

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 динамічних процесів при точінні  
дворізцевими системами вирівнювального типу  
з врахуванням похибок заготовок

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

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сілярський Т.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луців І.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ярема І.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кобельник В.Р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ляшук О.Л.

(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)

« 1 » жовтня 2021 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Сілярському Тарасу Миколайовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження динамічних процесів при точінні дворізцевими системами вирівнювального типу з врахуванням похибок заготовок  
Керівник роботи Луців Ігор Володимирович, доктор технічних наук, професор  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » 09 2021 року № 4/7-788

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18 грудня 2021 року

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

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналітичний розділ. Аналіз проблематики кваліфікаційної роботи. Задачі дослідження.

2) Аналіз типової технологічної операції токарної обробки на верстаті

3) Обґрунтування конструкції верстату. Вибір компоновки, структурної, кінематичної схеми.

4) Розрахунки і конструювання системи вирівнювання;

5) Розробка методики досліджень і математичної моделі .

6) Дослідження динамічних процесів;

7) Охорона праці і безпека життєдіяльності стосовно об'єкту дослідження. 8) Висновки

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

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

2) Витяг з технологічного процесу механічної обробки типової деталі

3) Аналіз можливих компоновок верстатів. Вибір раціонального варіанту..

4) Розробка конструкції формуютьоруючих вузлів вузла.

Вибір раціональної. Варіант структурної схеми верстату

5) Розробка схем обробки і кінематичної схеми

6) Математична модель динаміки точіння при роботі вирівнювальної системи

7) Результати динамічного дослідження

## 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 життєдіяльності	Клепчик В.М., проректор з АГР		
Нормоконтроль	Ярема І.Т., к.т.н., доц. каф. ВІ		

7. Дата видачі  
завдання

1 жовтня 2021 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблематики кваліфікаційної роботи	Тиждень 1	
2	Інформаційно-патентний огляд	Тиждень 2	
3	Постановка мети і завдань дослідження	Тиждень 2	
4	Опис та обґрунтування конструкцій токарних верстатів	Тиждень 3	
5	Аналіз типового технологічного процесу обробки	Тиждень 4	
6	Розробка структурної та кінематичної схеми верстату	Тиждень 5	
7	Вибір раціональної компоновки верстату	Тиждень 5	
8	Конструювання функціональних вузлів верстату	Тиждень 6	
9	Розробка методики для проведення наукових досліджень	Тиждень 4	
10	Розробка конструкції вирівнювальної системи	Тиждень 5	
11	Представлення математичної моделі	Тиждень 6	
12	Побудова графічних залежностей процесу	Тиждень 7	
13	Дослідження динамічних характеристик при роботі вирівнювальної системи і визначення їх особливостей	Тиждень 8	
14	Застосування елементів автоматизованих досліджень	Тиждень 8	
15	Аналіз графічних залежностей динамічної швидкодії різальних елементів при точінні	Тиждень 9	
16	Висновки щодо дослідницьких рішень	Тиждень 10	
17	Заходи з охорони праці відповідно до завдання	Тиждень 10	
18	Безпека життєдіяльності для розроблених об'єктів	Тиждень 10	
19	Оформлення кваліфікаційної роботи	Тиждень 11	
20	Захист кваліфікаційної роботи	Тиждень 12	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сілярський Т.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Луців І.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## Зміст

Реферат .....	.....
Анотації .....	.....
Вступ .....	.....
1. Аналітичний розділ.....	.....
1.1. Огляд проблематики точності токарної обробки і впливу на неї похибок заготовок і технологічної системи.....	.....
1.2. Формування похибок оброблення внаслідок впливу пружних деформацій технологічної системи.....	.....
1.3. Характерні похибки заготовок.....	.....
1.4. Особливості динаміки металорізального верстату і процесу точіння .....	.....
Висновки до розділу 1.....	.....
2. Технологічні передумови і конструкторська частина.....	.....
2.1. Аналіз призначення та умов роботи деталі.....	.....
2.2. Вибір заготовки .....	.....
2.3. Обґрунтування маршрутної технології оброблення деталі .....	.....
2.4. Розрахунок припусків.....	.....
2.5. Визначення режимів різання .....	.....
2.6. Аналіз рухів формоутворення верстату.....	.....
2.7. Структурно-кінематична схема верстату.....	.....
2.8. Вибір компоновки верстату .....	.....
2.9. Кінематичний розрахунок.....	.....
2.10. Конструювання шпиндельного вузла.....	.....
Висновки до розділу 2.....	.....
3. Науково-дослідна частина .....	.....
3.1. Методика та порядок проведення досліджень .....	.....
3.2. Принципи зменшення і компенсації пружних деформацій.....	.....
3.3. Аналіз дворіцевих токарних установок вирівнювального типу.....	.....

3.4. Розробка математичної моделі.....	
3.5. Вплив твердих включень матеріалу заготовки на реагування системи вирівнювання навантажень.....	
3.6. Вплив радіального биття заготовки на реакцію вирівнювальної системи.....	
3.7. Вплив ексцентриситету закріпленої заготовки на динаміку процесу вирівнювання .....	
3.8. Дослідження динамічної швидкодії вирівнювання навантажень.....	
3.9. Зміст графічних залежностей з використанням комп'ютерних побудов.....	
Висновки до розділу 3.....	
4. Охорона праці і безпека життєдіяльності.....	
4.1. Вимоги до електроприводу верстатів з точки зору охорони праці.....	
4.2. Характеристика умов безпеки робочого місця.....	
Висновки до розділу 4.....	
Загальні висновки.....	
Перелік посилань.....	
Додатки.....	

## РЕФЕРАТ

**Тема роботи.** Дослідження динамічних процесів при точінні дворізцевими системами вирівнювального типу з врахуванням похибок заготовок

**Метою даного дослідження** є підвищення точності процесу токарної обробки деталей на основі зменшення впливу похибок заготовок при використанні дворізцевих вирівнювальних систем

**Об'єкт дослідження** - динамічний процес оброблення деталей на токарному верстаті.

**Предмет дослідження** – закономірності динамічної поведінки вирівнювальних дворізцевих систем при точінні деталей із характерними похибками заготовок

Як наслідок досягнення мети виконаної кваліфікаційної роботи нами одержані перераховані нижче **результати**:

1. Здійснено аналіз відомих досліджень, їх методології, що стосуються проблем точності механообробки та динамічних процесів при точінні, і показані приклади відповідних математичних моделей.
2. Проведено розробку технології обробки деталі, що включає токарні технологічні операції, як основу для аналізу конструкційних особливостей токарного верстата.
3. Проведено опис схем формоутворення і компоновочний синтез верстату токарної групи для обробки заданої деталі.
4. Для синтезованої компоновки проведений кінематичний розрахунок. Як приклад, сконструйований привід головного руху для токарного верстату, що передбачає використання вирівнювальної системи.
5. Розрахований формоутворюючий вузол проектованого токарного верстату.
6. Проаналізовані конструкції токарних систем вирівнювального типу осьових навантажень в процесі точіння.
7. Запропоновано математичну модель динаміки токарної вирівнювальної системи осьових навантажень.

8. Досліджено вплив похибок заготовок на динамічну поведінку при використанні системи вирівнювального типу для випадку паралельного точіння.
9. Проведений аналіз динамічної швидкодії вирівнювальної токарної системи для різних випадків похибок заготовки.
10. Наведені висновки щодо результатів прийнятих рішень і запропоновано засоби охорони праці та безпеки.

### АНОТАЦІЇ

Сілярський Т.М.; "Дослідження динамічних процесів при точінні дворізцевими системами вирівнювального типу з врахуванням похибок заготовок". 133 – Галузеве машинобудування; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2021 р.

Кваліфікаційна робота розглядає результати магістерського дослідження динамічної поведінки в процесі токарної обробки сисем вирівнювального типу, споряджених 2 різцями, з врахування наявних похибок використовуваних заготовок. Метою роботи є підвищення точності токарного оброблення деталей. Для цього використовуються дворізцеві вирівнювальні системи, які в процесі токарного оброблення зумовлюють зменшення впливу похибок заготовок. Представлений аналіз проблематики підвищення точності при точінні і впливу похибок робочого процесу на такі характеристики. Також розглянуті способи дослідження динамічних процесів для випадку токарної обробки, як загалом з точки зору динамічної поведінки пружної системи верстату, так і з точки зору аналізу частотних характеристик. Проведені розрахунки технологічних передумов подальшого аналізу на прикладі розробки операційної технології обробки конкретної деталі. Сформовані схеми формоутворення, які характерні для токарного оброблення і на їх основі запропоновані компоновочні рішення для верстату. За результатами кінематичних розрахунків побудована кінематична схема і сконструйований привід головного руху стосовно обраного токарного верстату, а також лінія його шпинделя. Сформульована мета наукового

пошуку. Для її реалізації стосовно токарних операцій проведений аналіз дворізцевих систем для компенсації похибок обробки при вирівнюванні осьових навантажень різання на деталь. В якості прикладу у дослідженні проведена робота щодо розробки математичної моделі динаміки руху механічної системи вирівнювального типу із двома різцями в процесі точіння заготовок із різними похибками. Математична модель розв'язана аналітично, а її результати проаналізовані із використанням комп'ютерних програм. На основі розробленої моделі побудовані графіки динамічної поведінки системи в робочому процесі. Визначені параметри швидкодії системи для різних випадків та запропоновані відповідні висновки. Кваліфікаційна робота супроводжується технічним обґрунтуванням та аналізом заходів з охорони праці, а також пропозиціями з безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: динамічна поведінка, токарний верстат, дворізцева вирівнювальна систем, амплітудна характеристика, швидкодія

Siliarskyi T.; "Study of dynamic processes in turning by double-cutters equalizing systems considering work pieces errors " 133 – Industrial machinery engineering; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2021.

Qualification Paper deals with the results of Master's study of dynamic behavior in the process of turning systems of equalizing type, equipped with two cutters, taking into account the errors of the workpiece used. The objective of the paper is to increase the accuracy of turning parts. For this purpose double tool systems are used, which in the process of turning cause a reduction in the impact of work piece errors. The problems analysis of increase of accuracy at turningband influence of errors of working process on such characteristics is presented. Methods of research of dynamic processes for the case of turning are also investigated, both in general from the point of view of dynamic behavior of the elastic system of the machine tool, and form the point of view of the analysis of frequency characteristics. Calculations of technological preconditions of the further analysis on an example of development of the processing of a concrete working part are carried out. Shape forming schemes are formed, which are characteristic



for turning, and on their basis structure assembly solutions are proposed for the lathe. Based on the results of kinematic calculations, a kinematic scheme is developed and the main motion drive is designed in relation to the selected lathe, as well as the line of its spindle is constructed. The purpose of scientific research is formulated. For its realization concerning turning operations the analysis of two-cutter systems for compensation of errors of machining in equalizing the axial cutting loadings on a detail is carried out. As an example, the study carries out the development work towards the mathematical model of the dynamics of the mechanical system of the leveling type with two cutters in the process of turning workpieces with different errors. The mathematical model is solved analytically, and its results are analyzed using computer programs. On the basis of the developed model graphs of dynamic behavior of system in the working process are constructed. The system speed performance rates for different cases are determined and the corresponding conclusions are offered. Qualification Paper is accompanied by a feasibility study and analysis of labor protection measures, as well as proposals for life safety.

Key words: dynamic behavior, lathe, two-cutters leveling system, amplitude characteristic, rate of speed performance

## Вступ

Точність більшості виробів машинобудування у визначальній мірі характеризує їх якість [1].

Сучасні машини, які мають велику потужність і є досить високошвидкісними, не можуть добре працювати при недостатній точності їх виготовлення. Це пов'язане із тим, що при роботі машин в такому випадку виникають додаткові динамічні навантаження і вібрації, що викликає різноманітні порушення у нормальній роботі вказаних машин і може навіть призводити до їх руйнування.

Підвищення точності виготовлення деталей, а також і складання вузлів машин, значно сприятиме зростанню довговічності і збільшенню надійності при експлуатації машин та їх механізмів. Це пояснює виникнення жорстких вимог до точності виготовлення деталей і машини в цілому.

Широко відомо, що точність виготовлення деталей у значній мірі залежить від точності заготовки та похибок їх попереднього виготовлення і власне закріплення на верстаті,[2]. Це в повній мірі є характерним для токарної обробки деталей. Тому виправлення похибок заготовок в процесі механічного токарного оброблення власне деталей виступає як актуальна проблема.

Для такого завдання доцільно використовувати багато різцеві системи вирівнювального типу, які були б здатними до компенсації похибок заготовок та похибок їх закріплення під час виготовлення ,[3,4]. В той же час під час такого оброблення актуальними є динамічні процеси, які є надзвичайно важливими для таких систем. Знання впливу динамічних характеристик у процесі вирівнювального різання дає можливість забезпечити необхідні умови роботи вирівнювальних токарних систем. Важливим також є те, що дослідження динамічних процесів при цьому дозволяють розглянути комплексно області застосування вказаних систем з точки зору їх динаміки..

Тому дослідження динамічних процесів роботи систем вирівнювання навантажень різання при дворізцевому точінні валів з вархуванням наявних

похибок заготовок виступає як актуальна та важлива проблематика.

Дана кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-наукового ступеня магістр виконана на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Наукова новизна** результатів кваліфікаційної роботи така:

1. На основі визначення закономірностей між окремими факторами процесу точіння створено математичну модель оцінки динамічної поведінки вирівнювальної системи із двома різцями.
2. Визначені характеристики динамічної швидкодії токарної дворізцевої вирівнювальної системи осьової компоновки при різних похибках заготовок.

**Практичне значення** кваліфікаційної роботи таке:

1. Для токарного верстату розроблені компоновочна структура, кінематична схема та реалізація приводу головного руху стосовно оброблюваної деталі
2. Наведені конструктивні виконання дворізцевих систем вирівнювального типу для токарної обробки
3. Визначені параметри швидкодії дворізцевих систем для різних типів похибок заготовок при осьовому вирівнюванні навантажень різання при точінні

Робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку літератури (38 найменувань), 3 додатків. Загальний обсяг текстової частини – 94 сторінки, 7 таблиць, 32 рисунків.

## **1. Аналітичний розділ**

### **1.1. Огляд проблематики точності токарної обробки і впливу на неї похибок заготовок і технологічної системи**

Проведемо аналіз проблематики, яка розглядається у кваліфікаційній роботі стосовно точності обробки і впливу на неї похибок заготовок та їх закріплення на верстаті. Обмежимося при цьому власне питаннями токарного оброблення.

Слід зауважити, що точність токарної обробки може бути суттєво покращена, якщо при обробці використовувати більш точні заготовки [5]. Підвищення точності вихідних заготовок сприяє зниженню трудомісткості механічної обробки загалом, зменшує величини припусків, і відповідно дозволяє економити матеріал, який обробляється [2,5]. Тому необхідно намагатись отримувати точні та однорідні заготовки. Такий підхід щодо всіх операцій технологічного процесу є дуже важливою передумовою застосування автоматизації при обробленні деталей та їх складанні у вузли.

В той же час обов'язковим є досягнення високої продуктивності та економічності обробки, [3]. Тому загалом проблему слід вирішувати комплексно.

В технології машинобудування визначено, що «під точністю деталі розуміють її відповідність вимогам креслення: за розмірами, геометричною формою, правильністю взаємного розміщення оброблюваних поверхонь і ступенем їх шорсткості», [6].

В даний час необхідну точність обробки заданої заготовки досягають одним із широко відомих методів: пробних проходів та відповідних вимірювань та автоматичного отримання розмірів у випадку застосування налагоджених верстатів [2].

Метод пробних замірів більш часто застосовується в одиничному і дрібносерійному виробництві, також у дослідному виробництві, а метод автоматичного отримання розмірів – у більшості інших випадків. Кожний із зазначених методів все таки супроводжується виникненням різного роду похибок, які носять як систематичний, так і випадковий характер.

Систематичні похибки розрізняють як такі, що для певної партії заготовок є сталими, або ж такі, які змінюються від заготовки до заготовки, які можна трактувати як функціональні похибки, [6].

Розглянемо детальніше основні причини виникнення систематичних похибок.

Перш за все точність обробки визначається точністю верстату, [7]. Зокрема, похибки щодо геометричної точності верстату практично повністю переносяться на оброблювану заготовку. Так, якщо матимемо певну непаралельність осі шпинделя токарного верстату напрямку руху супорта, то отримаємо не циліндричну деталь, а деталь конусної форми. Якщо матимемо похибку паралельності осі шпинделя відносно вертикальної площини, то матимемо в результаті форму заготовки у вигляді гіперболоїда обертання, а максимальний радіус буде [6]:

$$R_{\max} = \sqrt{R^2 + b^2},$$

де  $b$  – відповідне відхилення осі шпинделя від паралельності.

Биття переднього кінця шпинделя токарного верстату викличе перекося осі заготовки в осьовому напрямку, [8].

Систематичні похибки виникають і при зношенні власне верстату, що викликається зміною взаємного розміщення вузлів. Зокрема, зношення напрямних, [9], призводить до зміщення вершини різця в горизонтальній площині. Нерівномірність зношення напрямних також може викликати похибку форми отримуваної деталі.

На виникнення систематичних похибок також впливають як неточність різальних інструментів, [10], так і їх зношення. Оскільки загальне розмірне зношення інструменту обернено пропорційне до подачі, то в ряді випадків збільшенням подачі досягають підвищення точності обробки за рахунок підвищення стійкості інструментів при достатній жорсткості технологічної системи, [6]. Ці та інші міркування вказують, що похибки розмірів і форми отримуваних деталей можна знизити суттєво шляхом відповідного

проектування інструментального спорядження і призначення режимів різання, [11,12].

Важливе значення з точки зору формування точності обробки має закріплення (його умови) заготовки у пристосуванні верстату, [3,8]. Відповідний вплив чинять, звісно, і зусилля різання. Це все впливає на пружні деформації заготовок, що породжує відповідні похибки форми. Так, оскільки при токарній обробці заготовка закріплюється у кулачках токарного патрону, то похибка форми обробки залежатиме від кількості кулачків, їх форми та зусилля затиску, [3]. Якщо форма кулачка відповідає формі заготовки і досягається повне прилягання поверхні кулачка до поверхні заготовки, то похибка геометричної форми оброблюваної деталі знижується, [13].

Крім сил затиску на похибки впливають і інші фактори. Наприклад, при односторонньому знятті припуску в оброблюваній заготовці може відбуватись перерозподіл внутрішніх напружень, [14]. Такі напруження виникають при виготовленні заготовок, зокрема при литті, штамповці, куванні і т.д. Певну роль грають і термічні фактори.

Слід також зупинитись на випадкових похибках. Ці похибки викликані причинами випадкового характеру, які важко описати певними залежностями. В результаті відбувається розсіювання розмірів заготовок, оброблених за одних і тих же умов, [15].

Важливими факторами є коливання твердості оброблюваного матеріалу. Впливає також величина припуску, що знімається, яка в загальному теж носить випадковий характер. Важливою є зміна положення вихідної заготовки при її закріпленні у верстаті стосовно пристосування і різального інструменту. Можуть відбуватись коливання температурного режиму. Дуже важливу роль грають зміни пружних деформацій елементів технологічної системи під дією нестабільних сил різання.

За різних умов обробки розсіювання розмірів підпорядковується різним законам розподілу, серед яких найбільш часто користуються нормальним законом розподілу (законом Гауса), [15]. Так вважають через те, що

результуюча похибка формується одночасною дією великої кількості похибок різного плану, які фактично є незалежними величинами, [6].

Прийнято думати, що фактичне поле розсіювання розмірів заготовок визначається формулою, [6]:

$$\omega = 6\sigma,$$

де  $\sigma$  – відстань від вершини кривої нормального розподілу, де ця крива має точку перегину. При практичних розрахунках вважають, що при  $(+/-)3\sigma$  від положення вершини вказаної кривої її гілки перетинаються з віссю абсцис.

Якщо поля розсіювання різноманітних випадкових похибок позначити як

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n,$$

то зважаючи на певну гарантію врахування всіх факторів, поле розсіювання сумарної похибки можна виразити залежністю, [6]:

$$\omega = 1,2\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \dots + \omega_n^2}.$$

При цьому можна стверджувати, що загальна похибка встановлення може бути відповідно виражена формулою:

$$\Delta_{\text{вс}} = \omega_{\text{вс}} = 1,2\sqrt{\omega_{\text{бз}}^2 + \omega_{\text{зк}}^2 + \omega_{\text{пр}}^2},$$

де  $\omega_{\text{бз}}$ ,  $\omega_{\text{зк}}$ ,  $\omega_{\text{пр}}$  – поля розсіювання похибок відповідно базування, закріплення і пристосування.

Визначено, що загальна похибка обробки може бути виражена такою формулою, [6]:

$$\Delta_{\text{обр}} = 1,2\sqrt{\omega_{\text{м}}^2 + \omega_{\text{вс}}^2 + \omega_{\text{н}}^2} + \Delta_{\text{сист}},$$

де  $\omega_{\text{м}}$  – поле розсіювання щодо виду обробки (для токарних верстатів – 0,013-0,036 мм);  $\omega_{\text{н}}$  – похибка налагодження.

Слід зауважити, що величина  $\Delta_{\text{сист}}$  відображає величину систематичних похибок.

Зупинимось також на формування похибок внаслідок такого важливого фактору як вплив жорсткості і податливості системи обробки.

## 1.2. Формування похибок оброблення внаслідок впливу пружних деформацій технологічної системи

Технологічна система є пружною системою, [16]. Її деформації в процесі оброблення якраз і зумовлюють виникнення систематичних і випадкових похибок, як форми, так і розмірів отримуваних деталей.

Розглянемо формування похибок внаслідок пружної взаємодії різального інструменту із заготовкою при токарній обробці, зокрема, гладкого вала (рис. 1.1). Через дію радіальної складової сили різання  $P_y$  у початковий момент оброблення при знаходженні різця біля заднього центру відбувається згин заднього центру і пінолі, отже, відтиск  $y_{зб}$  задньої бабки. Поряд з цим, відбувається пружний відтиск різця і супорта  $y_{рз}$ . При зміщенні інструменту до лівого кінця вала відбувається пружна деформація передньої бабки  $y_{пб}$  і заготовки  $y_{зг}$ . Вказані деформації збільшують фактичний діаметр оброблюваної деталі.

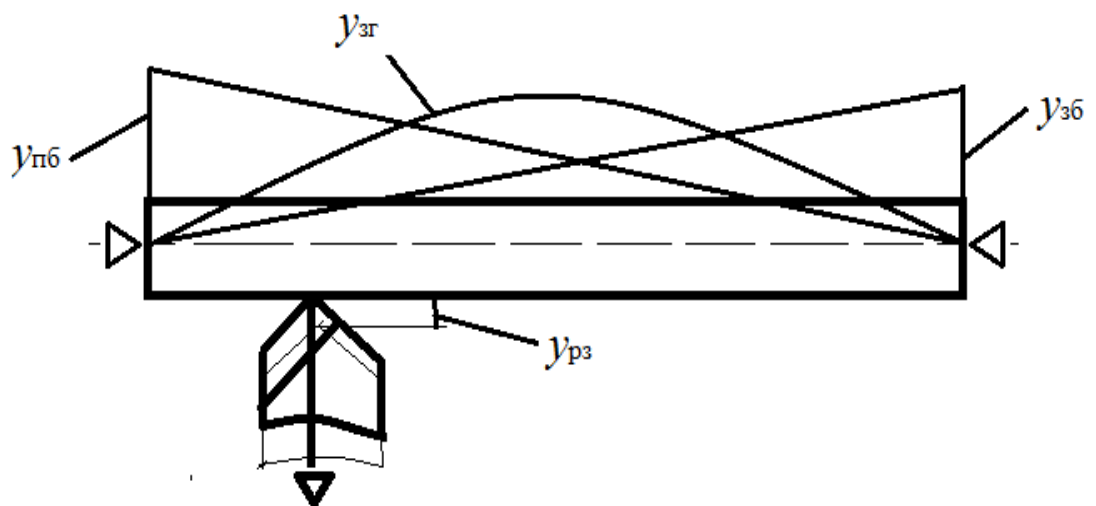


Рис. 1.1. Деформаційна картина при токарному обробленні

Таким чином, спостерігатимемо, що в певному перерізі оброблюваної заготовки фактичний її діаметр набуває значення, [6]:



$$d_{\text{фк}} = d_{\text{нз}} + 2(y_{\text{зб}} + y_{\text{пб}} + y_{\text{рз}} + y_{\text{зз}}),$$

де  $d_{\text{нз}}$  – діаметр, який заданий налагодженням системи на розмір.

Бачимо, що форма і діаметр оброблюваної деталі виявляються змінними по довжині. При обробці маложорстких деталей форма є бочкоподібною через те, що основна деформація визначається пружним відтиском заготовки, а при обробці заготовок великої жорсткості заготовка набуває форми корсета.

Доведено, що для випадку оброблення вала у центрах, коли різець знаходиться посередині заготовки, сумарну податливість верстатної системи можна виразити залежністю, [6]:

$$\frac{1}{j_{\text{вс}}} = \frac{1}{j_{\text{сп}}} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{j_{\text{пб}}} + \frac{1}{j_{\text{зб}}} \right),$$

де  $j_{\text{вс}}$ ,  $j_{\text{сп}}$ ,  $j_{\text{пб}}$  і  $j_{\text{зб}}$  – жорсткості в радіальному напрямку відповідно верстату, супорта, передньої та задньої бабок.

В технології машинобудування, [2], також показано, що найбільші прогини вала при різних умовах обробки можна виразити залежністю

$$y_{\text{зз}} = \frac{P_y l^3}{\chi EI},$$

де  $l$  – довжина гладкого вала;  $E$  – модуль пружності;  $I$  – момент інерції перерізу заготовки (для круглого вала цю величину приймають  $0,05d^4$ ).

При цьому при закріпленні заготовки у центрах  $\chi=48$ ; при обробці вала, який консольно закріплений у патроні  $\chi=3$ ; для вала, який закріплений у патроні і підтримується заднім центром  $\chi=100$ .

Проаналізуємо також вплив на точність оброблення зміщення осі заготовки (рис. 1.2).

При налагодженні інструменту його виставляють на певний (теоретичний) радіус  $r_{\text{тр}}$ . В результаті пружних відтисків системи вісь обертання заготовки зміщується з точки  $0_1$  у точку  $0_3$ . Одночасно зміщується від центру заготовки вершина різця (рис. 1.3).

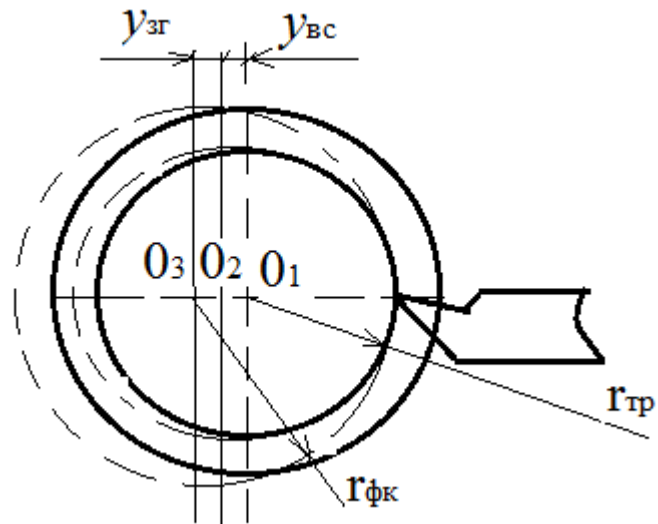


Рис.1.2 Вплив на розмір деталі зміщення осі через відтиски верстату і заготовки

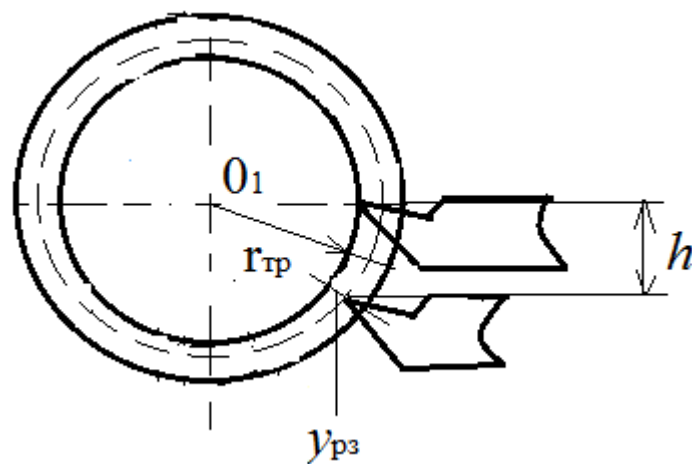


Рис.1.3 Вплив на розмір деталі зміщення вершини різця

При таких пружних відтисках змінюється фактичний радіус обробки, а це фактично свідчить про зменшення фактичної глибини різання:

$$t_{фк} = t_{тр} - (y_{bc} + y_{pz} + y_{3г}).$$

Таким чином, матимемо загальну зміну діаметру оброблення як подвоєний сумарний відтиск технологічної системи, [6]:

$$\Delta d = 2(r_{фл} - r_{тр}) = 2(y_{bc} + y_{pz} + y_{3г}) = 2P_y / j.$$

Беручи до уваги модель зусилля різання у вигляді

$$P_y = C_y s^y t^{x_p} HB^n,$$

матимемо, що

$$\Delta d = 2C_y s^y t^{x_p} HB^n \left( \frac{1}{j_{вс}} + \frac{1}{j_{зз}} + \frac{1}{j_{пз}} \right).$$

Проведений аналіз показує, що при постійній жорсткості технологічної системи по довжині заготовки та при незмінних режимах різання та постійній твердості матеріалу приріст діаметра деталі зберігається однаковим вздовж заготовки і не викликає появи похибки форми.

### 1.3. Характерні похибки заготовок

Доцільно визначити характерні похибки заготовок.

Часто звертають увагу на коливання твердості оброблюваного матеріалу. Ці коливання змінюють величину радіальної складової  $P_y$  зусилля різання. Для випадку оброблення сталі ця сила знаходиться у квадратній залежності від твердості матеріалу (твердість при цьому вимірюється в одиницях по Бріннелю). Приріст вказаної складової при підвищенні твердості матеріалу заготовки в істотній мірі залежить від встановленого значення зусилля різання, а отже від елементів режиму. Зокрема, при зміні твердості на 30 НВ приріст нормальної складової  $P_y$  при зміні подачі в межах  $s=0,06\dots 0,20$  мм/об складає відповідно 19,6...88,0 Н, [6].

Отже, для зменшення коливань сили різання, і відповідно пружних деформацій технологічної системи, при обробленні заготовок різної твердості чистові проходи необхідно проводити із зняттям стружок мінімальної товщини.

Таким чином, при різній твердості окремих заготовок податливість системи обробки викликає розсіювання розмірів оброблених деталей, а при коливаннях твердості у окремі заготовці це призводить до формування на деталі похибок геометричної форми.

Іншим фактором, що характеризує похибку заготовки є коливання припуску на оброблення, які пов'язані із похибкою розмірів початкової заготовки. Слід відзначити, що ці коливання змінюють глибину різання  $t$  і приріст діаметра  $\Delta d$ .

На рис. 1.4 показано, що похибки форми початкової заготовки зумовлюють появу однойменних похибок форми вже оброблених деталей.

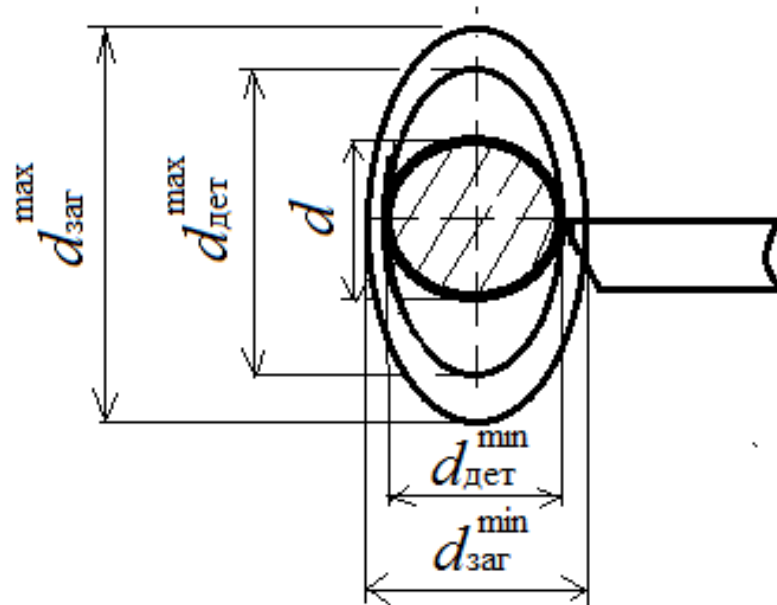


Рис. 1.4. Зміна форми обробленої деталі у порівнянні із похибками форми заготовки

Так, похибка початкової заготовки визначає приріст глибини різання, а, отже, приріст радіальної складової і додаткову деформацію обробної системи в перерізі найбільшого діаметру  $d_{заг}^{max}$  початкової заготовки. Такий відтиск пружної системи призводить до відповідного збільшення діаметру деталі. Таким чином, отримаємо, що похибка форми обробленої деталі матиме значення:

$$\Delta d = d_{дет}^{max} - d_{дет}^{min} = 2\Delta y,$$

де  $\Delta y$  – додатковий відтиск системи в перерізі найбільшого діаметру заготовки.

Отже, бачимо, що похибка початкової заготовки копіюється на готовій деталі як однойменна похибка меншої величини. При цьому овальності

початкової заготовки відповідатиме овальність деталі, так само як конусності – конусність, биттю – биття.

Прийнято вважати, що співвідношення похибок заготовки і деталі називають уточненням  $\varepsilon$ , а обернену величину – коефіцієнтом зменшення похибок, [17]:

$$K_{\Delta} = \frac{\Delta_{дет}}{\Delta_{заг}},$$

де  $\Delta_{дет}$  і  $\Delta_{заг}$  – відповідно похибки деталі і заготовки.

У технології машинобудування доведено, що «після кожного ходу різця похибка заготовки зменшується обернено пропорційно уточненню і жорсткості технологічної системи і прямо пропорційно коефіцієнту зменшення похибок», [6].

Зрозуміло, що у більшості випадків  $\varepsilon > 1$  і  $K_{\Delta} < 1$ , тоді це означатиме, що збільшення кількості ходів різця значно знижує похибку заготовки, і при цьому підвищується точність обробки.

Проте, інколи буває інакше. Зокрема, при обробленні довгого вала малого діаметру із твердого матеріалу при умові низької жорсткості верстату та інструментального блоку може статись, що  $\varepsilon < 1$  і  $K_{\Delta} > 1$ . Тоді при кожному ході різця похибка форми  $\Delta d = 2y_{max}$ , що дорівнює подвоєному прогину заготовки, може навіть зростати.

Є ще один фактор збурення, який впливає на формування кінцевої похибки оброблення, і заслуговує додаткової уваги. Це може бути зміщення осі обертання шпинделя відносно початкового положення в процесі його обертання. Таке зміщення може викликатись за рахунок ексцентриситета шпинделя верстату і в більш значній мірі за рахунок наявності ексцентриситету у самої заготовки. Фактор ексцентриситету відноситься до таких, які не завжди вдається компенсувати. Ексцентриситет може призводити до дисбалансу і з'яви коливань у певному діапазоні частот. Окрім того, при знятті нерівномірного припуску в процесі оброблення заготовок, як вже вказувалося змінюється амплітуда коливань, а, отже в якийсь момент може наступити втрата стійкості руху.

Розглянемо дію ексцентриситету, який призводить до додаткових зміщень заготовки відносно інструменту в процесі оброблення.

Нехай діаметр деталі, який отримуємо після обробки, включає похибку, яка викликана ексцентриситетом. При цьому цей діаметр можна представити виразом

$$d(\tau) = d_d(\tau) + e(\tau) = 2\Delta y,$$

або, якщо перейти до радіусів, то

$$r(\tau) = r_d(\tau) + e(\tau) = 2\Delta y,$$

де  $d_d(\tau)$  і  $r_d(\tau)$  – діаметр і радіус деталі, а  $e(\tau)$  – ексцентриситет.

На рис. 1.5 в площині, яка перпендикулярна до поздовжньої осі деталі, показано вектор  $r_d$  і його складові, які пов'язані співвідношенням:

$$r_d = r_y + r_n + e,$$

де  $r_y$  – вектор, що з'єднує точку, яка знаходиться на осі симетрії деталі  $O_1$ , з точкою, яка знаходиться на осі установочних центрів  $O_2$ ;  $r_n$  – вектор, який з'єднує точку, що знаходиться на осі установочних центрів  $O_2$ , з вершиною різця. При цьому 1 – ідеальна траєкторія руху різця; 2 – фактична траєкторія руху.

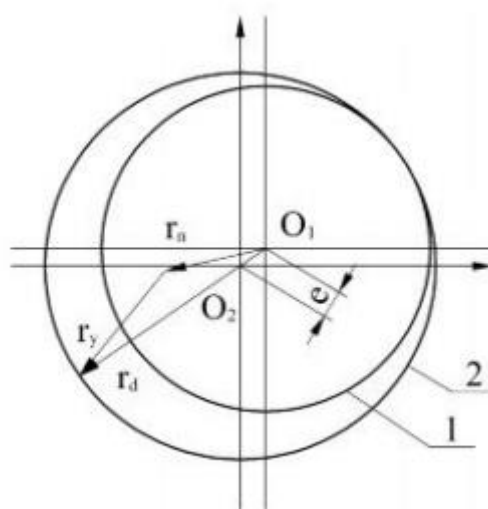


Рис. 1.5. Визначення радіусу вектора деталі з ексцентриситетом

Як видно із рисунку величина  $e$  показує похибку, викликану ексцентриситетом. Таким чином, вплив ексцентриситету прослідковується на готовій деталі періодично.

#### **1.4. Особливості динаміки металорізального верстату і процесу точіння**

Перш за все зупинимось на відомій інформації про динамічні процеси у системи металорізального верстату при точінні.

У сучасних дослідженнях значну увагу звертають на характеристики динаміки металорізальних верстатів саме в процесі різання, [18]. Ці характеристики в переважній мірі визначають результуючу працездатність верстату з точки зору його динаміки, [19]. При цьому при моделюванні такої динаміки використовують поняття динамічної системи верстату, [16].

Загалом відомо, що динамічна система верстату складається як композиція пружної системи, яка включає технологічну структуру із верстату, інструментів, спорядження і власне заготовки, і робочих процесів, які мають місце у верстаті, [20]. Ці робочі процеси є сукупністю дії процесів різання, процесів тертя, процесів, що відбуваються у привідних двигунах та інших. У загальному вигляді динамічна система верстату представляється як замкнута система із паралельними ланками (рис. 1.6).

Робочі процеси впливають на пружну систему (збурюють її) за рахунок силових факторів. Серед цих факторів, зокрема, є – зусилля різання  $P$ ; сили тертя  $F_{тр}$ ; крутні моменти, що зумовлюють рух двигуна  $T_{дв}$ . Власне такі збурення викликають певні переміщення в просторі окремих елементів пружної системи верстату. Так, для токарної обробки такими елементами є – різець, супорт, заготовка при її обробленні, а також напрямні і станина в цілому.

Відповідно пружна система в зворотньому напрямку впливає на робочі процеси. Це знаходить результат у зміні перерізу зрізу, зміні тисків на поверхнях, що труться, зміні величин швидкостей руху окремих елементів.

Вказане спричиняє перемінність динамічних сил, виділення теплової енергії і т.д.

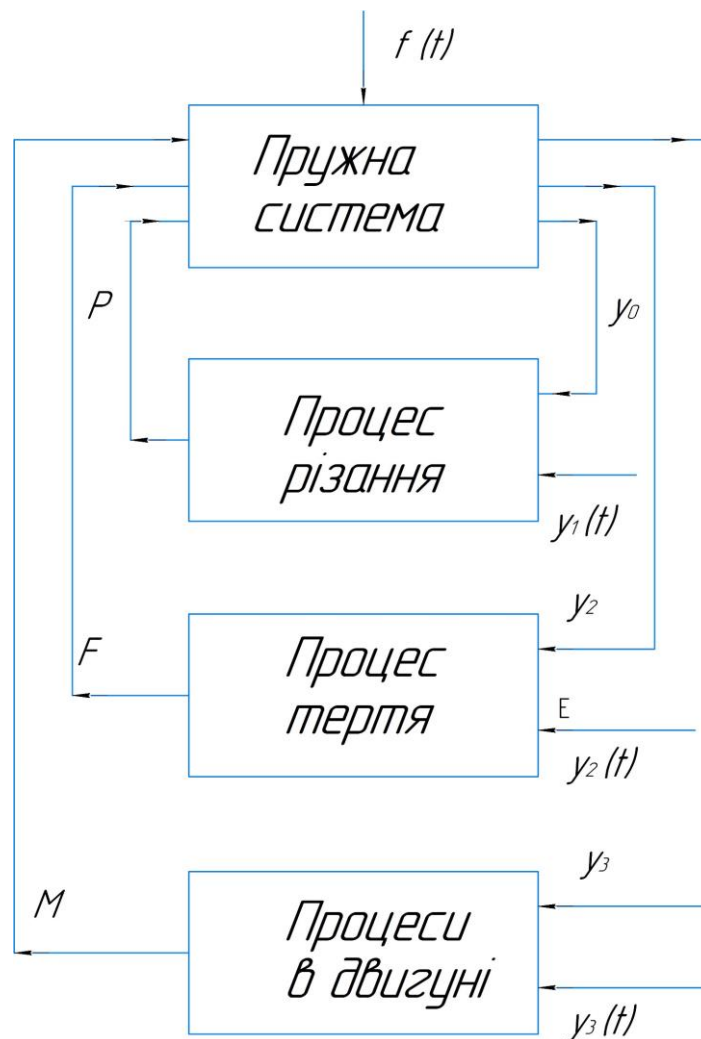


Рис. 1.6. Замкнута схема динаміки верстатної системи

При цьому очевидно, що дії робочих процесів на пружну систему, зокрема силові фактори (зусилля), виявляються функціями координат (чи швидкостей) самої пружної системи. Відповідно вказані координати визначають зворотний зв'язок пружної системи на окремі робочі процеси власне верстату.

Зворотні зв'язки визначають характеристики динаміки верстатів, [16].



Слід зауважити, що це виражається у замкнутості і багато контурності системи верстату, цілеспрямованій дії окремих елементів і взаємозалежності між робочими процесами, що відбувається через пружну систему.

Як це відбувається стосовно деформаційного процесу від зусилля різання? Відповідна деформація спричиняє зміну положення лез інструменту відносно оброблюваної заготовки. Така зміна спричиняє те, що товщина зрізу (товщина зрізаного шару) відповідним чином теж змінюється. Отже зміна силового фактору (зусилля різання) визначає деформаційні процесі у пружній системі, [16].

Також відомо, що у переважній більшості випадків динамічну систему прийнято ілюструвати у вигляді ланок основних елементів із спрямованими зв'язками між цими елементами. При цьому цілісну динамічну систему виявляється можливим розділити, тобто розімкнути систему по одному із зв'язків і, таким чином, далі мати справу із розімкнутою системою, [16].

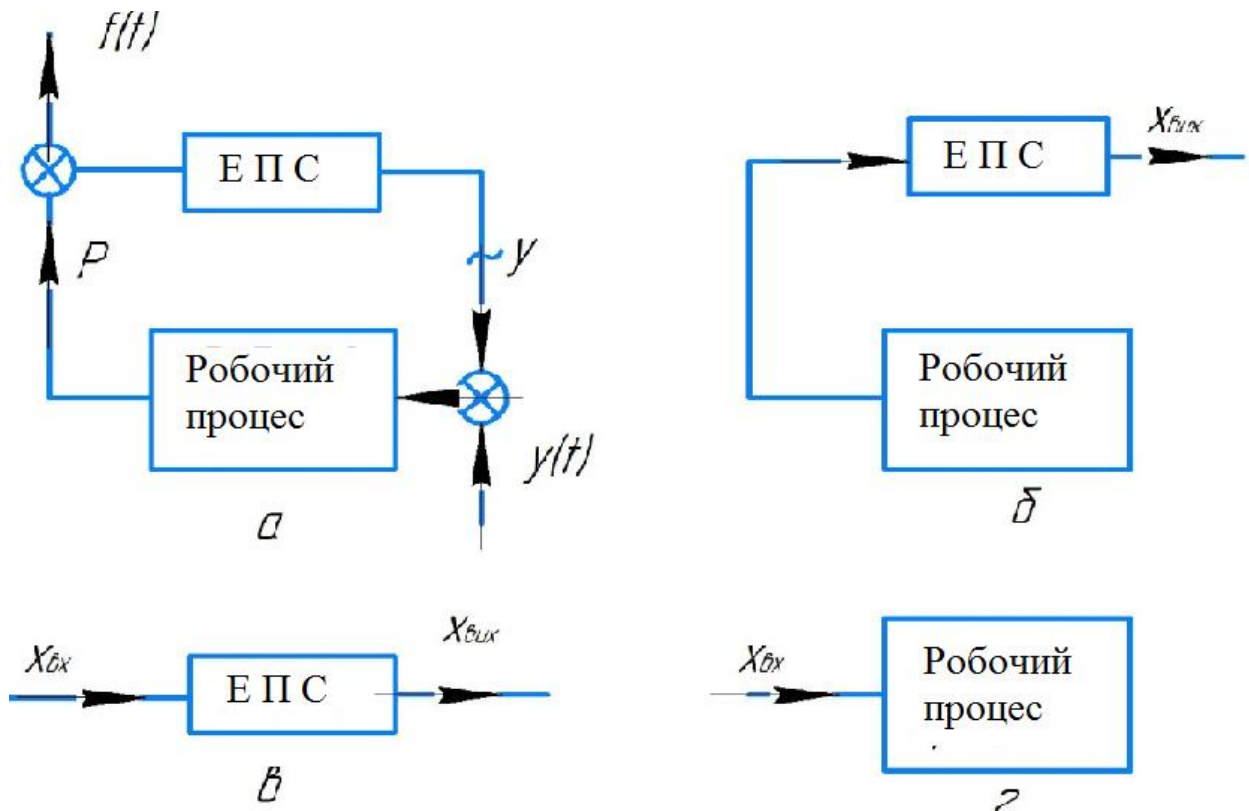


Рис. 1.7. Можливі розмикання одноконтурної системи

Спрямованість зв'язків дозволяє для зручності аналітичного розгляду розділити динамічну систему. Це супроводжується розмиканням зв'язків між окремими елементами. Якщо ми розімкнемо систему по одному із зв'язків, то отримаємо розімкнуту систему (рис. 1.7).

При розриві двох зв'язків можна окремо розглядати елемент динамічної системи і вивчати його властивості. Тоді це будуть залежності між вхідними координатами системи і її вихідними координатами. Тобто, при незмінності у часі вхідної координати говорять про статичну характеристику, а при змінності у часі вхідної координату мають справу із динамічною характеристикою системи. При цьому намагаються розглядати питання у лінійній постановці, тобто лінеаризувати систему, [18]. Так, наприклад, показують залежність деформації пружної системи від силового фактору, що на неї діє.

При цьому відповідну динаміку описують у вигляді лінійних диференціальних рівнянь, при чому ці рівняння є рівняннями із постійними коефіцієнтами.

Такі припущення дають змогу ввести поняття передаточної функції системи. Її зображають у так званій операторній формі, [20]:

$$W(p) = \frac{X_{вих}}{X_{вх}} = \frac{R(p)}{Q(p)},$$

де  $X_{вих}$  і  $X_{вх}$  – вхідна і вихідна координати;  $R(p)$  і  $Q(p)$  – оператори у вигляді многочленів.

Аналіз динамічних процесів у системах часто також виконують використовуючи частотні методи. Згідно до цієї методики частотні динамічні характеристики записуються зважаючи на гармонійний закон зміни координати на вході, [21].

В цих випадках використовують поняття таких характеристик: амплітудно-частотної  $A=f(\omega)$ ; фазо-частотної  $\varphi=f(\omega)$ ; амплітудно-фазово-частотної.

Зокрема, наведений рис. 1.8 ілюструє відповідні визначення вказаних характеристик.

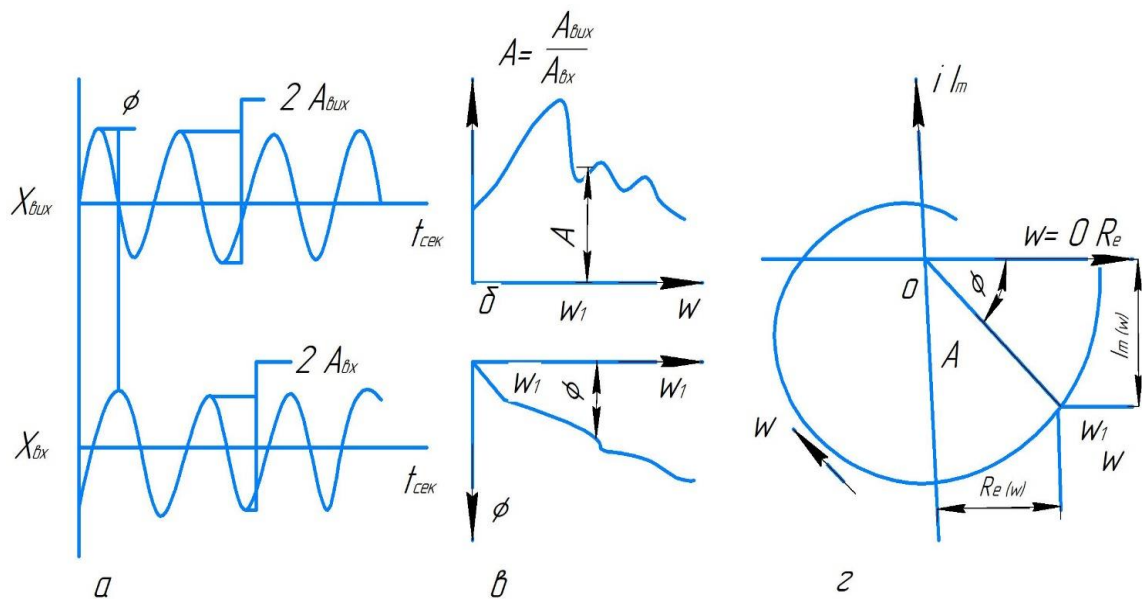


Рис. 1.8. Визначення частотних характеристик: а) зміна вхідних і вихідних координат у часі; б) амплітудно-частотна  $A=f(\omega)$ ; в) фазо-частотна  $\varphi=f(\omega)$ ; г) АФЧХ

## Висновки щодо розділу 1

На основі розгляду матеріалів, представлених у розділі 1, сформовані такі висновки:

- 1) точність токарної обробки характеризується систематичними та випадковими похибками;
- 2) під час оброблення деформації пружної технологічної системи визначають виникнення похибок форми і похибок розмірів;
- 3) для дослідження впливу похибок заготовок слід використовувати дослідження динаміки процесу;
- 4) динамічна поведінка системи верстату і динамічне протіканні самого процесу точіння можуть бути описані амплітудними і частотними характеристиками.

Аналіз матеріалів розділу 1 дозволяє виявити мету дослідження і визначити основні його задачі.

**Мета роботи** – це підвищення точності точіння деталей за рахунок зменшення впливу похибок заготовок на основі застосування при обробці систем вирівнювального типу із двома різцями.

**Об'єкт дослідження** - динаміка процесу токарної обробки.

**Предмет** – закономірності динамічних явищ вирівнювальної дворізцевої обробки при впливі характерних похибок заготовок.

Для забезпечення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих досліджень, що пов'язані із актуальними питаннями точності токарної обробки та динамічними закономірностями точіння та їх математичним моделюванням.
2. Запропонувати технологію механічної обробки деталі із характерними токарними операціями для подальшого розроблення окремих конструкцій токарного верстату.

3. Описати основні схеми формоутворення обробки вибраної деталі і виконавчі рухи для токарного верстату і скомпонувати відповідний верстат токарної групи.
4. Для створеної компоновки здійснити кінематичний розрахунок та сконструювати головний привід і вибраний шпindelний вузол.
5. Запропонувати принципи здійснення процесу вирівнювання навантажень на пружну систему під час точіння.
6. Провести аналіз існуючих конструкційних схем токарних систем вирівнювання осьових навантажень.
7. Розробити математичну модель динаміки вирівнювання осьових навантажень в часі.
8. Проаналізувати для випадку паралельного точіння вплив на поведінку розробленої математичної моделі характерних похибок заготовок.
9. Провести інтегральну оцінку швидкодії вирівнювальної 2-різцевої системи в динаміці реагування на похибки заготовок.
10. Здійснити висновки щодо досліджень і навести вибрані рішення стосовно охорони праці, а також удосконалення безпеки життєдіяльності.

## 2. Технологічні передумови і конструкторська частина

### 2.1. Аналіз призначення та умов роботи деталі

Виберемо деталь-представника, яка для прикладу ілюструватиме подальші розрахунки. Такою деталлю є «Корпус циліндричний».

Корпус циліндричний представляє собою базову деталь клапана, який розрахований на робочий тиск  $P_p = 3,8$  МПа. Основним призначенням такого клапана є регулювання режиму експлуатації пристрою зміни тиску.

Клапан встановлюється безпосередньо на пневмоприводі центральної засувки.

«Корпус циліндричний» є штампованою деталлю із сталі 20Х13 за ГОСТ 5632-72. Це - нержавіюча хромиста сталь. Її хімічний склад (в %), а також механічні властивості беремо із довідникової книги, [22].

Так, склад сталі містить хром (13%), марганець (0,6-0,8%), фосфор (0,03%), кремній (0,025%), титан (0,8-0,9 %), вуглець (0,16-0,25 %), нікель (1,5-2,5%).

Щодо механічних властивостей даної сталі, то вони складають:  $\sigma_B = 850$  Мпа;  $\sigma_{0,2} = 600$  Мпа;  $\delta = 10\%$ ;  $\psi = 50\%$ ;  $a_1 = 0,6$  МДж/м<sup>2</sup>.

Сталь 20Х13 є широко розповсюдженою і досить дешевою. Подібні сталі із низьким вмістом вуглецю є пластичними. Тому із них добре штамнуються різноманітні деталі. Ці деталі, окрім того, володіють підвищеною твердістю, а також і міцністю.

Звернемось до безпосереднього аналізу конструктивних особливостей деталі, яку ми обрали в якості представника.

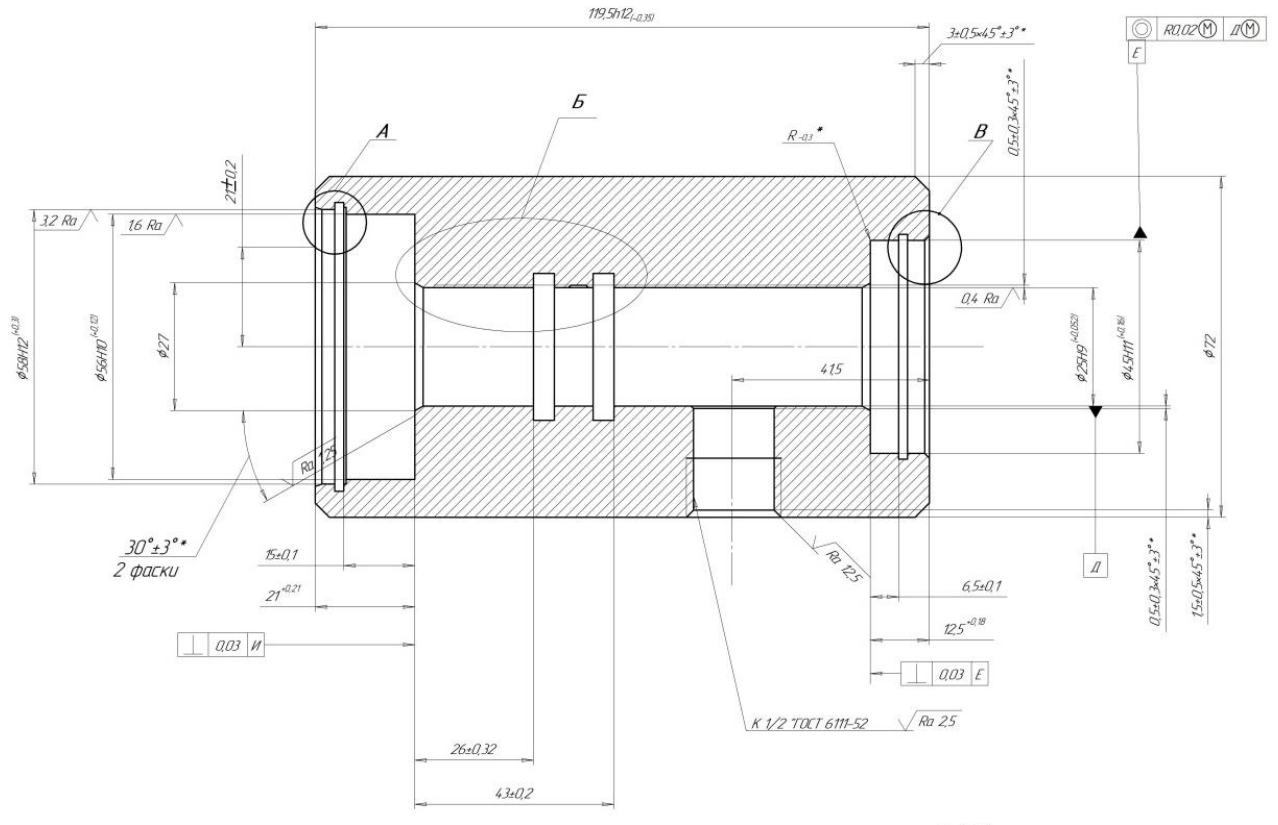


Рис. 2.1. Робоче креслення типової деталі

«Корпус циліндричний» це циліндрична деталь розміром  $\phi 72 \times 119,5$  мм, яка має ряд ступінчастих отворів.

Найбільш відповідальною поверхнею «корпуса» є внутрішня циліндрична поверхня ( $\phi 25H_9$ ) з шорсткістю  $R_a=0,4$  мкм. Цю поверхню приймають як установочну базову поверхню, зокрема, при складанні. Слід зазначити, що взаємне спряження вказаного вище клапана з арматурою якраз відбувається по цій поверхні. На кресленні вказано, що перевищення радіального биття канавок під кільця ущільнювання є не більшим від  $0,04$  мм, а радіуси стосовно діаметру  $25$  необхідно полірувати до значень шорсткості  $R_a=0,8$  мкм. Це робиться з метою герметичності ущільнення і уникнення втрат робочого середовища в магістралі.

Знову ж таки на робочому кресленні вказано, що на інші оброблювані поверхні «корпусу» згідно ГОСТ 25347-82 встановлюються граничні відхилення для отворів H12; для зовнішніх поверхонь h12; для інших -  $\pm IT/2$ . Це не стосується внутрішніх поверхонь відповідно діаметрів  $56$  - H10;  $45$  і  $9,8$  - H11.

Робоче креслення також вказує, що після механічної обробки гранична шорсткість зовнішніх поверхонь деталі обмежується значенням  $R_a=6,3\text{мкм}$ . Поряд з цим значна доля оброблених поверхонь має шорсткість (мкм)  $R_a=3,2;1,6;1,25$ . Лише шорсткості канавок для внутрішнього діаметру 25 мм під ущільнення не перевищують  $R_a=0,8\text{мкм}$ , а шорсткості зовнішніх фасок -  $R_a=12,5\text{мкм}$ .

## 2.2. Вибір заготовки

Заготовку «корпуса циліндричного» в загальному випадку можна отримати різними методами за рахунок таких технологічних процесів як лиття; кування; штампування та інших. В той же час можна отримати заготовку за рахунок використання різновидностей одного і того ж самого технологічного методу.

Проте в нашому випадку, а саме - для умов серійного виробництва для виготовлення «корпусу циліндричного», приймаємо як заготовку штамповку, яка отримана з використанням гарячого об'ємного штампування, яке здійснюється в закритих об'ємних штампах, причому із формоутворенням внутрішніх порожнин. Цей спосіб є найбільш доцільним. При цьому вдається забезпечити точність розмірів, яка вимагається кресленням. Окрім цього, в результаті такого методу штамповки отримуємо чистоту поверхні заготовки в межах від 20 до 80 мкм, [23,24].

## 2.3. Обґрунтування маршрутної технології оброблення деталі

Відомо, [1,23], що перш, ніж починати конструювання маршруту обробки, слід вибрати попередньо види обробки окремих поверхонь власне заготовки.

Окрім цього, необхідно виділити методи досягнення бажаної точності відповідно до вимог креслення деталі, а також таких вхідних даних, як серійність та технологічні можливості виробництва, зокрема, щодо наявного на підприємстві обладнання.



Враховуючи задані конструкційні особливості заготовки, можна сформуванати послідовну схему виготовлення деталі «корпус циліндричний» (маршрутну технологію) із зазначенням номерів операцій і конкретних верстатів.

Така схема показана у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

#### Маршрутна технологія

Код операції	Назва операції	Обладнання (верстат)
010	Токарна	Токарний
015	Токарна	Токарний
025	Токарна	Токарний
030	Токарна	Токарний
035	Свердлильна	Вертикально-свердлильний
040	Різенарізна	Токарний
045	Електро-хімічна	Електро-хімічний

#### 2.4. Розрахунок припусків

Припуски на поверхні, що будуть оброблені механічно, встановимо використовуючи табличний метод, [11,24], і зведемо в таблицю окремо для зовнішніх поверхонь (табл. 2.2) і для внутрішніх поверхонь (табл. 2.3).

Таблиця 2.2

## Допуски і припуски для зовнішніх поверхонь

Номінальний розмір деталі	Допуск на розміри заготовки, мм	Припуск на механічну обробку (на сторону), мм	Сумарний припуск з врахуванням короблення, мм	Номінальний розмір заготовки, мм
Діаметр 72h12	+0,7	0,8	7,2	79,2
Лінійний розмір 119,5 h 12	+10,0	5,0	6,0	131,5

Таблиця 2.3

## Допуски і припуски для внутрішніх поверхонь

Номінальний розмір деталі	Допуск на розміри заготовки, мм	Припуск на механічну обробку (на сторону), мм	Сумарний припуск з врахуванням короблення, мм	Номінальний розмір заготовки, мм
Діаметр 45H11	-1,0	1,0	6,0	39,0
Діаметр 25H9	-1,0	0,8	5,2	19,8
Діаметр 56H10	-1,5	1,0	6,0	50,0
Лінійний розмір 21(+0,21) H12	-1,3	1,0	2,0	19,0
Лінійний розмір 12,5(+0,18) H12	-1,3	1,0	2,0	10,5
Лінійний розмір 98,5 H12	-2,0	5,0	6,0	92,5

## 2.5. Визначення режимів різання

Розрахунок необхідних режимів різання полягає у тому, щоб для заданих умов оброблення визначити глибину різання, кількість проходів, подачу і швидкість різання, а також силові фактори, а саме – сили і потужності різання.

Для прикладу розрахунку візьмемо операцію 010, як найбільш навантажену для токарного верстату (ескіз зображений на рис. 2.2).

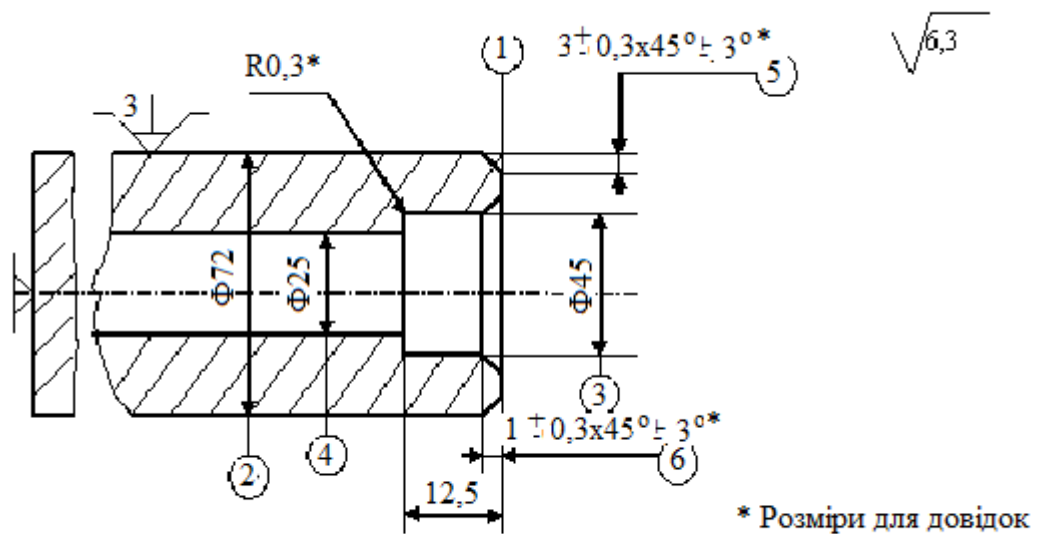


Рис. 2.2 – Ескіз токарної операції 010

Операція містить 6 переходів, які можна описати таким чином (вказується глибина різання  $t$ , мм):

А. Встановити заготовку і зняти деталь після оброблення.

1. Точити поверхню 1 (3,0 мм).
2. Точити поверхню 2 (1,8 мм).
3. Точити поверхню 3 (1,5 мм).
4. Точити поверхню 4 (2,0 мм).
5. Точити поверхню 4 (0,5 мм).
6. Точити поверхню 5 (2,5 мм).

Розглянемо ці переходи.

Перехід 1. Точити поверхню 1.

Верстат - токарний. Затискний патрон згідно ГОСТ 24351-80 - 7102-0085-2-1П. Використовуємо різець 2100-0417 (ГОСТ 18878-73) із твердого сплаву Т15К6. Вимірювальний інструмент - штангенциркуль ШЦ-III-500-0,1. Призначена нами глибина резання  $t = 3,0$  мм.

За формулою, [25], визначаємо швидкість різання (м/хв). Для токарної обробки:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot s^{y_v}} \cdot K_v, \quad (2.1)$$

де  $C_v$ - коефіцієнт, а  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $m$  - показники степені. Їх вибираємо з довідникових даних залежно від умов різання;

$T$  - стійкість різця, хв;

$s$  - подача, мм/об;

$K_v$  - поправочний коефіцієнт на швидкість різання. Цей коефіцієнт визначають як добуток інших поправочних коефіцієнтів (якості матеріалу, стану поверхні, матеріалу різальної частини, параметрів різця, виду обробки).

Використовуючи довідникові дані із книжки, [25], для даного випадку матимемо, що  $K_v=1,71$ .

Інші вхідні дані для даного переходу при глибині різання 3 мм, подачі 0,5 мм/об і стійкості різального інструменту  $T=60$  хв - це  $C_v=96$ ;  $x_v=0,2$ ;  $y_v=0,45$  і  $m=0,15$ .

Тоді для переходу 1 матимемо значення швидкості різання (м/хв.):

$$v_1 = \frac{96 \cdot 1,71}{60^{0,15} \cdot 3,0^{0,2} \cdot 0,5^{0,45}} = 87.$$

Визначимо відповідну частоту обертання деталі  $n_1$ , об/хв, за формулою

$$n_1 = \frac{1000 \cdot v_1}{\pi \cdot D}.$$

Отже, після підстановки числових значень для  $D=72$ мм отримаємо

$$n_1=385 \text{ об/хв.}$$

Призначаємо стандартну частоту існуючого верстату, [26], 16К20  $n_{1ст} = 310$  об/хв. Тоді розрахуємо реальне значення швидкості різання (м/хв):

$$v_{1P} = \frac{3,14 \cdot 72 \cdot 310}{1000} = 70 .$$

Тепер визначимо силові фактори. Перш за все обчислимо тангенціальну складову зусилля різання. Відповідно використаємо залежність для поперечного точіння (перехід 1):

$$P_z = C_p \cdot t^{x_p} \cdot s^{y_p} \cdot v^{n_p} K_p, \quad (2.2)$$

де  $C_p=204$  - коефіцієнт, а  $x_p=1,0$ ;  $y_p=0,75$ ;  $n_p=-0,15$  - показники степені, як залежно від умов різання визначаємо за довідником, [25].

$K_p$  – поправочний коефіцієнт. Він дорівнює добутку поправочних коефіцієнтів, що враховують вплив механічних властивостей матеріалу, що обробляється, та геометричних параметрів різальної частини різця. Згідно, [25], цей коефіцієнт дорівнює: 1,00.

Тоді значення тангенціальної складової сили різання (Н) обчислимо так:

$$P_{z1} = 9,8 * 204 \cdot 3,0^{1,0} \cdot 0,5^{0,75} \cdot 87^{-0,15} \cdot 1,00 \approx 2850$$

Отже, зможемо розрахувати потужність різання за формулою

$$N = \frac{P_z \cdot v}{102 \cdot 60} \quad (2.3)$$

Таким чином, отримаємо  $N_1=3,2$ кВт, що значно менше паспортної величини для приводу головного руху (10 кВт).

Після цього можемо перейти до визначення основного часу на оброблення, [24]:

$$T_0 = \frac{(l + l_1 + l_2) \cdot i}{n \cdot S}, \quad (2.4)$$

де  $l$  - довжина обробки; для переходу 1  $l = 119,5$  (мм).

Відповідно враховуючи величини врізання різця  $l_1 = 6$  мм; перебігу  $l_2 = 3$  мм при кількості проходів  $i=1$ , маємо  $T_0=1,3$  хв.

Розглянемо перехід 2. Він полягає у точінні поверхні 2 (глибина різання 1,8 мм, а подача – 0,6 мм/об).

Тоді з врахуванням відповідних значень довідникових даних, [25], отримаємо з формули (2.1):

$$v_2 = \frac{96 \cdot 1,71}{60^{0,15} \cdot 1,8^{0,2} \cdot 0,6^{0,45}} = 104 \text{ м/хв.}$$

При цьому  $n_2 = 457$  об/хв.

Враховуючи паспортну частоту  $n_{2\text{ст}} = 310$  об/хв, матимемо дійсне значення швидкості:  $v_{2\text{р}} = 70$  м/хв.

Згідно (2.2) матимемо тангенціальну складову сили (Н)

$$P_{Z2} = 9,8 * 204 \cdot 1,8^{1,0} \cdot 0,6^{0,75} \cdot 70^{-0,15} \cdot 1,00 \approx 1670$$

Потужність різання за (2.3)  $N_2 = 1,9$  кВт. Такий режим потужності відповідає вимогам.

Основний час  $T_{02}$ , хв., розрахуємо по формулі (2.4)

$$T_{02} = \frac{(119,5 + 1,8 + 3,6) \cdot 1}{310 \cdot 0,6} = 1,06..$$

Опишемо також інші переходи.

Перехід 3. Точити поверхню 3 на токарному верстаті. Затискний патрон, різець і вимірювальний інструмент – ті ж. Глибина різання становить 1,5 мм, а подача – 0,15 мм/об.

Тоді швидкість різання складе 112 м/хв, а частота обертання шпинделя – 793 об/хв. При призначенні стандартної частоти обертання у 600 об/хв, можемо визначити, що для швидкості різання дійсне значення дорівнює 85 м/хв.

Так само обчислюємо значення тангенціальної сили:  $P_{z1} = 1400$ Н, а значення потужності 1,9 кВт.

Основний час для переходу 3 – 0,7 хв.

Перехід 4. Точимо поверхню 4 ( $t = 0,5$  мм;  $s = 0,12$  мм/об).

Тоді швидкість різання за результатами обчислень  $v_4=143$  м/хв. Частота обертання – 1812 об/хв. При стандартній частоті 1300 об/хв., отримаємо розрахункове значення швидкості 103 м/хв. Складова сили на цьому переході – 1280Н, а потужність різання -3,2 кВт, що задовільняє умови. Основний час  $T_{04} \in 0,72$  хв.

Перехід 5. Точіння поверхні 4 ( $t = 2,0$  мм;  $s = 0,25$  мм/об).

Орієнтовна швидкість різання – 110 м/хв. Частота обертання шпинделя становить (об/хв) -1370. Отже, для стандартних даних у 900 одиниць, маємо дійсне значення швидкості 71 м/хв.

Складова сили різання – 1400 Н, а потужність різання становить 1,6 кВт. Основний час розраховуємо як  $T_{04}$ , хв. – 0,52.

Перехід 6. Точити поверхню в розмір 5. Маємо справу із виготовленням фаски. Тому застосовуємо різець фасонний спеціальний із Т15К6.

На цьому переході глибина різання 2,5 мм, а подача 0,04 мм/об. Після розрахунку матимемо швидкість різання 320 м/хв. Частота обертання при цьому – 1150 об/хв.

Зважаючи на паспортне значення у 750 об/хв, дійсна величина швидкості досягає 112 м/хв.

Відповідно складова сили – 1280Н, а потужність різання – 3,2 кВт. Основний час – 1,9 хв.

Сумарно обчислюємо основний час для всієї операції 010 як суму основних часів по переходах

$$T_0 = 1,30 + 1,06 + 0,70 + 0,52 + 0,72 + 1,9 = 6,74 \text{ (хв).}$$

Відомо, [2,24], що для операції допоміжний час складається із допоміжних: часу  $T_{вс}$  на встановлення, а також зняття деталі,  $T_{пер}$  – часу пов'язаного із переходом,  $T_{вим}$  – часу на контрольні вимірювання:

$$T_{доп} = T_{вс} + T_{пер} + T_{вим}, \quad (2.5)$$

За загальномашинобудівними нормативами, [27], якщо маса оброблюваної заготовки не перевищує 100кг, а також застосовується трикулачковий патрон (як у нашому випадку), то час на встановлення дорівнює 5,8 хв.

Щодо часу, пов'язаного із переходом, то він складається із декількох складових. Це зокрема, час, потрібний для зміни частоти шпинделя  $T_{пер1}=4*0,05=0,2$  хв; час на зміну подачі  $T_{пер2}=5*0,04=0,2$  хв; час на зміну різця поворотом різцевої головки  $T_{пер3}=2*0,07=0,14$  хв; час на роботу зі стружкою  $T_{пер4}=3*0,03=0,09$  хв; час на переміщення супорта  $T_{пер5}=6*0,005=0,03$  хв; час на налагодження розмірів при: поперечному точінні  $T_{пер6}=0,29$  хв; поздовжньому точінні  $T_{пер7}=0,31$  хв; фасонному точінні  $T_{пер6}=0,27$  хв. Отже, сумарно на час, пов'язаний із переходом затрачається  $T_{пер}=1,55$  хв.

Допоміжний час на вимірювання складається з часу на проміри штангенциркулем 0,42 хв і спеціальним шаблоном 0,11 хв. Отже,  $T_{вим}=0,53$  хв.

Підставляючи значення у вираз для сумарного часу матимемо, що

$$T_{доп} = T_{вс} + T_{пер} + T_{вим} = 5,8 + 1,55 + 0,53 = 7,9 \text{ хв.}$$

Тому оперативний час складатиме

$$T_{оп} = T_0 + T_B = 6,74 + 7,9 = 14,64 \text{ хв.}$$

З врахуванням часу на обслуговування робочого місця визначаємо, [27], штучний час :  $T_{шт} = 16,99$  хв і штучно-калькуляційний час для всієї операції 17,15 хв.

Розрахунки режимів різання для даної операції зведемо у таблицю 2.4, а відповідні енергетичні і часові складові – у таблицю 2.5.



Таблиця 2.4

Результати розрахунків режимів різання для операції 010

№ пере ходу	Діаметр, мм	Довжина обробки, мм	Глибина різання, мм	Подача, мм/об	Кількість обертів, об/хв	Швидкість різання, м.хв
1	72	119,5	3,0	0,5	310	70
2	72	119,5	1,8	0,6	310	70
3	45	12,5	1,5	0,15	600	85
4	25	86	2,0	0,25	900	103
5	25	86	0,5	0,12	1300	71
6	72	3	2,5	0,04	750	112

Таблиця 2.5

Результати силових, енергетичних і часових розрахунків для операції 010

№ пере ходу	Зусилля різання, Н	Потужність різання, кВт	Основний час, хв	Допоміжний час, хв	Штучний час, хв
1	2850	3,2	6,74	7,9	16,99
2	1670	1,9			
3	1400	1,9			
4	1280	3,2			
5	1400	1,6			
6	1280	3,2			

## 2.6. Аналіз рухів формоутворення верстату

Приступимо до конструювання елементів верстату. Маємо на увазі, що за аналоги прийматимемо існуючі конструкції токарно-гвинторізних верстатів, [26]. Ці аналоги призначені для токарного оброблення заготовок при їх закріпленні, зокрема, в центрах і патроні. Обробленню підлягають зовнішні і внутрішні поверхні різноманітних деталей типу тіл обертання, причому із різним ступенем складності. Також ці верстати можуть використовуватись для нарізання різей.

При такій обробці твірні і напрямні лінії утворюються за допомогою організації погоджених між собою рухів заготовки та інструменту. Можливою є також комбінація рухів між собою. Отже, рухи різання, що у часі відтворюють відповідні твірні і напрямні, виявляються рухами формоутворення (формоутворюючими рухами), [ 8].

Тому для подальшого конструювання слід проаналізувати які формоутворюючі здійснюються токарним верстатом. Ілюстративно це зображено нижче.

### 1. Рухи при обробці торців та уступів

#### 1.1. Підрізання торця підрізним різцем (рис.2. 3).

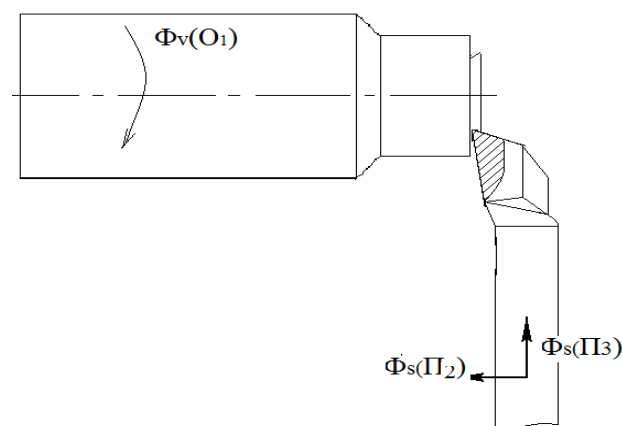


Рис. 2.3. Формоутворюючі рухи при підрізанні торця

1.2. Підрізання торця підрізним різцем (рис. 2.4).

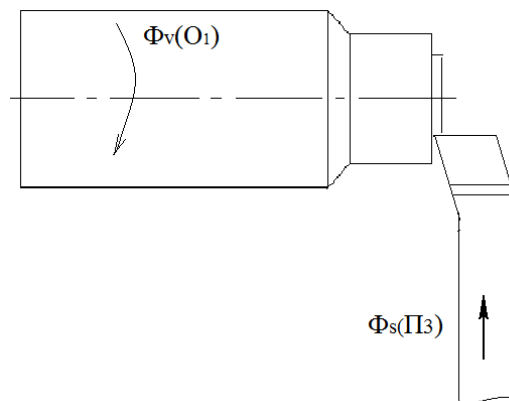


Рис. 2.4. Формоутворюючі рухи при підрізанні

2. Поздовжнє точіння (рис. 2.5).

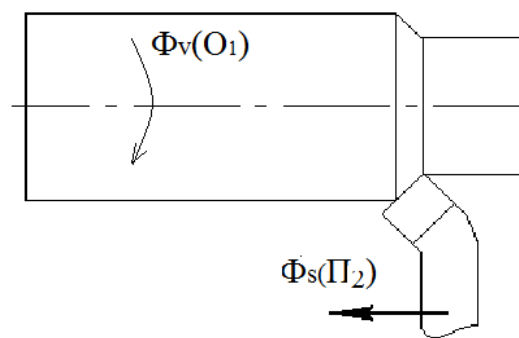


Рис. 2.5. Формоутворюючі рухи при точінні зовнішньої поверхні

3. Точіння канавок (рис. 2.6).

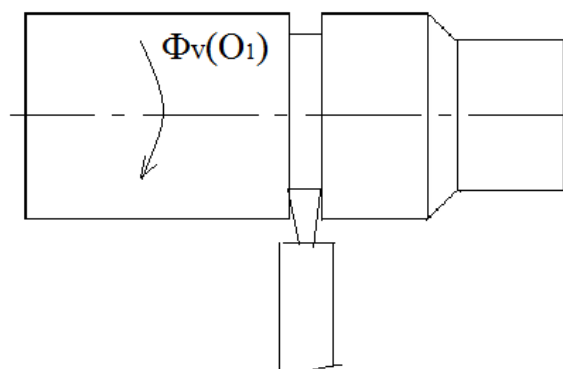


Рис. 2.6. Формоутворюючі рухи при виготовленні канавок

4. Точіння фасонних поверхонь (рис. 2.7).

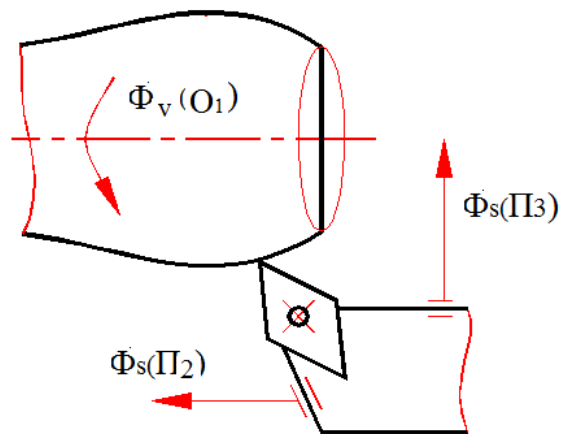


Рис. 2.7. Формоутворюючі рухи при точінні конусних і фасонних поверхонь

5. Обробка внутрішньої поверхні точінням (рис. 2.8).

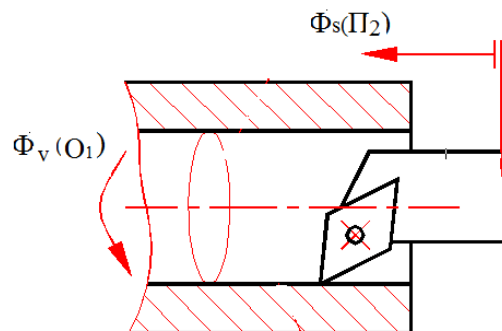


Рис. 2.8. Формоутворюючі рухи при токарному обробленні внутрішньої поверхні

6. Обробка із застосуванням осевого інструменту (рис. 2.9).

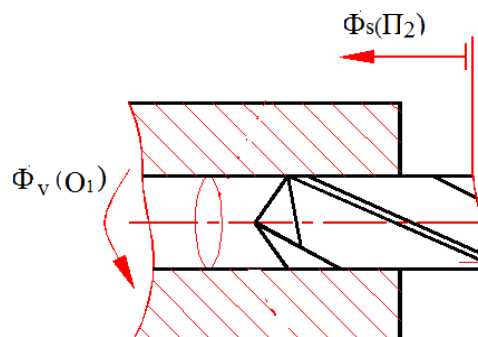


Рис. 2.9. Формоутворюючі рухи при свердлінні та обробці іншим осевим інструментом

## 7. Нарізання різі різцем (рис. 2.10).

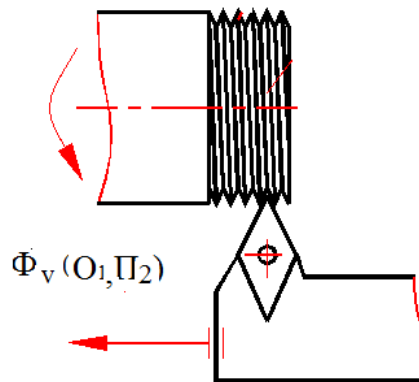


Рис. 2.9. Формоутворюючі рухи при нарізанні різі

Окрім формоутворюючих рухів необхідні також інші виконавчі рухи (встановлення  $V_c$ ), врізання ( $V_p$ ) та інші. Так, для поздовжнього точіння необхідний рух встановлення  $V_{ст}(\Pi_3)$ . Для поперечного точіння (обробка торця) треба застосувати рух встановлення  $V_{ст}(\Pi_2)$ . Для обробки канавки потрібний рух  $V_{ст}(\Pi_2)$  і врізання  $V_p(\Pi_3)$ . При обробці осьовим інструментом застосовують рухи встановлення  $V_{ст}(\Pi_3)$ ,  $V_{ст}(\Pi_{10})$ . Якщо використати різьбові різці для нарізання різі, то треба забезпечити рух встановлення  $V_{ст}(\Pi_3)$ . Також у подібних верстатах доцільно передбачити допоміжні рухи (Доп): швидкого поздовжнього переміщення для каретки супорта (рух  $\Pi_7$ ), поперечного переміщення ( $\Pi_8$ ), різцевого переміщення ( $\Pi_9$ ).

Таким чином, можна об'єднати ілюстрацію всіх виконавчих рухів у єдиній моделі для токарно-гвинторізного верстату (рис. 2.10).

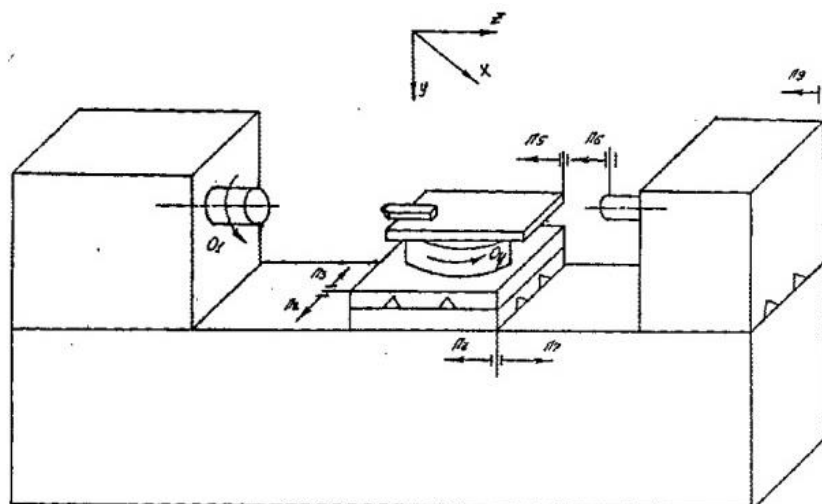


Рис. 2.10. Виконавчі рухи верстату

## 2.7. Структурно-кінематична схема верстату

Усвідомлення необхідних рухів формоутворення, додаткових і допоміжних рухів дає нам змогу сформуванати структурно-кінематичну схему токарного верстату шуканої побудови [8]. При цьому матимемо на увазі застосування приводів ЧПК, що передбачатиме роздільну компоновку вузлів. Таким чином, побудована структурно-кінематична схема зображена на рис. 2.11.

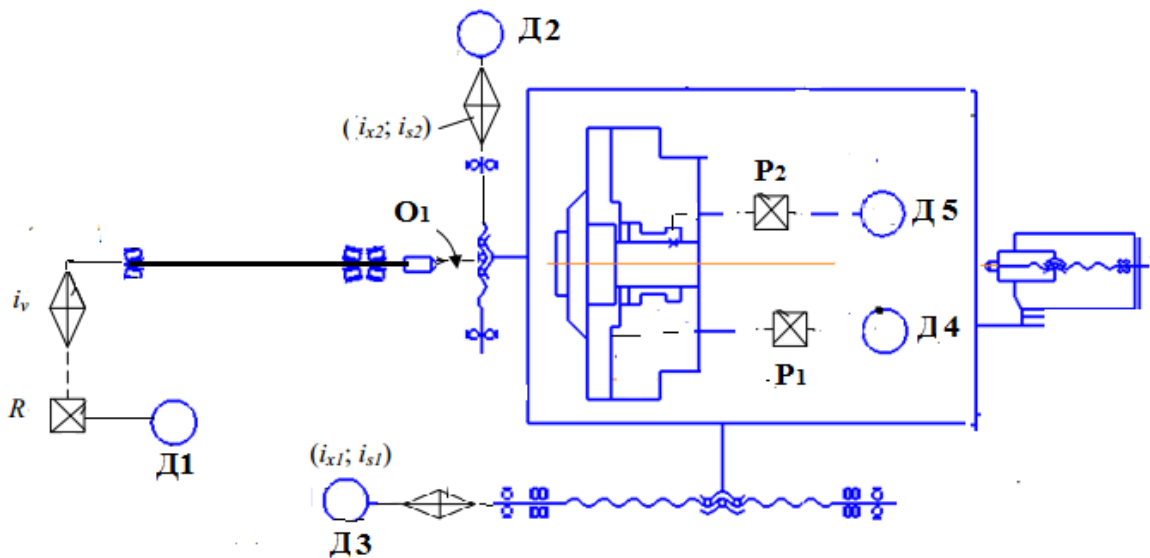


Рис. 2.11. Структурно-кінематична схема

При цьому на розробленій схемі відображений обертовий рух  $O_1$ , який забезпечується шпинделем, і, відповідно, створює рух різання  $\Phi_v(O_1)$ , який є формоутворюючим для всіх операцій верстату. Рух проходить від двигуна Д1. Для налагодження використано орган налагодження  $i_v$ . Передбачений реверс  $R$ .

Поздовжня подача забезпечується двигуном Д3, а поперечна – Д2. Рух відбувається через передачі гвинт-гайка.

Структурно-кінематична схема показує також керування роботою револьверної головки (двигуни Д4 і Д5). Задня бабка має у своєму складі піноль.

Визначені основні ознаки структурно-кінематичної схеми дозволяють перейти до формування компоновки верстату на основі аналізу типових зразків.

## 2.8. Вибір компоновки верстату

Беручи до уваги виконавчі рухи верстату, визначемо структурні формули компоновочних рішень та знайдемо варіанти конструктивних компоновок, [28]. Для цього сформулюємо склад технологічного модуля (ТМ) і запишемо множину модульного комплекту (МК), [29].

Передбачимо, що компоновка верстату є горизонтальною. На заміну рухів формоутворення та інших виконавчих рухів представимо компоновальні блоки відповідного призначення. Матимемо, що рух формоутворення обертання шпинделя  $\Phi_v(O_1)$  замінюємо на  $C_h$ ; рух поздовжньої подачі  $\Phi_{s1}(П_2)$ ,  $Вст(П_3)$  замінюємо на  $Z$ ; рух поперчної подачі  $\Phi_{s2}(П_3)$ ,  $Вст(П_2)$  замінюємо рухомим блоком  $X$ . При цьому існує також стаціонарний нерухомий блок  $0$ .

В результаті матимемо, що технологічний модуль - це

$$ТМ = \{0 C_h Z X \},$$

а модульний комплект є множина

$$МК = \{0 C_h Z X \}.$$

Така побудова дозволяє сформулювати для шуканого верстату загальну матрицю, яка передбачає можливі компоновки.

Зауважимо, що блоки деталі та інструменту займають фіксовану позицію. Отже вони є крайніми від гілки заготовки і від гілки інструменту. Тоді матриця компоновок має форму:

$$ТМ = C_h \{0 Z X \}.$$

Отже, сукупність компоновок для шуканого верстатного рішення зобразиться послідовністю:

$$\begin{array}{ccc} XZ0 & Z0X & 0ZX \\ ZX0 & X0Z & 0XZ \end{array}$$

Проведемо аналіз цих базових компоновок.

Ці варіанти зведемо у таблицю 2.6.

Таблиця 2.6

Таблиця можливих компоновок

<p><b><math>C_h XZO</math></b></p>	<p><b><math>C_h ZXO</math></b></p>
<p><b><math>C_h ZOX</math></b></p>	<p><b><math>C_h XOZ</math></b></p>
<p><b><math>C_h OZX</math></b></p>	<p><b><math>C_h OXZ</math></b></p>



Слід провести аналіз компоновок, зображених у таблиці і вибрати найбільш раціональну.

Технологічні передумови, визначення нами раніше на підставі операції щодо оброблення типової деталі дозволяють зазначити сукупність умов, які накладаються на множину компоновок. Цей комплекс дозволить врахувати, що деякі компоновочні рішення не є раціональними.

Відомо, [29], що з точки зору точності виготовлення деталі важливим є стійкість мас елементів компоновки відповідно до їх розміщенню на верстаті. Вважатимемо це умовою 1.

На таку умову впливають координатні переміщення елементів. Тобто величина ходу певного блоку залежить від його розташування стосовно стаціонарного блоку. Таким чином, для випадку токарної обробки це вираз  $Z \gg X$ . Отже, Блок переміщення по осі  $Z$  має бути сусіднім до Блоку 0 (стаціонарного). Отже, структурні формули

$$C_h ZX0 \quad ; \quad C_h 0XZ$$

можна відкинути, бо в них блоки 0 і  $Z$  не є такими, що примикають один до одного.

Подібні міркування можна провести і стосовно інших варіантів. Тому можна зупинитись на найбільш раціональному рішенні і вибрати структурну формулу (рис.2.12):

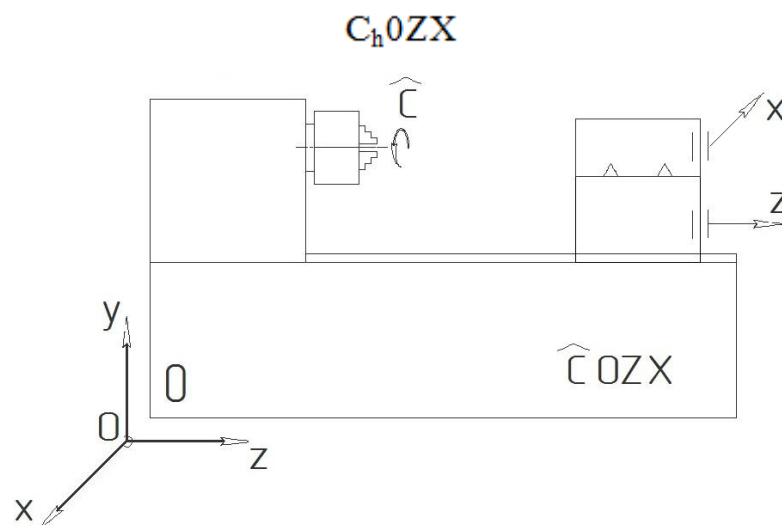


Рис. 2.12. Раціональна схема компоновки

## 2.9. Кінематичний розрахунок

Для кінематичного розрахунку приводу руху різання, що є головним рухом потрібно обчислити діапазон регулювання для шпинделя верстату, [30].

Спираючись на аналіз отриманих даних з розгляду технологічних передумов (розділ 2.1-2.6), можемо отримати діапазон регулювання для приводу головного руху.

Він знаходиться в межах 70...2400 об/хв.

Після корегування отримаємо  $n_{\min}=75$  об/хв , а  $n_{\max}=2410$  об/хв..

Виберемо двигун. В усталеному режимі потужність голвного приводу складається із потужності різання і втрат потужності. Потужність різання відповідно залежить від зусиль і швидкості різання (табл. 2.5). Втрати потужності відбуваються у механізмах передач, вони залежать від навантаження, кількості ланок ланцюга кінематики, а також частоти обертання. У розрахунках користуються коефіцієнтом корисної дії, який приймають як добуток часткових коефіцієнтів корисної дії. Збільшення частоти обертання сприяє зростанню втрат потужності, тобто зменшенню ККД. Для верстатів токарної групи такий коефіцієнт не є меншим 0,7. Тому з врахуванням всіх можливих випадків, отримаємо, що максимальна потужність двигуна повинна досягати 9 кВт. Тму за джерело руху вибираємо двигун постійного струму MDC-2. Його потужність 10 кВт, а діапазон швидкостей обертання – від 750 до 2500 об/хв.

В результаті такого вибору можемо приступити до формування кінематичної схеми, зокрема, для приводу руху різання (обертання шпинделя).

Для цього розробляємо графік швидкостей, який наведений на рис. 2.13.

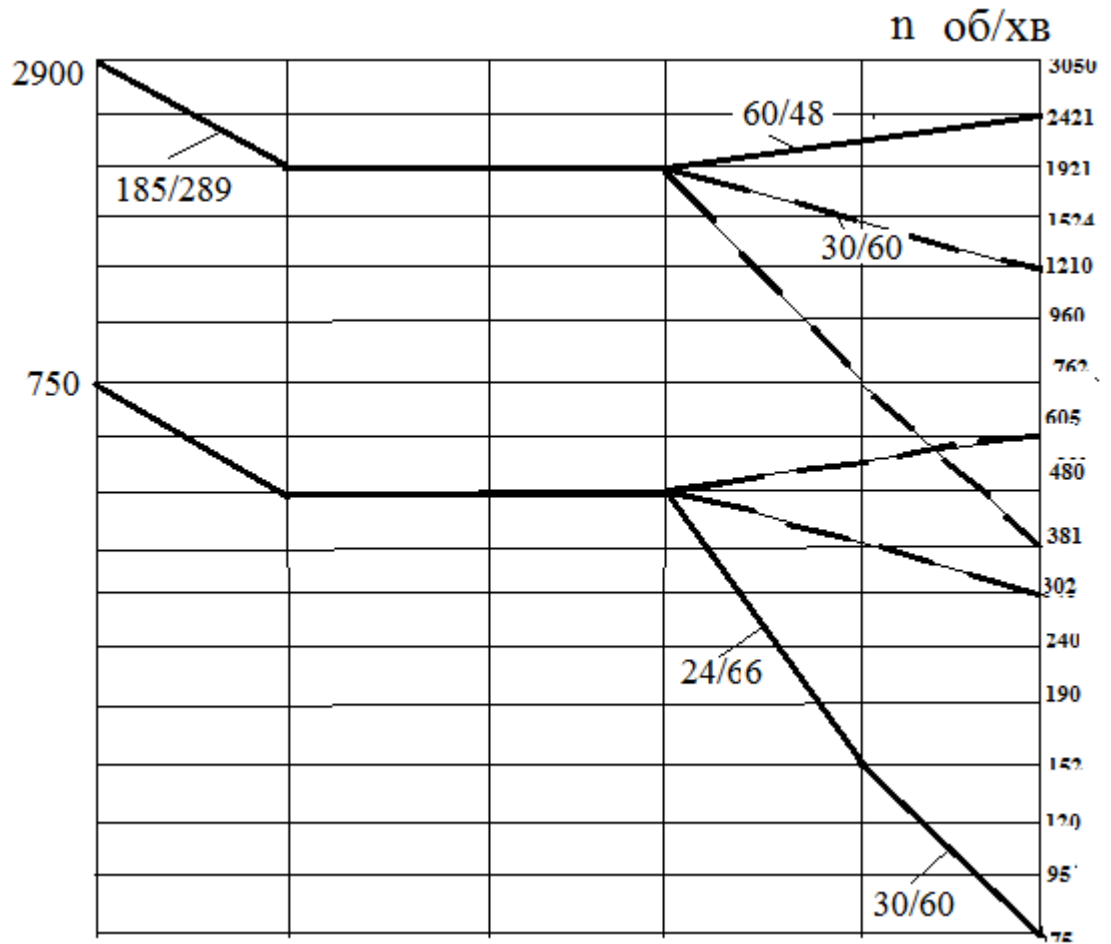


Рис. 2.13. Графік чисел обертів для схеми руху різання

Таким чином, можемо оформити у закінченому вигляді рисунок кінематичної схеми розроблюваного токарно-центрового патронного верстату із безступеневим регулюванням на основі вибраного джерела руху (рис. 2.14).

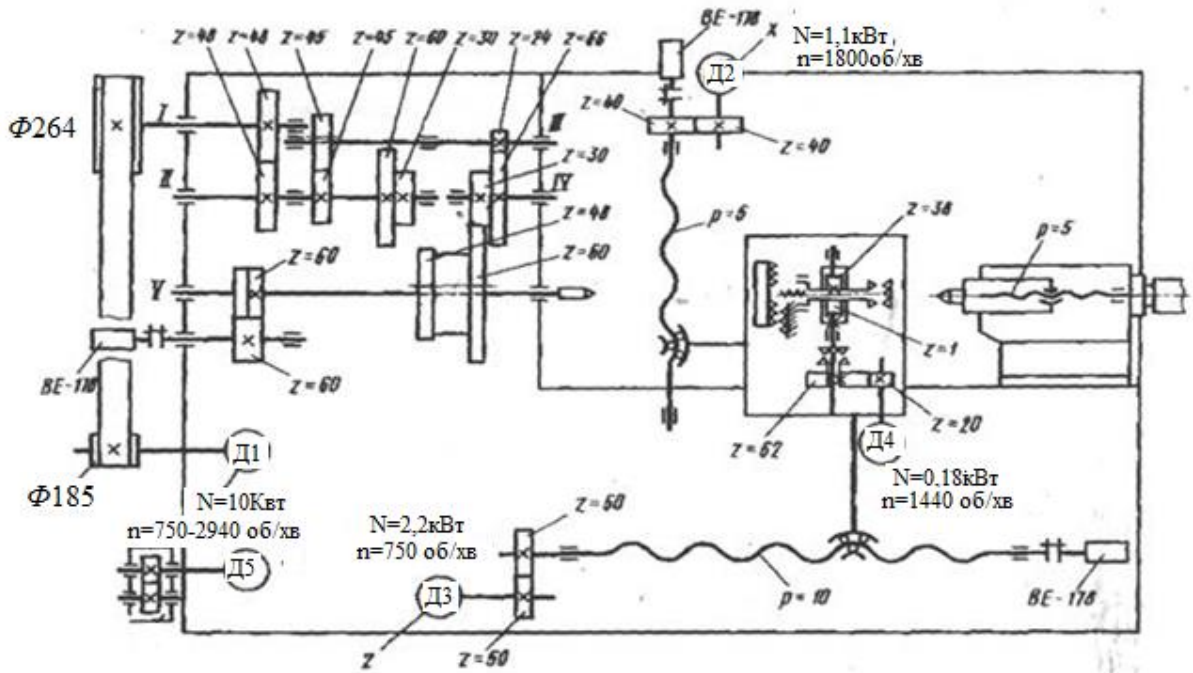


Рис. 2.14. Кінематична схема розробленого модернізованого токарного верстату

Привід головного руху складається із двигуна Д1 (двигуна постійного струму МДС-2) і рух передається через пасову передачу ( $\Phi 185/264$ ) на вал I шпindelної бабки. Після цього через зубчасту передачу 48/48 рух передається до валу II. Далі отримуємо три діапазони. На кожному із них регулювання швидкості обертання відбувається безступінчасто. Так через передачу 45/45 рух передається до валу III. Понижаючі передачі 24/66 і 30/60 забезпечують, таким чином обертання шпинделя V. Подібно при виведенні на валу II колеса із кількістю зубів 45 із зачеплення, отримуємо інші передачі на шпindel: підвищуючу 60/48 і понижаючу 30/60.

Поперечна подача здійснюється двигуном Д2 постійного струму ( $N=1,1\text{кВт}$ ;  $n=1800\text{ об/хв.}$ ). Поздовжня подача здійснюється за допомогою крокового електродвигуна Д3 ( $N=2,2\text{кВт}$ ;  $n=759\text{ об/хв}$ ) через передачу 50/50 і ходовий гвинт-гайка кроком 10мм.

Різцетримач повертається револьверною головкою.

## 2.10. Конструювання шпиндельного вузла

При конструюванні шпиндельного вузла ми використали ескізне проектування. Таке конструювання проводили на основі аналізу існуючих конструкцій шпиндельних вузлів та їх варіантів стосовно токарних верстатів, [8,30].

При цьому зважали в першу чергу на конструкції опор. Їх вибір в значній мірі забезпечує вимоги щодо точності оброблення. Для підшипників кочення шпинделі виконують як дво-опорними, так і три-опорними. При цьому використовують у передній опорі радіально-упорні підшипники або ж дворядні циліндрично-роликові, а також можуть бути - конічні роликові підшипники та інші.

На основі відомих даних, [21], при переході від: у передній опорі від дворядного підшипника з циліндричними роликами до підсилення такої пори дворядним шариковим підшипником отримуємо зростання жорсткості 1,58 раз, а підвищення динамічної стійкості – у 2,13 раз. При цьому розглядався верстат, що передбачав максимальний діаметр оброблюваної деталі 400 мм.

При розрахунках шпиндельних вузлів для таких верстатів беруться для аналізу динамічні схеми, що передбачають незначний вплив інших вузлів верстату на характеристики, зокрема динамічної стійкості і запобігання неприпустимих коливань, [21]. Власне такий випадок ми маємо для розгляду при використанні токарних вирівнювальних систем при дворізцевому точінні, [31]. Вся справа в тому, що для розроблюваного токарного верстата використання таких пристроїв наближає аналіз до схем, що є близькими до оброблення в токарному патроні коротких деталей або при обробленні в центрах, у випадку розміщення різального інструменту поблизу передньої бабки.

Отже, основним розрахунком у нашому випадку конструювання шпиндельного вузла є розрахунок між опорної відстані, [8,30]. Для цього використаємо розрахункову схему варіанту конструкції токарного верстату із

патроном, коли у якості передньої опори застосуємо підшипник дворядними конічно-роликівий. Схема вузла показана на рис. 2.15.

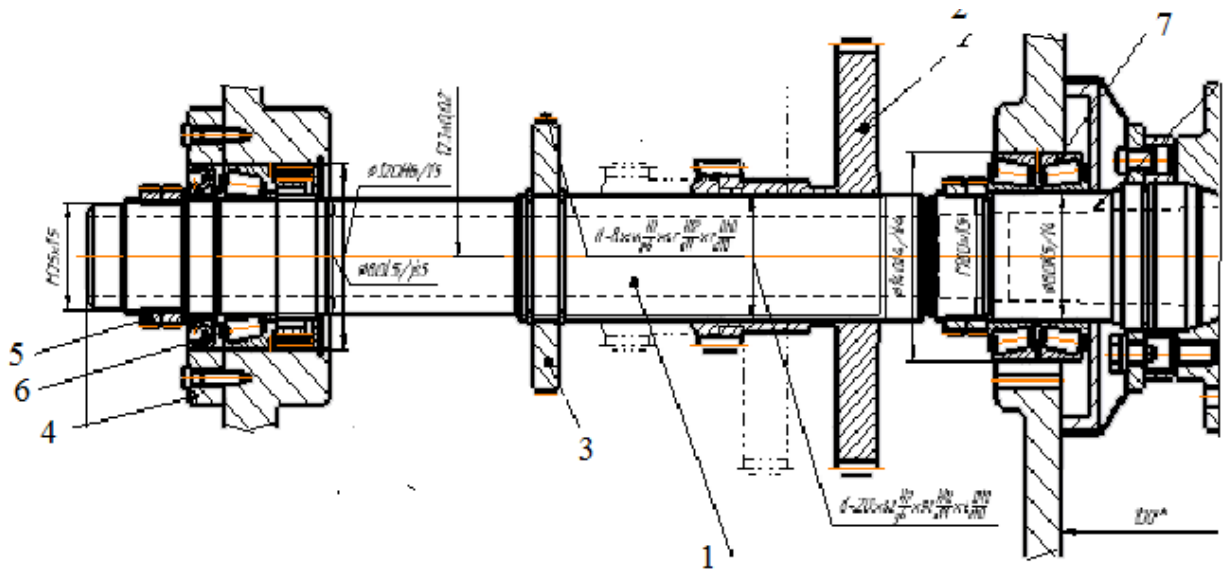


Рис. 2. 15. Конструктивна схема шпиндельного вузла у ескізованому виконанні

Для переключення швидкостей обертання служить блок зубчастих коліс 2. Задня опора 6 на відміну від передньої опори 7 шпинделя 1 представляє собою радіально-упорний підшипник 6. Для фіксації цього підшипника використана кришка 4, яка підтискається гайками 5.

Таким чином, можемо перейти до розрахунку раціональної між опорної відстані. Skorистаємось методикою, наведеною у [8] .

При цьому спрощено уявимо вузол у вигляді балки, яку несуть дві пружні опори. Зусилля на передньому кінці балки є тангенціальною силою різання. Відомо, [30], що крива загальної податливості для шпиндельного вузла має екстремум у вигляді мінімуму. При цьому, звісно, шпиндельний вузол виявиться із максимальною жорсткістю. Це дозволяє оцінити вплив на жорсткість між опорної відстані. Позначимо податливості для пор: передньої  $k_{nep}$  і задньої  $k_{зад}$ . В книзі, [8], з метою визначення міжопорної (оптимальної) відстані  $l_{opt}$  представлено рівняння третього порядку

$$l_{opt}^3 - \left\{ \frac{6EJ_{піз}k_{nep}}{a} l_{opt} + 6EJ_{мо} [k_{nep} (1 - \xi_3) + k_{зад}] \right\} = 0, \quad (2.6)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу шпинделя; осьові моменти інерції перерізів шпинделя відповідно:  $J_{piz}$  – в місці різання і  $J_{mo}$  між опорами.

Це дає можливість для обчислення яка міжорона відстань є оптимальною на основі поведінки функції

$$\Psi = l_{opt}^3 - 6EJ_{nep}k_{nep} \left\{ \frac{1}{a} l_{opt} + \left[ (1 - \xi_3) + \frac{k_{зад}}{k_{nep}} \right] \right\}.$$

В наведених залежностях також врахований коефіцієнт защемлення опори  $\xi_3$ , а також віліт  $a$  шпинделя. Розрахунок проводимо за програмою, розробленою в середовищі MathCAD, [32]. Результати ілюструються рис. 2.16.

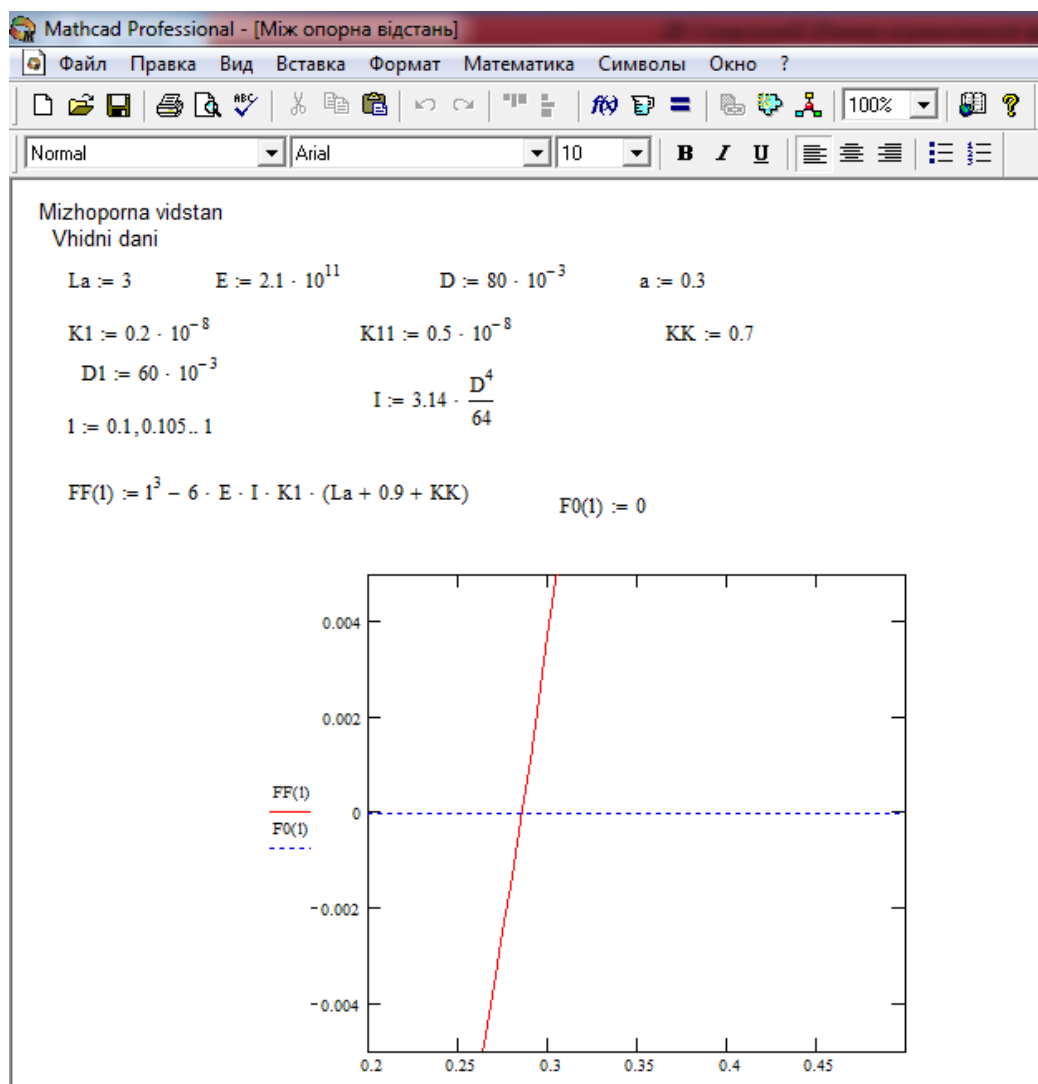


Рис. 2.16. Результати для розрахунку між опорної відстані

Очевидно, що шуканий оптимальний розв'язок необхідно шукати на перетині кривих із нульовою віссю. Отже, для податливостей  $0,2 \cdot 10^{-8}$  м/Н при співвідношенні між опорної відстані до діаметра за величиною 3,0 значення оптимальної між опорної відстані знаходиться в районі 275-300 мм. Відповідно вибираємо відстань між двома шпиндельними опорами 290мм.

### **Висновки до розділу 2**

Щодо наведених у розділі 2 результатів слід зазначити таке:

- 1) Спроектвана технологічна токарна операція для обробки типової деталі циліндричного корпусу є основою для подальшого конструювання, особливо що стосується розрахунку режимів різання
- 2) На основі рухів формоутворення і виконавчих рухів, щодо токарної обробки розроблена відповідна структурно-кінематична схема.
- 3) В результаті кінематичних розрахунків і вибору електродвигуна відповідної потужності і характеристик потужності побудований графік чисел обертів для приводу різання і запропонована повна кінематична схема.
- 4) На основі оптимізаційного розрахунку щодо між опорної відстані обрано варіант конструктивної схеми для розглядуваного випадку і розроблений шпиндельний вузол



### 3. Науково-дослідна частина

#### 3.1. Методика та порядок проведення досліджень

Методика наукових досліджень, [1], передбачає формування принципів побудови систем зменшення впливу пружних деформацій під час процесу точіння на точносні характеристики токарної обробки.

Такий підхід зумовлює аналіз відомих конструкційних схем зменшення дії силових навантажень процесу точіння в радіальному стосовно заготовки напрямку на деформації еквівалентної пружної системи токарного верстату, [3,4].

В такому аспекті необхідною є побудова системи вирівнювання дії осьових зусиль ( $a$ ,  $o$ тже, і радіальних зусиль) на токарну пружну технологічну систему із застосуванням двох різців.

Наступним етапом є побудова математичної моделі динаміки зміни навантажень в осьовому напрямку при застосуванні дворізцевого вирівнювання. Формою такої математичної моделі очікується система лінійних диференціальних рівнянь 2 порядку.

Далі необхідно забезпечити розв'язок отриманої системи рівнянь в часі для отримання, зокрема, відповідних амплітудних значень та характеристик частот коливань.

Шуканим результатом досліджень слід розуміти швидкодію запропонованої вирівнювальної системи. Отримані значення такої швидкодії слід оцінити на предмет можливості адекватної реакції системи на подразнення, пов'язані із різними похибками заготовок, які мають місце в процесі точіння.

При реалізації відповідних динамічних розрахунків планується застосовувати комп'ютерну техніку і прийнятні прикладні комп'ютерні програми, зокрема систему розрахунків MathCAD.

Дослідження завершуються обґрунтуванням певних техніко-економічних пропозицій та формуванням загальних висновків щодо виконаної роботи.

### 3.2. Принципи зменшення і компенсації пружних деформацій

Щодо зменшення впливу пружних деформацій технологічної обробної системи при токарному обробленні є застосування такого важливого і перспективного підходу як використання оброблення багатьма різцями. При цьому необхідним є застосування певного само налагодження процесу. Одночасно можливою є компенсація деформацій пружної системи, а також досягнення інших перспективних показників, [4].

Щодо застосування багаторіцевого оснащення самоналагоджувального типу, то слід відмітити, що його творення пов'язане із багаторічним науковим і практичним досвідом, [1, 33].

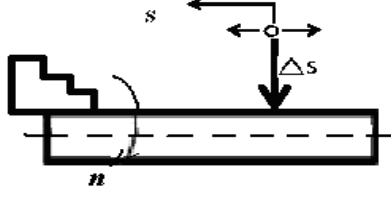



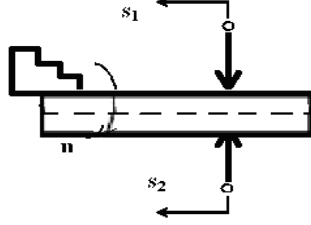



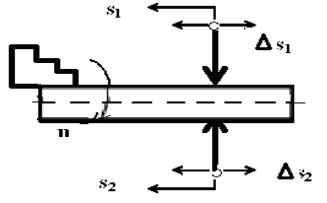



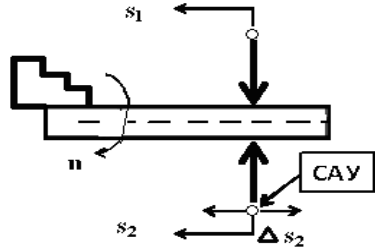

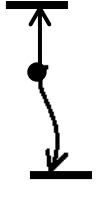

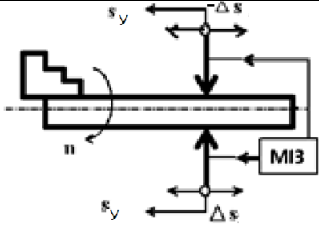



Проаналізуємо еволюцію використання різних компоновок та конструкцій токарних систем такого плану для випадків як одно-, так і дворіцевого точіння (табл. 3.1), [36].

Щодо вказаних пристроїв, то вони розміщені в порядку застосування у них певних регульовальних схем. При їх розгляді стає зрозумілим для вплив можливих різних факторів деформацій в процесі різання на похибки, що сформується в результаті обробки деталі.

Аналіз показаної таблиці ілюструє, що традиційне використання одного різця супроводжується при обробленні особливо деталей малої жорсткості похибками максимальної величини. Враховуючи такі фактори, як, наприклад, збільшення подачі  $s$  різця (зокрема, для підвищення продуктивності обробки), а також вильоту  $l$  консольно закріпленої заготовки, похибки внаслідок пружних деформацій різко зростають, внаслідок чого негативному впливу цих похибок може завадити лише застосування додаткових опор. Такі опори отримують за рахунок заднього центру, або шляхом застосування люнетів.

Якщо ж ми використаємо плаваючий інструменту (зокрема, підпружинений різець), то отримаємо випадкове пристосування різального інструменту до зміни умов процесу різання.

Таблиця 3.1. Розвиток токарних пристроїв відповідно до впливу на похибки токарної обробки деталей

Характеристика системи	Умовна схема	Вплив факторів на похибки деталі, зумовлені її деформаціями		
		Подача $s \uparrow$	Виліт $l \uparrow$	Додаткова опора +
1-різцева плаваюча				
2-різцева жорстка				
2-різцева плаваюча без регулювання				
2-різцева з використанням САУ				
2-різцева з самоналагодженням				

Отже, зростання факторів збурення (подачі, вильоту деталі) призводить і до збільшення величин похибок, проте в цьому випадку воно носитиме помірніший характер.

Тому доцільніше застосовувати дворіздеве різання.

Зокрема, проаналізуємо застосування двох різців, які жорстко закріплені опозитно один стосовно іншого. Це призводить навіть при збільшенні подачі, або ж вильоту заготовки, закріпленої в патроні, до суттєвого зменшення похибок по величині. Проте, негативними є труднощі налагодження такої системи і неможливість розміщення різальних лез обох інструментів в одному перерізі зрізу.

Тому картина оброблення значно покращується при застосуванні плаваючих блоків. Ці різальні блоки не пов'язані між собою. Проте і в такому випадку є можливим досягнути певного зменшення похибок пружних деформацій відповідно у поперечному перерізі деталі.

Використання налагоджених систем адаптивного керування процесом(САКП), очевидно, призведе до суттєвого зменшення величин пружних похибок, бо функціонування таких систем сприяє обмеженню зростання похибок при активізації дії факторів збурення. Але недоліком таких систем є їх значна вартість.

Тому нами пропонується заключна схема наведеної табл. 3.1. Схема ілюструє реагування на збурення (зростання подачі чи збільшення вильоту деталі) дворіздевої системи із механізмами самоналагодження (вирівнювання навантажень). При цьому такі пристрої можуть забезпечувати вирівнювання осьових складових зусиль різання, які генеруються від протилежно закріплених різців. При цьому компенсується дія і радіальних навантажень, що деформують заготовку під час обробки в поперечному напрямку.

Метою такого підходу є регулювання перехідними процесами при токарній обробці. При цьому принципова відмінність описаних конструкційних схем полягає в тому, передбачають неузгодження між швидкостями подач: 1) генерованої приводом, і 2) створюваних лезами різців.

Отже, в такому випадку у структурі технологічної системи з'являються внутрішні фактори адаптації до умов оброблення.

Осциляції різців у напрямку, що співпадає із напрямком подачі задають за рахунок зв'язків вирівнювального типу між лезами. Таким чином, отримують взаємопов'язані вимушені переміщення різців у зворотньо-поступальному напрямку. Отже, при цьому вирівнюють вплив різців щодо зміни радіальних відтисків заготовки. При цьому різальні леза різців забезпечують зрізування одного і того самого шару металу. Таке функціонування системи створює можливості простого кервання переміщеннями елементів еквівалентної пружної системи токарного верстату.

### **3.3. Аналіз дворізцевих токарних установок вирівнювального типу**

Проведемо аналіз деяких із систем вирівнювального типу, які споряджені двома різцями.

Недоліком відомих традиційних технологій і установок для дворізцевої обробки – це порівняно невисока точність оброблення. Такий недолік пов'язаний з тим, що при підналагодженні різців виникає стрибок при переході від тертя спокою до тертя руху. При цьому маємо низький рівень чутливості і плавності під налагодження. Також істотними є недостатні демпфуючі властивості. Слід також сказати, що при збільшенні сили різання збільшується і реакція в напрямних. Це знижує точність і продуктивність обробки.

Прикладом використання дворізцевого плаваючого блоку може бути конструкція, показана на рис. 3.1, [34].

Установка представляє собою корпус, в якому шляхом використання плаваючого паралелограма встановлено плаваючий блок із різцевими каретками. Блок з'єднаний з основою за посередництвом торсіонного вала, таким чином з можливістю поворота відносно вертикальної осі, що проходить через вісь обертання деталі.

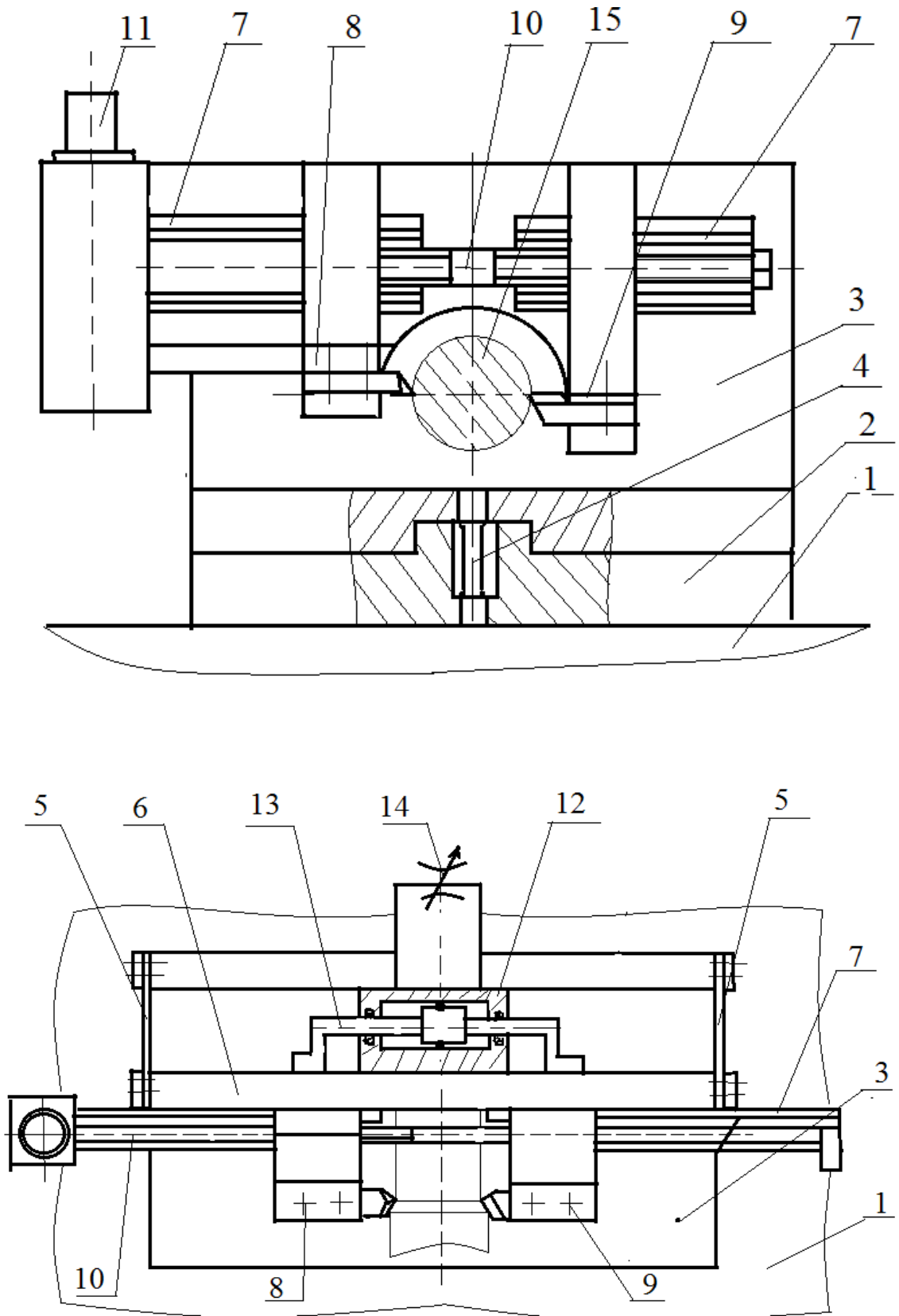


Рис. 3.1. Загальний вигляд дворіцевої установки для обробки валів із пристроєм вирівнювання

На супорті 1 верстату є основа 2 і корпус 3. При цьому корпус 3 встановлений на основі 2 з можливістю повороту відносно вертикальної осі, яка проходить через вісь обертання деталі, і з'єднаний з основою 2 засобом торсіонного валу 4. На корпусі 3 з допомогою пружного паралелограма у вигляді плоских пружин 5 закріплений самовстановлюваний плаваючий блок 6. З блоком 6 кріпляться різцеві каретки 8 і 9. Ці каретки з'єднані між собою гвинтом 10, на кінцях якого є різнонаправлена різь опікового кроку. Гвинт приводиться у дію двигуном 11. Штоки поршня 13 гідроциліндра 12 жорстко пов'язані із блоком 6. Порожнини гідроциліндра 12 пов'язані між собою через дросель 14 з регульованим перерізом. З допомогою описаного пристрою обробляють деталь 15.

Плаваючий блок 6 знаходиться в рівноважному стані, при якому сума моментів і сил, що діють на деталь дорівнює нулю. А це можливе при рівності осьових складових сил різання між собою. Таким чином, відбувається вирівнювання осьових складових зусиль різання, що діють на різці, які закріплені в каретках 8 і 9.

Гідроциліндр 12 і дросель 14 здійснюють демпфування можливих коливань деталі 15 і різців. Використання торсіонного валу 4, що з'єднує корпус 3 установки і основу 2, дозволяє зменшити вплив поперечних навантажень, що викликають прогин деталі 5.

Розроблений пристрій дозволяє підвищити точність обробки нежорстких валів за рахунок зменшення похибок, що зумовлені пружними деформаціями системи. За рахунок використання торсіонного вала 4 при зміні навантажень відбувається підвищення плавності і точності самовстановлення деталі. Внаслідок демпфування коливань підвищується вібростійкість технологічної системи.

В той же час дану установку слід використовувати для чорнової обробки. Це пов'язане із тим, що в результаті повороту різців погіршується якість обробленої поверхні.

Для уникнення цього недоліку можна запропонувати установку, яка споряджена системою адаптивного керування (САКП) (рис. 3.2), [34].

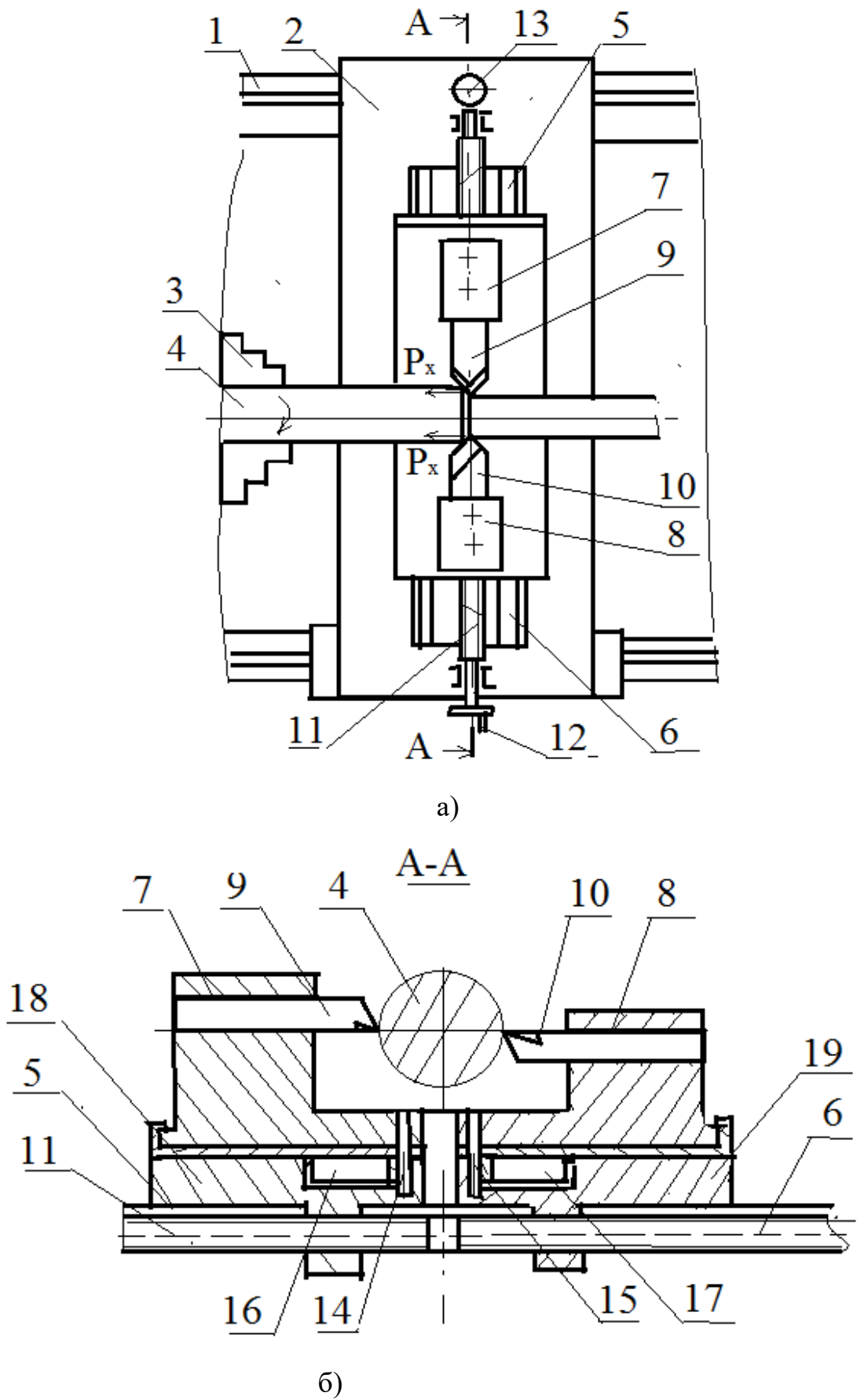


Рис. 3.2. Дворіцева вирівнювальна установка із системою адаптивного керування



При токарній обробці деталь 4 встановлюють в патроні. Обертанням маховичка 12 різці 9 і 10 встановлюють відносно осі деталі 4, яка закріплена в патроні 3. Для здійснення процесу різання салазкам 2 надають рух поздовжньої подачі вздовж напрямних 1. Силу різання та її складові вимірюють з допомогою датчиків. Пропорційні щодо вимірюваних величин сигнали подають на елемент порівняння. Сигнал неузгодження потрапляє до адаптивної системи керування, яка розроблена на основі гідравлічної системи (умовно не показана). При цьому порожнина 16 відповідає різцю 9, а порожнина 17 – різцю 10, які закріплені в різцетримачах відповідно 7 і 8.

Керування поворотом різця відносно осі, що проходить через його вершину, дозволяє врівноважити сили  $P_x$  протягом одного оберта деталі. При цьому вирівнюються як змінні, так і постійні складові навантажень. Таким чином це призводить до мінімального відтиску різців і стабілізації осі заготовки в процесі різання.

Це, в свою чергу дозволяє збільшувати глибину різання і подачу.

Більш проста конструкція ( без дорого вартісної системи адаптивного керування, але із властивостями адаптивного типу, [35]) , яка дозволяє створити самоналагоджувальний дворізцевий супорт зі зміщеннями різців вздовж осі X та вирівнювати осьові навантаження , представлена на рис. 3.3, [4].

Пристрій містить різцетримачі 5 і 8 з різцями 6 і 7, які рухомі відносно супорта 1 верстату в осьовому напрямку і контактують своїми штовхачами з кінцями рівноплечого важеля 4, який шарнірно з'єднаний з супортом.

Завдяки тому, що вісь важеля є нерухомою відносно супорта, дана система и намагається знаходитись в рівноважному стані. При цьому сума моментів від зусиль, що діють на важіль 4, повинна дорівнювати нулю. Це є можливим при рівності осьових складових  $P_x$  зусиль різання, що виникають при взаємодії різців 6 і 7 з деталлю, що обробляється.

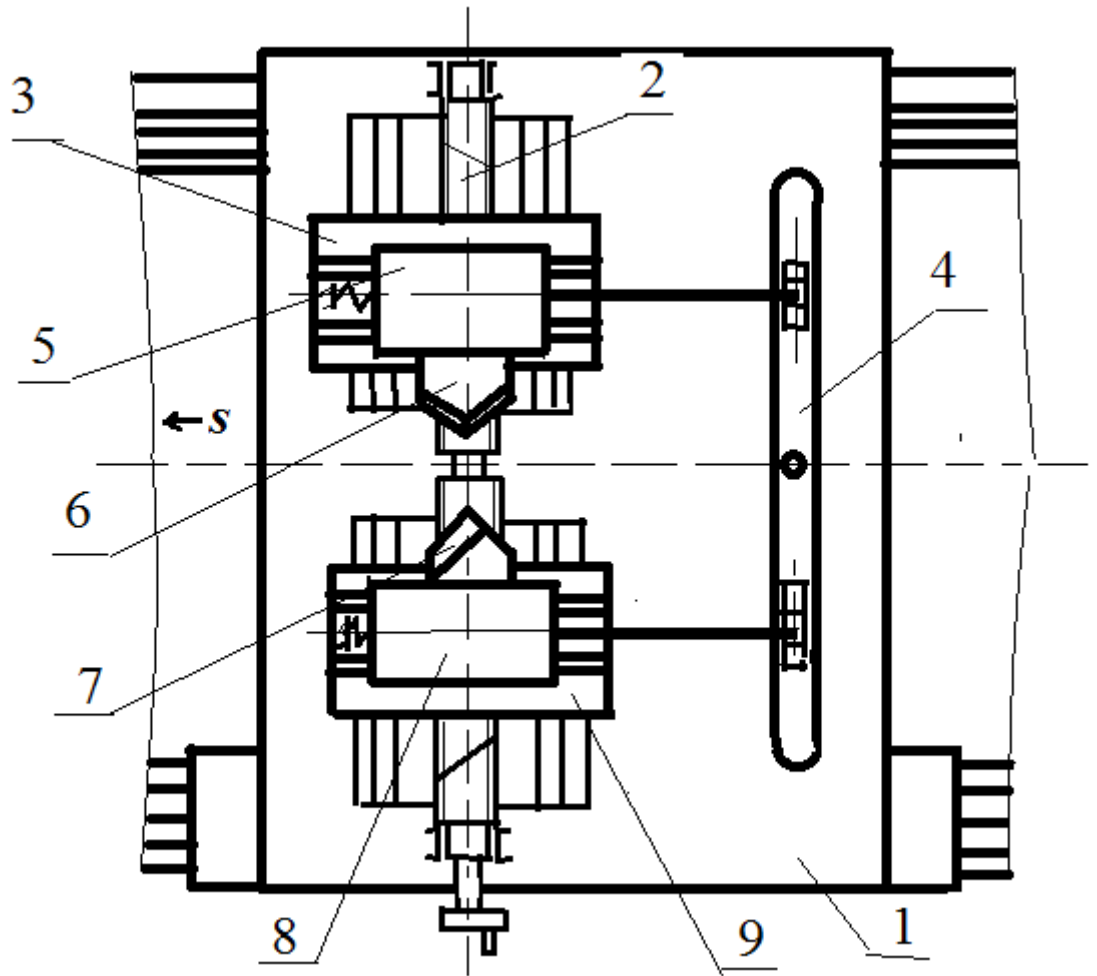


Рис. 3.3. Конструктивна схема дворізцевого супорта із важільним вирівнювальним механізмом

Через тотожність статичних умов точіння однаковими різцями 6 і 7 радіальні складові  $P_y$  сил різання також будуть однаковими.

Таким чином, поперчні сили, що діють на оброблювану заготовку, взаємно компенсуються. Отже, відповідні пружні деформації можна значно зменшити.

При такій обробці стабілізується в просторі вісь заготовки, що обробляється. Також зберігається спів падіння цієї осі із лінією центрів верстату.

Потрібно відмітити, що, як і в попередніх випадках, для зручності налагодження каретки 3 і 9 мають привід від гвинта 2, на якому є різнонаправлена різь, щоб зводити і розводити вершини різців.

Слід підкреслит, що описана конструктивні схема дозволяє проводити оброблення із застосуванням різних схем різання: за поділом подачі; застосовуючи поділ глибини різання, а також при комбінації вказаних схем зрізу.

У сукупності таке регулювання забезпечує умови, за яких можна отримати однакову площу зрізу, відповідно за змінних умов обробки. В цьому випадку сили різання і технологічні залишкові напруження в заготовці після оброблення мають рівномірний характер розподілу.

Ця ж установка у дещо зміненому вигляді представлена на рис. 3.4,[34].

Установка містить два різцетримачі 1, які розміщені симетрично відносно осі оброблюваної деталі 2. Різцетримачі мають можливість поздовжнього і поперечного переміщення відносно вказаної . Вони також з'єднані між собою гвинтом 3 з різнонаправленою різцю на кінцях гвинта. Різи мають однаковий крок.

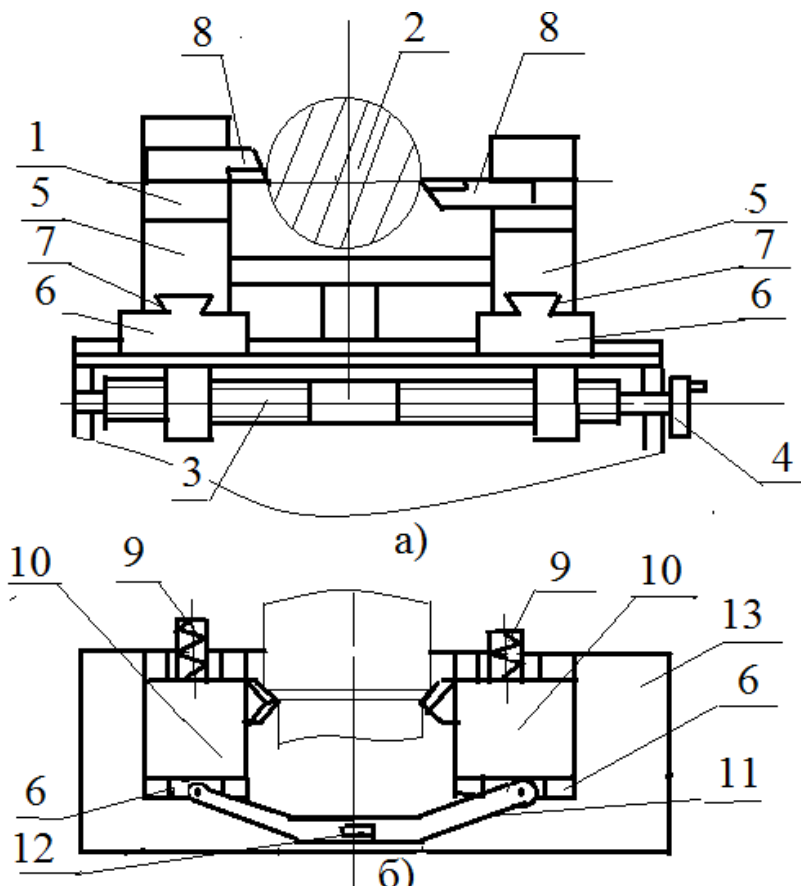


Рис. 3.4. Самоналагоджувальний дворіздцевий супорт з між інструментальним кінематичним зв'язком

Поздовжня 5 і поперечна 6 каретки виконані з можливістю поздовжнього переміщення. Вирівнювання навантажень відбувається з допомогою важеля 11, який закріплений на торсіоні 12.

Таким чином, при однакових глибинах різання сили різання на протилежних різцях 8 врівноважені. Якщо виникає різниця припуску, що знімається на різцях, сили змінюються. Різниця сил намагається змістити більш навантажений різець проти подачі. Відповідно через важіль 11 буде викликаним відповідне переміщення протилежного різцетримача. Жорсткість елементів налагодження дозволяє задати мінімальний поріг різниці сил різання, коли починається зміщення різців.

### 3.4. Розробка математичної моделі

Для побудови математичної моделі розглянемо динамічну поведінку вирівнювальної системи в умовах дворізцевого точіння заготовки при відсутності вібрацій в радіальному напрямку.

При цьому в першому наближенні розрахункову схему пристрою, який взятий за основу (рис. 3.3, 3.4) можна представити у вигляді двомасової динамічної системи (рис. 3.5).

На кожну із мас  $m$  які з'єднані між собою важелем із приведеними жорсткостями його кінців  $c_x$  діють відповідно сили корисного опору (осьові складові зусиль різання)  $P_{x1}$  і  $P_{x2}$ , а також сили тертя  $F_{mp1}$  і  $F_{mp2}$ . Вважатимемо, що жорсткість різців у напрямку поздовжньої подачі  $s$  є значно більшою від жорсткості важельної системи вирівнювання.

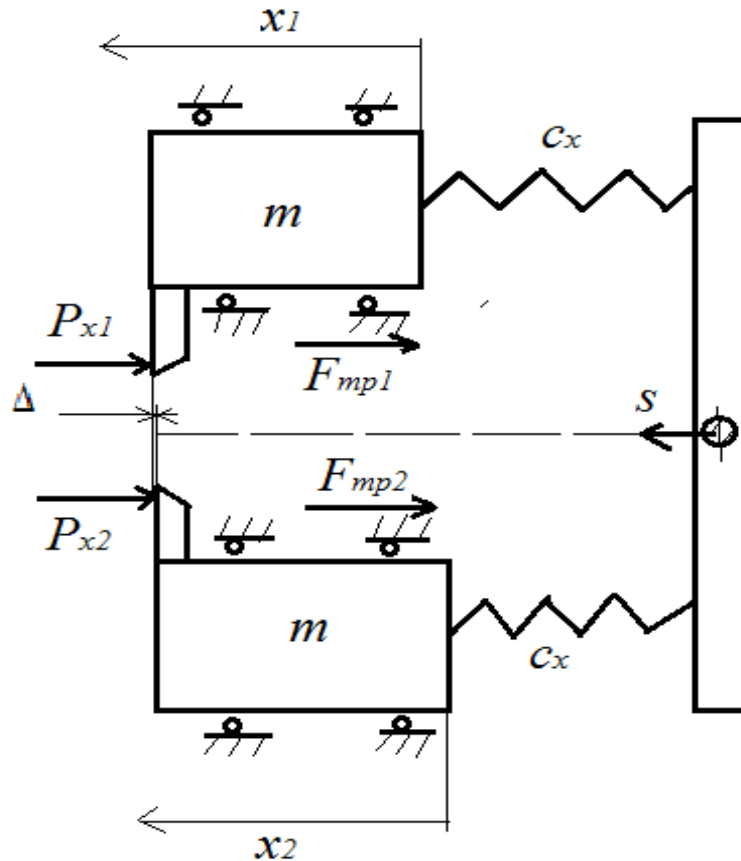


Рис. 3.5. Розрахункова схема механізму вирівнювання

До такої ж розрахункової схеми зводиться випадок оброблення прохідними упорними різцями з головними кутами в плані, що дорівнюють  $90^\circ$ . При цьому переміщення в радіальному напрямку не викликають зміни зусилля різання і динаміка досліджуваної системи повністю визначатиметься коливаннями різцетримачів в напрямку, що співпадає із поздовжньою віссю деталі.

Диференціальні рівняння, що описують рух розрахункової динамічної системи, мають вигляд

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_1 + c_x \left( \frac{x_1 + x_2}{2} - f_{cm} \right) &= -P_{x1} - F_{mp1}; \\ m\ddot{x}_2 + c_x \left( \frac{x_1 + x_2}{2} - f_{cm} \right) &= -P_{x2} - F_{mp2}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де  $x_1$  і  $x_2$  – зміщення вершин різців 1 і 2 від положення рівноваги, яке відповідає усталеному процесу різання;  $f_{cm}$  – деформація пружних елементів під дією усталених сил опору.

Якщо прийняти, що подача супорта  $s$  є величиною постійною, то подача кожного різцетримача при усталеному русі становитиме  $s/2$ . Визначимо поточні значення товщин зрізуваних шарів металу для кожного із різців:

$$a_1 = \frac{s}{2}\tau + x_1; a_2 = \frac{s}{2}\tau + x_2, \quad (3.2)$$

Бо переміщення різцетримачів при стабілізованому процесі оброблення пропорційні часу  $\tau$ . Оскільки робоче зусилля в першому наближенні може бути прийнятим пропорційним швидкості переміщення, то на різці 1 і 2 діють осьові складові цієї сили, які відповідно дорівнюють

$$P_{x1} = \alpha k_p \frac{d}{d\tau} \left( \frac{s}{2}\tau + x_1 \right); P_{x2} = \alpha k_p \frac{d}{d\tau} \left( \frac{s}{2}\tau + x_2 \right), \quad (3.3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, який дорівнює співвідношенню осьової складової сили різання до величини цього зусилля;  $k_p$  – коефіцієнт пропорційності між робочим зусиллям різання і швидкістю переміщення.

При оцінці роботи динамічної системи важливе значення мають зусилля тертя. Оскільки в розробленій конструкції застосовуються напрямні змішаного тертя, то відповідні зусилля тертя залежатимуть від робочих зусиль і для прямокутних напрямних дорівнюватимуть:

$$F_{mp1} = f(\beta P_{x1} + mg); F_{mp2} = f(\beta P_{x2} + mg), \quad (3.4)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання в русі;  $\beta$  – відношення суми тангенціальної і радіальної складових сил різання до осьової складової;  $g$  – прискорення вільного падіння.

В розрахунках вважатимемо, що напрями векторів зусиль, які прикладені до обох різців в процесі точіння не змінюються.

Підставимо вирази (3.3) і (3.4) у (3.1), а також віднімемо від першого рівняння системи (3.1) друге. Тоді отримаємо диференціальне рівняння вигляду

$$\frac{d^2\Delta}{d\tau^2} = -\alpha(1 + f\beta) \frac{k_p}{m} \frac{d\Delta}{d\tau}, \quad (3.5)$$

де  $\Delta = x_1 - x_2$  – неузгодження положень вершин різців у поздовжньому напрямку.

Виведений вираз (3.5) представляє собою математичну модель динаміки руху дворіцевої системи вирівнювання осьових навантажень в процесі токарної обробки.

В подальшому розглянемо три випадки похибок заготовок: 1) наявність твердих включень матеріалу; 2) радіальне биття оброблюваної заготовки; 3) ексцентриситет заготовки (ексцентричне її закріплення), які розглядалися як характерні похибки у розділі 1.4.

### **3.5. Вплив твердих включень матеріалу заготовки на реагування системи вирівнювання навантажень**

В цьому контексті розглянемо задачу, коли до одного із різців прикладено ударний імпульс  $R_{im}$ , що відповідає ударам різців об тверді включення матеріалу у заготовках.

Проінтегруємо двічі рівняння (3.5), яке є математичною моделлю динамічного процесу. Тоді отримаємо розв'язок цього рівняння у вигляді

$$\Delta = C_1 + C_2 \exp\left[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_p}{m} \tau\right],$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – постійні інтегрування, які отримуємо із початкових умов. Нехай при усталеній роботі в початковий момент часу  $\tau=0$  неузгодження різців у поздовжньому напрямку дорівнює  $\Delta|_{\tau=0}=0$ . Так як до однієї із мас

прикладений ударний імпульс  $R_{im}$ , то швидкість неузгодження положень вершин у поздовжньому напрямку в початковий момент часу дорівнюватиме  $d\Delta/d\tau|_{\tau=0} = R_{im}/m$ . Тоді розв'язок диференціального рівняння (3.5) набуде вигляду

$$\Delta = \frac{R_{im}}{k_p} \frac{1}{\alpha(1+f\beta)} \left\{ 1 - \exp\left[-\alpha(1+f\beta) \frac{k_p}{m} \tau\right] \right\}. \quad (3.6)$$

Отже, можна також визначити величину неузгодження складових зусиль різання (їх різницю), що викликають прогин деталі в поперечному напрямку при співударі одного із різців із твердим включенням:

$$P_{y1} - P_{y2} = \alpha \delta k_p \frac{R_{im}}{m} \exp\left[-\alpha(1+f\beta) \frac{k_p}{m} \tau\right], \quad (3.7)$$

де  $\delta = P_{y1}/P_{x1} = P_{y2}/P_{x2}$ .

Ця залежність показує як в часі реагує вирівнювальна система на ударну взаємодію одного із різців із твердим включенням у матеріалі.

### **3.6. Вплив радіального биття заготовки на реакцію вирівнювальної системи**

Проаналізуємо розповсюджений в реальних випадках обробки випадок зміни глибини різання за гармонічним законом, що відповідає впливу радіального биття заготовки на динамічний процес.

При цьому поперечний переріз заготовки близький до форми еліпса, а поздовжня вісь заготовки співпадає з лінією центрів верстата. Цей випадок розглянуто у розділі 1.4.

Поскілки коефіцієнт різання при точінні є прямо пропорційним до глибини різання, то на кожному із різців він змінюватиметься таким чином:

$$k_p = k_{p0} + k_{pr} \cos \omega \tau, \quad (3.8)$$



Де  $\omega$  – кутова швидкість обертання заготовки;  $k_{p0}$  і  $k_{pr}$  – постійна складова і амплітуда змінної складової крєфіцієнту  $k_p$ .

Підставимо значення (3.8) у рівняння (3.5). Тоді приходимо до диференціального рівняння

$$\frac{d^2\Delta}{d\tau^2} = -\alpha(1 + f\beta) \frac{(k_{p0} + k_{pr} \cos \omega\tau)}{m} \frac{d\Delta}{d\tau}. \quad (3.9)$$

Розв'яжемо це рівняння відносно першої похідної. При цьому врахуємо, що в початковий момент часу  $\tau=0$  швидкість неузгодження положень вершин різців буде

$$\left. \frac{d\Delta}{dt} \right|_{\tau=0} = v_{\Delta}.$$

Тоді отримаємо зміну в часі швидкості неузгодження вершин різців

$$\frac{d\Delta}{d\tau} = v_{\Delta} \exp\left\{[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \tau] + [-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{pr}}{m\omega} \sin(\omega\tau)]\right\}. \quad (3.10)$$

Таким чином, можемо перейти до визначення величини неузгодження складових зусиль різання, що деформують деталь в поперечному перерізі при зміні припуску за гармонійним законом. Ця величина дорівнює

$$\begin{aligned} P_{y1} - P_{y2} &= \\ &= \alpha\delta(k_{p0} + k_{pr})v_{\Delta} \exp[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \tau] \exp[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{pr}}{m\omega} \sin(\omega\tau)]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.7. Вплив ексцентриситету закріпленої заготовки на динаміку процесу вирівнювання

Розглянемо окремо випадок обробки ексцентрично закріпленої заготовки. Частково спростимо вихідну модель, і вважатимемо, що жорсткість важеля є дуже великою. Якщо величина ексцентриситету дорівнює  $e$ , то відповідні коефіцієнти різання для різців 1 і 2 дорівнюватимуть:

$$\begin{aligned} k_{p1} &= k_{p0} + k_{pe} \cos(\omega\tau + \phi_0); \\ k_{p1} &= k_{p0} + k_{pe} \cos(\omega\tau + \phi_0), \end{aligned}$$

де  $\phi_0$  - кут, який визначає положення деталі в початковий момент часу.

Визначимо неузгодження осьових складових зусиль при цьому:

$$\begin{aligned} P_{x1} - P_{x2} &= \\ &= \alpha[k_{p0} + k_{pe} \cos(\omega\tau + \phi_0)]\left(\frac{s}{2} + \frac{dx_1}{d\tau}\right) - \\ &- \alpha[k_{p0} - k_{pe} \cos(\omega\tau + \phi_0)]\left(\frac{s}{2} + \frac{dx_2}{d\tau}\right). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Врахуємо, що для обраної розрахункової схеми  $x_1 = -x_2$ . Тоді прийдемо до диференціального рівняння, що описує рух системи, у такому вигляді

$$m\ddot{x}_1 = -\alpha(1 + f\beta)\left[k_{pe} \frac{s}{2} \cos(\omega\tau + \phi_0) + k_{p0}\dot{x}_1\right]. \quad (3.13)$$

Загальний розв'язок цього рівняння відносно першої похідної, що стосується лінійної швидкості першого різця:

$$\begin{aligned} v_1 &= C \exp\left[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \tau\right] - \frac{\alpha(1 + f\beta) \left(\frac{k_{pe}}{m}\right) \left(\frac{s}{2}\right) *}{\left[\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m}\right]^2 + \omega^2} * \\ &* \left[\omega \sin(\omega\tau + \phi_0) + \alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \cos(\omega\tau + \phi_0)\right]. \end{aligned}$$

Якщо знімаються звичні і більші припущення, то величина  $k_{p0} \gg m$ . Тому вище наведена формула спрощується до вигляду:

$$v_1 = C \exp\left[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \tau\right] - \frac{k_{pe}}{k_{p0}} \frac{s}{2} \cos(\omega\tau + \phi_0).$$

Постійну  $C$  знаходимо із початкових умов. Неузгодження радіальних складових складе

$$\begin{aligned} P_{y1} - P_{y2} &= \\ &= \alpha \delta [k_{pe} s \cos(\omega\tau + \phi_0) + 2k_{p0} v_1] = 2\alpha \delta C \exp\left[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_{p0}}{m} \tau\right]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

### 3.8. Дослідження динамічної швидкодії вирівнювання навантажень

Дослідимо як швидко в динамічному відношенні відбувається стабілізація системи у описаних вище випадках: а) прикладення ударного імпульсу; б) зміні припуску за гармонійним законом; в) обробленні ексцентричної заготовки.

Якщо звернутись до рівняння (3.7), то побачимо, що вказана неузгодженість сил різання при  $\tau \rightarrow \infty$  сходиться до 0:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \{ P_{y1} - P_{y2} \} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left\{ \alpha \delta k_p \frac{R_{LM}}{m} \exp\left[-\alpha(1 + f\beta) \frac{k_p}{m} \tau\right] \right\} = 0.$$

Визначимо час, за який розглядувана система стабілізується в динамічному відношенні при прикладенні ударного імпульсу, тобто визначимо її швидкодію. Нехай кінцеве неузгодження зусиль складатиме 5% від першопочаткового значення. Тоді

$$0,05\alpha\delta k_p \frac{R_{im}}{m} = \alpha\delta k_p \frac{R_{im}}{m} \exp[-\alpha(1+f\beta)\frac{k_p}{m}T_{CT}], \quad (3.15)$$

де  $T_{CT}$  – час стабілізації системи у динамічному відношенні.

Із рівняння (3.15) отримаємо, що

$$T_{CT} = \frac{2,99m}{\alpha(1+f\beta)k_p}. \quad (3.16)$$

Отже, згідно із (3.16) величина  $T_{CT}$  не залежить від величини імпульсу, а визначається характеристиками самої системи.

Подібно до викладеного проаналізуємо швидкодію системи при зміні припуску за гармонійним законом.

Легко бачити, що послідовність (3.11) при  $\tau \rightarrow \infty$  теж сходиться до 0. Таким чином, і в цьому випадку система забезпечує постійне уникнення прогинів деталі при обробленні. Припустимо, що час стабілізації системи при цьому менший, ніж 1/8 оберта заготовки. Таким припущення є правомочним, якщо проаналізувати значення  $T_{CT}$ , що відповідають (3.16). Тоді для ділянки  $0 < \tau < T_{CT}$  можна приблизно прийняти

$$\sin(\omega\tau) \approx \omega\tau; \cos(\omega\tau) \approx 1.$$

З врахуванням цього легко визначити, що при гармонійному законі зміні припуску час стабілізації системи в динамічному відношенні також можна визначати за формулою (3.16) при тому, що  $k_p = k_{p0} + k_{pe}$ .

Для випадку ексцентрично закріпленої заготовки будемо бачити, що величина неузгодження радіальних зусиль різання (3.14) при  $\tau \rightarrow \infty$  також збігається до 0. І відповідно час стабілізації системи в динамічному відношенні теж можна оцінювати залежністю типу (3.16) враховуючи, що  $k_p = k_{p0} + k_{pe}$ .

Підстановка конкретних значень параметрів у вираз (3.16) підтверджує достатню швидкодію системи. У більшості випадків значення  $T_{ct}$  у 8...100 разів є меншим від періоду обертання деталі, що визначається за формулою  $T = 2\pi/\omega$ . Зокрема, при обробленні сталюого вала різцями із головними кутами в плані  $\varphi = 75^\circ$  і глибині різання  $t = 0,5$  мм ( $k_p = 7 \cdot 10^4$  кг/с) та кутовій швидкості обертання шпинделя  $\omega = 104,6 \text{ с}^{-1}$  при масі різцетримачів  $m = 20$  кг та  $\alpha = 0,2$ ;  $\beta = 7$ ;  $f = 0,1$ , знайдемо, що  $T_{ct} = 28 \cdot 10^{-4}$  с, тоді як в цьому випадку період обертання деталі  $T = 6 \cdot 10^{-2}$  с.

### **3.9. Зміст графічних залежностей з використанням комп'ютерних побудов**

Проведені аналітичні підходи можна підтвердити побудовою графічних картин динамічної поведінки вирівнювальної системи.

Спершу побудуємо графіки зміни в часі різниці зусиль різання, що виникають при зміні умов оброблення та діють на окремі різцетримачі (формули (3.7), (3.11)). При цьому розглядаються випадки прикладення ударного імпульсу до одного із різців, що пов'язане із контактом із твердими включеннями матеріалу оброблення і відповідного леза, а також радіальним биттям заготовки, яке викликане попередніми або ж заготівельними операціями. Для цього розробляємо програму розрахунку в середовищі MathCAD, [32], примірний текст якої ілюструє рис. 3.6.

```

k := 7 · 104      b := 7      D := 1.6

t := 0.5
fi := 75          w := 100
a := 0.2
f := 0.1
R := 0.02

m := 10
A := a · D · k ·  $\frac{R}{m}$           A = 44.8
B := -a · (1 + f · b) ·  $\frac{k}{m}$ 

tt := 0,00001.. 0.001

dPY(tt) := A ·  $\left(1 + B^5 \cdot \frac{tt^5}{120} + B \cdot tt + B^4 \cdot \frac{tt^4}{24} + B^3 \cdot \frac{tt^3}{6} + B^2 \cdot \frac{tt^2}{2}\right)$ 

kr := 1.2 · k
vd := 0.002
AA := a · D · kr · vd
CC(tt) :=  $\frac{B \cdot 0.2 \cdot k \cdot \sin(w \cdot tt)}{k \cdot w}$           AA = 53.76

dPR(tt) := AA ·  $\left(1 + B^5 \cdot \frac{tt^5}{120} + B \cdot tt + B^4 \cdot \frac{tt^4}{24} + B^3 \cdot \frac{tt^3}{6} + B^2 \cdot \frac{tt^2}{2}\right) \cdot \left(1 + \frac{CC(tt)^4}{24} + \frac{CC(tt)^3}{6} + \frac{CC(tt)^2}{2} + CC(tt) + \frac{CC(tt)^5}{120}\right)$ 

```

Рис. 3.6. Текст програми розрахунку зміни різниці зусиль різання на різцях в часі

За результатами застосування вказаної програми були розраховані відповідні часові графіки (с) зміни радіальних складових сил різання  $P_y$  на окремих різальних елементах. При цьому було враховано, що співвідношення радіальної і тангенціальної складових становить 0,4, а осьові і тангенціальної складових – 0,2.

Графіки показують як змінюються значення  $\Delta P_y$  для вказаних двох випадків при різних значеннях  $k_p=7 \cdot 10^4$  кг/с (рис. 3.6, а);  $k_p=8 \cdot 10^4$  кг/с (рис. 3.6, б) і різних значеннях мас різцетримачів  $m=10$  кг (рис. 3.6, в)  $m=10$  кг (рис. 3.6, г).

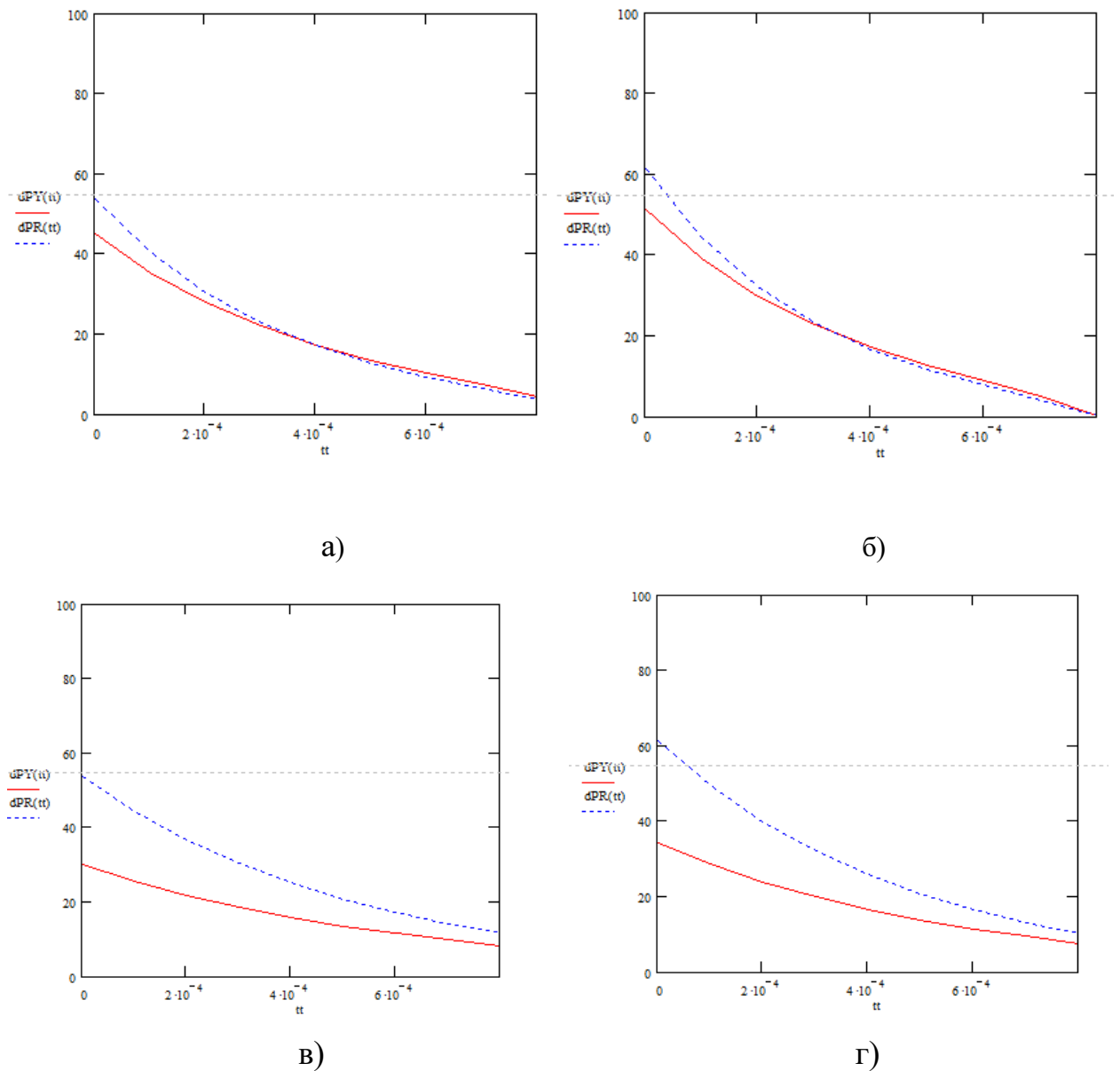


Рис. 3.6. Зміни в часі неузгоджень радіальних зусиль при  $m=10\text{кг}$ ,  $k_p=7\cdot 10^4\text{кг/с}$  (а);  $m=10\text{кг}$ ,  $k_p=8\cdot 10^4\text{кг/с}$  (б);  $m=15\text{кг}$ ,  $k_p=7\cdot 10^4\text{кг/с}$  (в);  $m=15\text{кг}$ ,  $k_p=8\cdot 10^4\text{кг/с}$  (г)

Графіки рис. 3.6 демонструють стабілізацію і вирівнювання системи (зниження до 0 різниці радіальних зусиль) при її збуреннях (криві червоного кольору відповідають ударам об тверді включення, а криві синього кольору – похибкам, що викликані радіальним биттям заготовки). Така поведінки системи вирівнювання показує її високу працездатність.

Визначимо також як при цьому буде себе поводити параметр швидкодії.

В результаті розрахунку за допомогою MathCAD отримані і на рис. 3.7 зображені зміни часу стабілізації вирівнювальної системи в динамічному відношенні залежно від зміни величин мас різцетримачів (вісь асцис) для трьох значень коефіцієнтів різання  $k_p=7\cdot 10^4$ кГ/с;  $k_p=6\cdot 10^4$ кГ/с;  $k_p=8\cdot 10^4$ кГ/с.

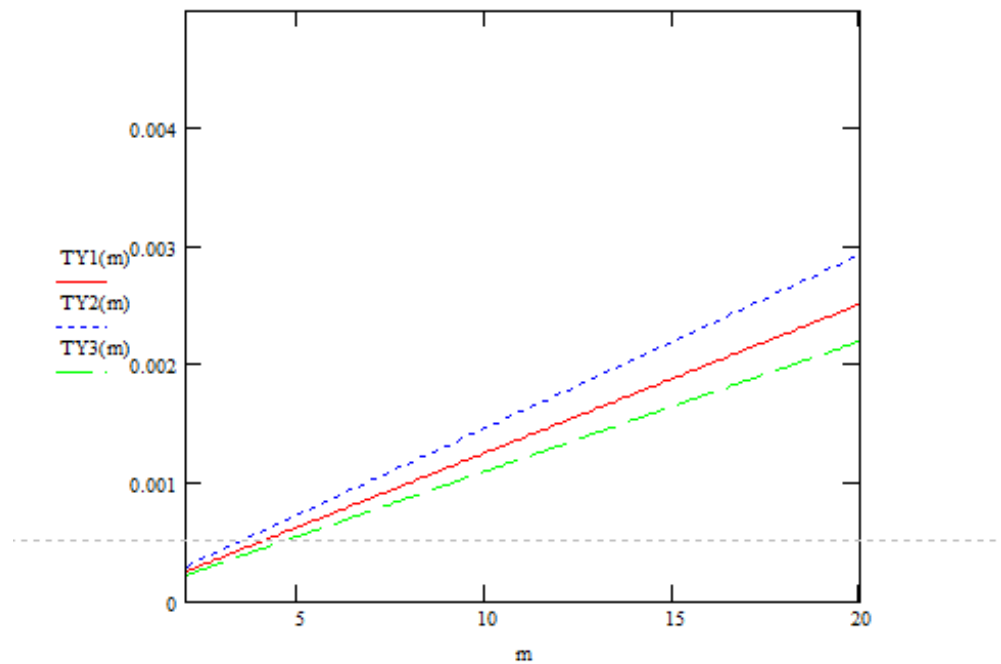


Рис. 3.7. Графічні залежності часу стабілізації системи (швидкодії) від величин мас різцетримачів

Аналогічно отримані і відповідно на рис.3.8 зображені залежності часів стабілізації системи вирівнювання при зміні коефіцієнтів різання (тобто зміні припусків) для значень мас різцетримачів  $m=5;10;15$  кг. На графіках величина  $K= k_p/10^4$ .



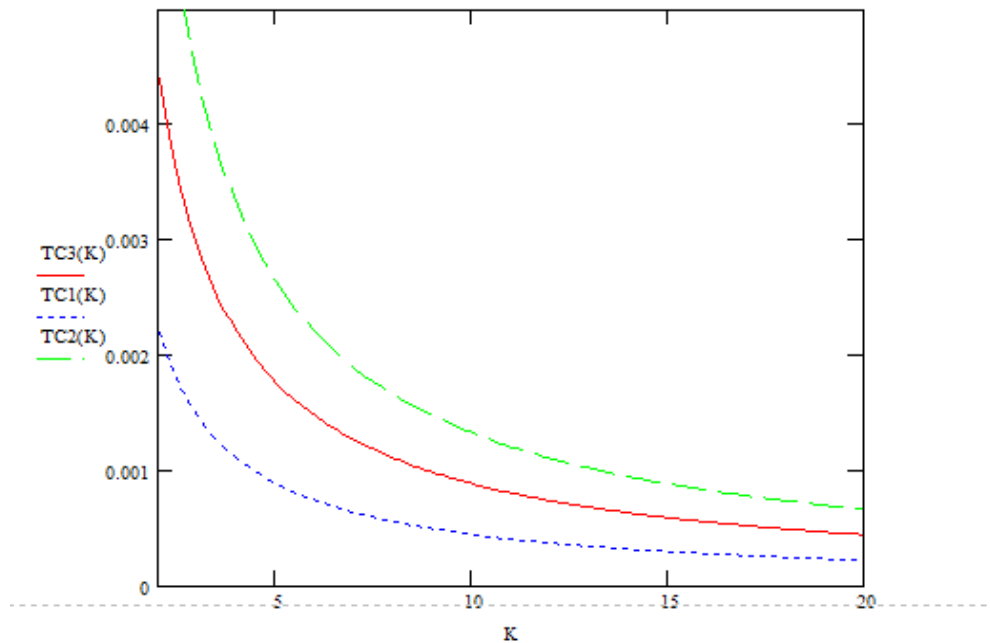


Рис. 3.8. Графічні залежності часу стабілізації системи (швидкодії) від зміни величин припусків на обробку

Наведені графіки показують, що при малих припущах, особливо, при значних масах різцетримачів ( $m=15$  кг) час стабілізації системи в динамічному відношенні є досить значним. Тому на верстатах менших розмірів знімати товсту стружку не варто.

Такі міркування дають змогу перетворити формулу (3.16) до вигляду:

$$T_{CT} = \frac{2,99}{\alpha(1 + f\beta)KM}, \quad (3.17)$$

де  $KM = k_p/m$ , що ставить час стабілізації в залежність від вказаного співвідношення технологічного параметру і параметру інерції і дає змогу підібрати ці характеристики залежно від часу обертання заготовки.

### Висновки до розділу 3

1. Наведено послідовність проведення наукових досліджень.
2. На основі запропонованого принципу вирівнювання осьових навантажень при токарному обробленні опзитно розміщеними різцями проаналізовані основні конструктивні схеми пристроїв із вирівнювальними системами.
3. Побудована у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь математична модель динамічної поведінки вирівнювальної схеми із двома різцями.
4. В результаті розв'язку математичної моделі отримані аналітичні і комп'ютерні результати оцінки динамічної швидкодії реагування системи вирівнювання при її збуреннях похибками заготовок: змінт твердості, радіального биття і ексцентриситету.
5. Окремі результати дослідження оприлюднені і опубліковані у матеріалах науково-технічної конференції. Текст тез наведений у додатку.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЛЬНОСТІ

### 4.1 . Вимоги до електроприводу верстатів з точки зору охорони праці

Пристрій електродвигунів верстата зумовлений особливостями верстаного електроприводу. Це такі особливості як повторно-короткочасний режим роботи, велика частота включень, широкий діапазон регулювання, часті реверси, [37].

До електроприводу виставляють специфічні вимоги – як загальні, так і стосовно охорони праці.

Ці вимоги такі, [37]: 1)економічність, яка характеризує рівень споживання електроенергії. Застосування електроприводу певного типу має бути обґрунтованим;

2) надійність, що характеризує властивість електроприводу виконувати необхідні функції, в тому числі з врахуванням безпеки, зберігаючи експлуатаційні показники і характеристики протягом певного часу.

Питання надійності досить широке. Тому до нього входять декілька понять. Розглянемо їх з очки зору охорони праці.

Працездатністю вважають стан електроприводу, при якому він здатен повністю і безпечно виконувати свої функції.

Безвідмовність – це властивість електроприводу зберігати свою працездатність протягом певного часу.

Розрізняють також довговічність, як властивість електроприводу зберігати свою працездатність до граничного стану, коли його експлуатація стає неможливою з технічних чи економічних причин, умов безпеки або через необхідність капітального ремонту. Термін служби до граничного стану називають напрацюванням електроприводу.

Ремонтопридатність визначає пристосованість електроприводу до попередження і виявлення несправностей і відмов, в тому числі з точки зору безпеки, та усунення їх шляхом проведення ремонтів і техобслуговування.

Збереженість – це властивість електроприводу безперервно підтримувати свою працездатність і безпечне функціонування на протязі і після зберігання і транспортування.

Електродвигуни за конструктивним виконанням повинні задовольняти вимогам навколишнього середовища.

Перш ніж приступити до певної роботи з обслуговування електричного і електромеханічного обладнання, перевіряють стан захисного заземлення. Роботу можна виконувати тільки при знятій напрузі. Тому у відсутності напруги переконуються за показником напруги. Показник напруги в свою чергу перевіряють на справність дії.

При оглядах елементів працюючого електрообладнання не слід наближатись до струмопровідних частин електроустановки. Важливо також проявляти обережність при очистці елементів електроприводу. Такі роботи без зняття напруги створюють небезпеку для виконання.

Небезпека, що викликана порушенням правил техніки безпеки, при обслуговуванні електрообладнання зростає в цехах категорій «зпідвищеною безпекою» і «особливо небезпечних».

Без зняття напруги з електроустановки, яле із збереженням заходів обережності можна при експлуатації виконувати такі роботи, як чистка і обтирання корпусів електрообладнання, доливка масла в підшипники електродвигунів, заміна трубчатих чи пробкових запобіжників.

Якщо необхідно провести певні ремонтні роботи в електродвигунах чи апаратах керування, а також замінити плавкі вставки відкритого типу, то такі роботи дозволяється виконувати одній особі після попереднього відключенні цього електродвигуна чи апарату від джерела струму. Відключення відбувається не менш, ніж у двох місцях (наприклад, на щиті і безпосередньо на місці роботи) рубильником зі зняттям запобіжників. Для уникнення помилкового подачі напруги персонал, який провів відключення, повинен вивісити попереджувальні плакати: «Не вмикати, працюють люди». Ремонтні роботи повинні проводитись не менш як двома особами.

Ручне керування пусковими пристроями, що мають відкриті струмопровідні частини, є операцією, яка може при невиконанні правил техніки безпеки представляти небезпеку для обслуговуючого персоналу. Тому цю операцію треба виконувати у діелектричних рукавицях. В місцях із сирістю перед пусковими пристроями кладуть ізолюючі прокладки. В процесі експлуатації можуть виникнути випадки, коли треба відкрити ящик пускового пристрою, який знаходиться під напругою. Відкривати ящик дозволяють тільки особі, яка має для цього відповідну кваліфікацію. Якщо є необхідність проведення робіт всередині ящика, то попередньо із пристрою, що ремонтується знімають напругу.

При обертанні електродвигунів проводити роботи в його ланцюгах небезпечно. Якщо виникає необхідність провести роботи в ланцюгу реостата ротора під час обертання електродвигуна, то це дозволяється тільки при піднятих щитках чи повністю виведеному реостаті. Цю роботу треба виконувати у діелектричних рукавицях або інструментом з ізольованими рукоятками, стоячи на гумовому килимку.

Якщо електродвигун довгий час працює із підвищеною вібрацією, що шкідливо для здоров'я обслуговуючого персоналу, то вказану ненормальність потрібно ліквідувати у найкоротший термін.

#### **4.2. Характеристика умов безпеки робочого місця**

Для організації робочого місця слід звернутись до аналізу технологічного процесу, [38]. Вимогами передбачено, що робочі приміщення передбачають змогу боротьби з такими негативними проявами як шум та вібрації. Також повинне виключатись забруднення повітря. Існуючі нормативи також передбачають, що виробничі приміщення в достотній мірі повинні бути забезпечені природним освітленням. Обов'язково також необхідно улаштувати ефективну вентиляцію. Ця вентиляція повинна відповідати екологічним вимогам і санітарно-гігієнічним нормам.

Загалом існують такі визначені вимоги для розробки плану виробничої дільниці, [38]:

1) Розміщення технологічного обладнання, а також проходів та проїздів повинно плануватисьзабезпечити таким чином, щоб гарантовану зручність для людей та безпеку праці. Обовязково має передбачатись можливість ремонту чи демонтажу. Планування має створювати належні умови транспортування заготовок та відповідного інструментального забезпечення.

2) Розміщення відповідного технологічного устаткування повинно узгоджуватись із необхідними підіймально-транспортними засобами.

3) Організація наявних робочих місць повинна відповідати прийнятим ергономічним вимогам.

4) Засоби автоматизації технологічного процесу забезпечують полегшені умови праці.

Пропозиції щодо робочих місць виробничої дільниці ґрунтуються на генеральному плані підприємства. Базові вимоги до такого генерального плану зазначені у СНиП2.09.02-85, а чинні вимоги до робочих приміщень - у СНиП11-90-81 і СН245-71.

У виробничих приміщеннях застосовують попереджувальне фарбування, яке є обов'язковим для таких елементів як: будівельних конструкцій, електричних дротів, обладнання технологічного плану, деяких пристосувань. Вказане фарбування здійснюють для запобігання травматизму. Воно виконується відповідно до ГОСТ 12.4.026-76.

Існуючі санітарні норми визначають, [38], визначають необхідний об'єм виробничого приміщення. Зокрема, це може бути, наприклад, 15м<sup>3</sup>. Вибираємо висоту робочого приміщення - 4,5м. Усередині дільниці вдля становлюємо для ширини основних проходів - 1,5м, а ширина проїздів - 2,5 м. Для виходів із приміщень достатньою є ширина 1,0м, а відповідна висота становить 2,2м. Зауважимо,що брами, які ведуть на вулицю, необхідно обладнувати тамбурами [38].

Особливі вимоги встановлюють власне до облаштування робочого місця. Таке облаштування повинне забезпечувати зручні рухи (відповідно до вимог ергономіки), а також безпеку маніпулювання із заготовками, інструментами та матеріалами. Необхідно, щоб були створені технологічні і

безпечні умови щодо ремонту і обслуговування технологічного обладнання. Планування робочого місця повинне забезпечувати зручне розміщення засобів керування обладнанням, стелажі з пристосуваннями, місця для накопичення заготовок, шафи для інструментів [38].

Щодо токарної обробки, то така дільниця відповідає гігієнічній класифікації 2 класу. Для неї присутні умови праці, які відповідають факторам, які є співставними до звичайних вимог щодо гігієнічних нормативів стосовно робочих місць. При цьому не передбачений особливо несприятливий вплив на здоров'я операторів та інших робітників [38].

Обовязковою є вимога, щоб підлога дільниці токарної обробки була зносостійкою і неслизькою. Також така підлога повинна легко очищуватись від бруду. Необхідно попереджувати проникнення в інші приміщення мастил, ЗОР, емульсій і подібних речовин.

Для категорії токарних робіт, які відносять до середньої важкості, вибирають відповідний мікроклімат робочого приміщення. Такий мікроклімат повинен забезпечувати нормальні умови праці, [38], а саме:

а) режим температури повітря, зокрема, у теплий період  $t = (21..23)^\circ\text{C}$ , а в холодний період -  $t = (19..21)^\circ\text{C}$ ;

б) встановлену нормами відносну вологість повітря  $\theta = (40 \dots 60)\%$ ;

в) допустиму швидкість руху повітря: у холодну пору року  $V = \text{до } 0,3\text{ м/с}$ , а у - теплий період  $V = 0,4 \dots 0,2\text{ м/с}$ .

Існують вимоги і до інших параметрів мікроклімату, а саме, барометричний тиск  $\rho = 760\text{ мм.рт.ст.}$ ; можливе випромінювання повинно бути обмеженої інтенсивності:  $w < 75\text{ Вт/м}^2$ .

На виробничій дільниці, що передбачає токарні роботи, рекомендується встановлювати припливно-витяжну вентиляцію. При цьому має бути забезпечений такий повітряний обмін, що комбінує подачу і одночасне видалення повітря.

Опалення пропонується водяне (низького тиску) і воно має бути згідно санітарно-гігієнічних вимог [38].

Особливі вимоги на робочому місці щодо необхідного освітлення. Слід використовувати суміщене освітлення. При цьому на робочих місцях природне освітлення доповнюють штучним згідно із СНиП11-4-79, зокрема, для робочого освітлення -  $E_p=300\text{лк}$ ; для аварійного освітлення  $E_{ав}=2\text{лк}$ ; для евакуаційного освітлення -  $E_{ев}=0,5\text{лк}$ .

Рівень шуму зменшують з допомогою захисних екранів відповідно до ГОСТ12.1.029.-80. Загалом рівень шуму не повинен перевищувати  $L_w=70\text{дБ}$  [38].

Для запобігання вібраціям на дільницях токарної обробки використовуються демпфери, а також спеціальні покриття, які використовують для корпусних частин устаткування. Встановлено, що гранична норма вібрації згідно ГОСТ12.1.012-78 не повинна перевищувати 65 дб.[38]

Визначено, що з метою попередження ураження електричним струмом технологічне та інше устаткування необхідно споряджати заземлення. Опір заземлення не перевищує  $R_d \leq 4 \text{ Ом}$ . Передбачається також огороження кабелів і встановлення блокуючих пристроїв для аварійного вимкнення.

Робоче місце механічних дільниць за рівнем пожежної безпеки відносять до категорії приміщень Д ( за ГОСТ12.1004.-91 ССБТ). Зазвичай, потрібно встановлювати пожежні прилади типу ПКОП-1 на 10 сповіщувачів. На дільниці розміщується також пожежний щит. На щиті розміщують засоби пожежогасіння, тобто порошкові вогнегасники ОП-2, а також необхідний пожежний інвентар. Це – пісок, ломи, гаки, сокири. Елементи інвентаря позначені фарбою за ГОСТ12.4.026-76 [38].

#### **Висновки до розділу 4**

В результаті розділу 4 робимо такі висновки.

1. Здійснений аналіз вимог електроприводу з точки зору охорони праці. Наведені застереження, що стосуються ремонтних робіт із електрообладнанням і електроприводом.



2. Показано як комплектується робоче місце на механічних дільницях з точки зору безпеки життєдіяльності.

## Загальні висновки

1. В роботі проведені конструкторсько-наукові дослідження процесів динаміки механічної системи вирівнювання осьових навантажень різання при точінні двома різцями з урахуванням впливу похибок заготовок.
2. Огляд літературних джерел з проблем підвищення точності в технології машинобудівних процесів дозволив визначити основні похибки оброблення, які мають місце при точінні. В той же час ці похибки значно підсилюються через наявність похибок самих заготовок, серед яких вирізняються похибки, зумовлені структурою оброблюваного матеріалу, зокрема змінами його твердості, змінна товщина зрізу, викликана радіальним биттям заготовки та її ексцентриситет. Зроблено висновок, що ці похибки заготовок необхідно мінімізувати при обробленні.
3. Встановлено, що додатковими важливими факторами, які формують точність обробки, є наявність чи відсутність негативних динамічних процесів при обробленні, аналіз яких дозволив встановити основні характерні особливості таких явищ.
4. З допомогою конструювання технологічної операції процесу оброблення деталі «корпус циліндричний» було встановлено основні режимні елементи токарної операції, визначені силові та енергетичні її характеристики, які використані в подальшому для розроблення компоновочного рішення та кінематики токарного верстату.
5. Методом аналізу формоутворення та інших виконавчих рухів встановлені доцільні структурні формули можливих варіантів компоновок та вибрано раціональну, яка послужила основою для розробки структурно-кінематичної та кінематичної схем.
6. З використанням досвіду побудови ліній шпинделя верстатів запропоновано конструкцію двоопорного шпиндельного вузла модернізованого токарного верстату з оптимізованою на основі комп'ютерного розрахунку відстанню між його опорами.

7. Для вирівнювання навантажень в процесі оброблення двома різцями проаналізовані конструкції існуючих систем, зокрема, радіального вирівнювання з демпфуванням та застосування адаптивної системи, і на цій основі запропоновані конструктивні схеми механічного вирівнювання осьових навантажень при різанні з метою уникнення похибок оброблення.
8. Динамічні аспекти використання систем вирівнювання осьових зусиль різання були вивчені для випадків ударів до твердих включень, радіального биття та наявностей ексцентриситету, як характерних похибок заготовок. Таке дослідження проведене з використанням побудованої оригінальної динамічної моделі.
9. В результаті аналітичного розв'язку математичної моделі у формі звичайних диференціальних рівнянь із збуреннями, викликаними похибками заготовок, отримані математичні залежності оцінки неузгоджень радіальних зусиль різання між собою при осьовому вирівнюванні та проаналізовані графічні аналоги таких залежностей.
10. Результатом наукових досліджень стали виведені формули для оцінки часів стабілізації вирівнювальних систем в динамічному відношенні при дії збурень заготовок різного роду. Встановлено, що динамічна швидкодія вирівнювальних систем прямо пропорційна інерційним властивостям і обернено пропорційна до коефіцієнту різання, який визначає вплив товщини різання (в загальному випадку змінної) на динаміку процесу.
11. Дослідження, що містяться в роботі, доповнені пропозиціями щодо охорони праці (зокрема, роботи з електроприводами) і заходами з безпеки життєдіяльності.

## Перелік посилань

1. Кузнецов, Ю.М. Теорія технічних систем /Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, С.А. Дубиняк. – К. – Тернопіль, 1997. – 310с.
2. Егоров, М.Е. Технология машиностроения /М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, В.Л. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1976. – 535с.
3. Кузнецов Ю.М. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах/ Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин [Текст] - К.: - Тернопіль: Тернограф, 2011. -692с.
4. Нагорняк, С.Г. Предохранительные механизмы металлообрабатывающего оборудования: Справочник / С.Г.Нагорняк, И.В. Луцив–Тэхника, 1992. -72с.
5. Балакшин, Б.С. Основы технологи машиностроения /Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 561с.
6. Маталин, А.А. Технология машиностроения /А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496с.
7. Пуш, В.Э. Конструирование металлорежущих станков /В.Э. Пуш. – М.: Машиностроение, 1977. – 561с.
8. Металлорежущие станки: Учебник /В.Э.Пуш и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 575с.
9. Детали и механизмы металлорежущих станков. Под ред. Д.Н.Решетова. В 2-х т. – М.: Машиностроение, 1970.
10. Родин, П.Р. Металлорежущие инструменты: Учебник /П.Р. Родин. 3-е изд. – К.: Выща шк., 1986. – 455с.
11. Барановский, Ю.В. Режимы резания металлов: Справочник /Ю.В. Барановский. – М.: Машиностроение, 1972. – 408с.
12. 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.

13. Луців І.В. Оцінка впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення на точність оброблюваних циліндричних поверхонь / Луців І.В., Волошин В.Н., Буховець В.М. // ВісникНУ «Львівськаполітехніка». Зб. наук. праць. – 2016. – № 839. С. 80–85.

14. Кузнецов Ю.М. Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки/ Ю.Н. Кузнецов, О.И. Драчев, И.В. Луцив, А.В. Шевченко, В.Н. Волошин [Текст] – Старый Оскол: ТНТ, 2014. - 480с.

15. Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення якості згортних втулок/ П.Д. Кривий, А.А. Сеник [Текст] - Тернопіль: ТНТУ, 2019.

16. Кудинов, В.А. Динамика станков /В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359с.

17. Основы технологии машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова. - М.: Машиностроение, 1977. – 416с.

18. Попов В.И. Динамика станков /В.И. Попов, В.И. Локтев. – К.: Техніка, 1975. – 136с.

19. Кузнецов Ю.М. Динамика станочно-инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки/ Ю.Н. Кузнецов, О.И. Драчев, И.В. Луцив, А.В. Шевченко, В.Н. Волошин [Текст] – Старый Оскол: ТНТ, 2015. - 432с.

20. Орликов, М.Л. Динамика станков /М.Л. Кудинов. – Киев: Вища школа, 1980. – 256с.

21. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков /С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199с.

22. Гуляев, А.П. Металловедение /А.П. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1986. – 272с.

23. Горбацевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения /А.Ф. Горбацевич. – Минск: Высшая школа, 1975. – 288с.

24. Паливода, Ю.Є. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник / Ю.Є. Паливода, А.Є.

Дячун, Р.Я. Лещук. - Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. - 240 с.

25. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. /Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986.

26. Маеров, А.Г. Устройство, основы конструирования и расчет металлообрабатывающих станков и автоматических линий: Учебное пособие / А.Г.Маеров. М.: Машиностроение, 1986.

27. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. В 3-х частях. – М.: Машиностроение, 1974.

28. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков /Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208с.

29. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М.: Машиностроение, 1987. – 345с.

30. 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.

31.Луцив, І.В. Аналіз частотними методами динамічної стійкості багатолезової самоналагоджувальної обробки / І.В. Луцив //Вісник Тернопільського державного університету, 1999, т.4, №1 с.97-103.

32. Шанайда, В.В. Пакет MathCADв інженерних розрахунках /В.В. Шанайда. –Тернопіль: вид-во ТДТУ, 2001. – 163с.

33. Кузнецов Ю.М., Скляр Р.А., Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю.М. Кузнецов, Р.А. Скляр; під ред. Ю.М. Кузнецова. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.

34. Луцив, І. Кінематичні особливості багатолезової адаптивної обробки / І.В. Луцив //Вісник Тернопільського державного університету, 1997, т.3, №4 с.107-111.

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

36. Луців І.В. Еволюція конструкційних схем токарного спорядження щодо зменшення пружних деформацій під час оброблення / І.В. Луців, В.М. Буховець, Т.М. Сілярський// Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. Т. 1. – С.73-74.

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

38. 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.