механізми та частини устаткування і незахищений різальний інструмент;
- відлітаючі шматочки металу;
- висока температура поверхні оброблюваних деталей і інструментів;
- дрібна стружка та аерозолі мастильно-охолоджуючої рідини;
- підвищений рівень шуму і вібрації;
- підвищена і знижена температура, вологість повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- падіння заготовок і готових деталей.

Кожний робітник повинен добре знати і обов'язково виконувати всі правила техніки безпеки, які викладені у спеціальних інструкціях для осіб, що працюють на різних типах металообробного обладнання, зокрема на фрезерних верстатах, що стосуються надзвичайних ситуацій. Крім загальних вимог у таких інструкціях містяться конкретні вказівки, як попередити аварійну ситуацію, як уникнути нещасного випадку при роботі з багатолезовими інструментами та інші рекомендації.

Для **недопущення надзвичайних ситуацій** забороняється:

- працювати на верстаті в рукавицях, а також з забинтованими пальцями без гумових напальчників;

- нахилити голову близько до фрези чи рухомої деталі;
- спиратися на верстат і дозволяти це робити іншим;
- залишати ключі, пристосування, інструменти, заготовки і готові вироби на працюючому верстаті;
- брати і подавати через працюючий верстат будь-які предмети;
- одягатися чи роздягатися біля працюючого верстату;
- використовувати стиснене повітря зі шлангу для очищення столу верстата, оброблюваних деталей і одягу;
- проводити виміри, перевіряти рукою чистоту поверхні оброблюваної деталі при працюючому верстаті;
- знімати та встановлювати огороження робочого інструменту при працюючому верстаті;
- гальмувати обертання шпинделя натиском руки на частини верстата, що обертаються;
- користуватися місцевим освітленням напругою вище 42 В;
- охолоджувати інструмент чи деталь за допомогою ганчірки;
- при вибиванні фрези з шпинделя підтримувати її голою рукою – для цих цілей слід використовувати еластичну прокладку;
- при фрезеруванні вводити руки в небезпечну зону обертання фрези;
- прибирати стружку зі столу верстата і проводити чистку ріжучого інструменту при працюючому верстаті;
- виконувати самостійно ремонт електрообладнання, заміну вимикачів, розеток, зіпсованих електрозапобіжників;
- навмисно виводити з ладу запобіжні і блокувальні пристрої.

**Особливими є дії працівника при небезпечних і аварійних ситуаціях.**

Аварійна та небезпечна ситуація під час виконання робіт може виникнути в разі: короткого замкнення електромережі; загорання заготовок і деталей з магнію і його сплавів; виривання та розкидання погано закріплених

заготовок, різального інструменту; падіння важких деталей; розкидання стружки і т.п.

У разі припинення подачі електроенергії, в ситуації, яка може викликати поломку устаткування, псування оброблюваної деталі, травмування, верстат слід відключити від електромережі, не допускати сторонніх осіб в небезпечну зону, повідомити про те, що сталося, керівнику робіт.

При появі стуку, вібрації, зміні характерного шуму, перегріві різального інструменту, підшипників, появі запаху гару чи диму негайно припинити роботу, знеструмити верстат и сповістити про це керівнику.

При перегріванні двигуна необхідно зупинити його і дати можливість охолонути. Охолоджувати двигун водою або снігом забороняється.

У разі виникнення пожежі чи загоранні обладнання, обтирального ганчір'я необхідно негайно відключити верстат від електромережі, повідомити про це в пожежну охорону і безпосередньому керівнику та приступити до ліквідації осередку загорання наявними засобами пожежогасіння.

У разі займання горючих речовин необхідно використовувати вогнегасник, пісок, землю або накрити вогонь брезентом. Заливати водою паливо, що горить, і невідключене електрообладнання забороняється.

При раптовому вимиканні освітлення необхідно дочекатися його включення. Пересуватися в неосвітлених приміщеннях небезпечно.

При виявленні найменших ознак отруєння або подразнення шкіри, слизових оболонок очей, верхніх дихальних шляхів необхідно негайно припинити роботу, повідомити про це керівника і звернутися в медпункт.

У разі виникнення аварійної ситуації, небезпеки для свого здоров'я чи здоров'я оточуючих людей слід негайно припинити роботу, відключити верстат, покинути небезпечну зону, повідомити про небезпеку безпосередньому керівнику і вжити заходи по ліквідації аварійної ситуації.



Якщо є потерпілі, потрібно надати їм першу медичну допомогу; при необхідності направити їх після цього до найближчої лікувальної установи або викликати швидку медичну допомогу.

#### **Висновки до розділу 4**

На виконання розділу 4 можна зробити такі висновки.

1. На основі існуючих джерел зроблено пропозиції щодо вимог охорони праці при виконанні фрезерних робіт.
2. Встановлені небезпечні та шкідливі чинники при роботі на фрезерних верстатах та описані дії працівника при небезпечних і аварійних ситуаціях.

## Загальні висновки

1. В існуючих наукових дослідженнях як в Україні, так і закордоном, проводяться роботи з метою підвищення ефективності фрезерування плоских поверхонь. На основі їх аналітичного огляду запропоновані завдання кваліфікаційної роботи.

2. Показано, що ключовою передумовою стабілізації фрезерування є боротьба із нерівномірностями процесу і уникнення небажаних динамічних явищ. Це сприяє розробленню принципів технічних рішень щодо верстатно-інструментальних систем із демпфуючими властивостями.

3. На основі огляду відомих конструкцій фрезерних верстатів і верстату-аналога проаналізоване формоутворення поверхонь і наведений перелік необхідних рухів формоутворення та інших допоміжних рухів в рамках фрезерно-центрувального верстату.

4. В результаті математичного відбору запропонована структурна формула і представлена компоновальна схема верстату.

5. Представлені структурні сітки, проведений кінематичний розрахунок та побудовані графіки кількості обертів для фрезерної і свердлувальної головок, що дало можливість розробити кінематичну схему верстату та здійснити вибір відповідних електродвигунів.

6. Проведений розрахунок конструктивних елементів фрезерного та центрувального приводів фрезерно-центрувального напівавтомату.

7. Для одного із сконструйованих шпindelних вузлів розраховані жорсткісні характеристики та за цим критерієм визначені максимально можливі деформації робочого кінця шпинделя.

8. На основі запропонованої структури фрезерно-центрувального напівавтомата як технічної системи, побудоване представлення структури та функцій верстату у вигляді узагальненого мультиграфа.

9. Із використанням принципового підходу до регулювання процесу фрезерування запропоновані структури забезпечення керуванням швидкістю різання.

10. На основі існуючих конструктивних рішень, покликаних зменшити нестабільність фрезерування, обґрунтовані пропозиції щодо впровадження пружно-демпфуючих елементів у конструкції фрез та представлені відповідні конструкторські рішення щодо цих інструментів.

11. Розроблена динамічна схема та виведена математична модель коливань фрезерної системи верстату із врахуванням нерівномірностей та інших збурень під час фрезерування.

12. В результаті комп'ютерних розв'язків динамічної моделі представлені графіки поведінки коефіцієнту динамічності при фрезеруванні залежно від співвідношення частоти моменту, що спричинює коливання, і частоти власних коливань фрезерної системи, а також коефіцієнту в'язкого опору. На основі аналізу відповідних графіків встановлено висновок про доцільність підвищеного розсіювання енергії коливань при використанні пружно-демпфуючих елементів.

Робота містить завершення у вигляді заходів з охорони праці та пропозицій щодо безпеки у надзвичайних ситуаціях.

## Бібліографія

1. Барбашов, Ф.А. Фрезерные работы/ Ф.А. Барбашов. - М.: Высш. шк., 1986. - 208с.
2. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. - 304с.
3. Егоров, М.Е. Технология машиностроения /М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, В.Л. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1976. – 535с.
4. Балакшин, Б.С. Основы технологи машиностроения /Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 561с.
5. Кузнецов, Ю.М. Теорія технічних систем /Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк. – К. – Тернопіль, 1997. – 310с.
6. Кудинов, В.А. Динамика станков /В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359с.
7. Попов В.И. Динамика станков /В.И. Попов, В.И. Локтев. – К.: Техніка, 1975. – 136с.
8. Луців, І.В. Аналіз частотними методами динамічної стійкості багатолезової самоналагоджувальної обробки / І.В. Луців //Вісник Тернопільського державного університету, 1999, т.4, №1 с.97-103.
9. Металлорежущие станки: Учебник /В.Э.Пуш и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 575с.
10. Пуш, В.Э. Конструирование металлорежущих станков /В.Э. Пуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 561с.
11. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. М.: Машиностроение, 1982. – 208с.
12. Маеров, А.Г. Устройство, основы конструирования и расчет металлообрабатывающих станков и автоматических линий: Учебное пособие / А.Г.Маеров. М.: Машиностроение, 1986.
13. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986.

14. Горбацевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения /А.Ф. Горбацевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 288с.
15. Барановский, Ю.В. Режимы резания металлов: Справочник /Ю.В. Барановский. – М.: Машиностроение, 1972. – 408с.
16. Гуляев, А.П. Металловедение /А.П. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1986. – 272с.
17. Дубиняк, С.А. Расчет деталей и узлов металлорежущих станков с использованием ЭВМ: Учеб. пособие /С.А. Дубиняк, С.Г. Нагорняк, И.В. Луцив, И.Д. Дубецкий. – К.: УМК ВО, 1989. -152с.
18. Детали и механизмы металлорежущих станков. Под ред. Д.Н.Решетова. В 2-х т. – М.: Машиностроение, 1970.
19. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 345с.
20. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков /Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208с.
21. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков /С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199с.
22. Анельчик, Д.Є. Система різання: фізичні основи і оптимізація /Д.Є. Анельчик, С.В. Швець, І.В. Луців, І.Д. Дубецький. Під ред. І.В. Луціва. – Одеса-Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2000. – 145с.
23. Шанайда, В.В. Пакет MathCADв інженерних розрахунках /В.В. Шанайда. –Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2001. – 163с.
24. Нагорняк, С.Г. Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования: Справочник / С.Г. Нагорняк, И.В. Луцив. – К.: Техника, 1992. – 72с.
25. Луців І.В., Хомяк В.А., Щигельський Д.П. Пристрої керування перехідними процесами при свердлінні та фрезеруванні. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Актуальні задачі сучасних технологій» / Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 7-8 грудня 2022року), 2022.

26. Луців І.В. Багатолезове адаптивне оснащення: техніко-економічні показники/ І.В. Луців // Вісник ЖДТУ. - Житомир: ЖДТУ, 2001, 316, с. 52-59

27. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов и др. М.: Машиностроение, 1980. – 536с.

28. Охорона праці : Навч. посіб. / Я.І. Бедрій, Є.О. Геврик, І.Я. Кіт та інші; ред. Є.О. Геврик; Укр. Держ. Лісотехн. Ун-т. – Львів, 2000. – 280с.

29. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин - М.: Высшая школа, 1990. - 366 с. /









