

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній ступінь)

на тему: «Дослідження та аналіз адаптивних методів керування процесами  
механічної обробки на токарних верстатах»  
(комплексна тема)

Виконав: студент (ка) VI курсу, групи КАМ-61

спеціальності (напряму  
підготовки)

151 «Автоматизація

та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва спеціальності (напряму підготовки))

Бабій Т.Ю.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Іванюк О.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Капаціла Ю.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Козбур І.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Чихіра І.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)



Факультет \_\_\_\_\_ прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра \_\_\_\_\_ автоматизації технологічних процесів і виробництв  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Савків В.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня \_\_\_\_\_ магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю \_\_\_\_\_ 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту \_\_\_\_\_ Бабію Тарасу Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. \_\_\_\_\_ «Дослідження та аналіз адаптивних методів керування процесами  
механічної обробки на токарних верстатах»

Керівник роботи \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «23» листопада 2023 року № 4/7-1091

2. Термін подання студентом завершеної роботи \_\_\_\_\_ 28 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: задана траєкторія та характер руху транспортного засобу;  
опис умов роботи; загальні вимоги до алгоритму керування, загальні відомості щодо  
точності позиціонування та допустимих відхилень

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

Аналітична частина. Науково-дослідна частина. Технологічна частина. Конструкторська  
частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

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

Організація системи обробки – 1 аркуш формату А1. Навігаційна

система автоматизованого транспортного засобу – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-  
схема навігатора – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-схема всієї системи – 1 аркуш  
формату А1. Варіанти застосування S-подібних траєкторій – 1 аркуш формату А1.

Результати моделювання траєкторії руху – 1 аркуш формату А1. Варіанти траєкторії  
транспортного засобу – 1 аркуш формату А1.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання 23 листопада 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	25.11.2023	
2	Науково-дослідна частина	30.11.2023	
3	Технологічна частина	05.12.2023	
4	Конструкторська частина	10.12.2023	
5	Спеціальна частина	15.12.2022	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.12.2023	
7	Графічна частина	25.12.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи	28.12.2023	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Бабій Т.Ю.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Капаціла Ю.Б.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Савків В.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Іванюку Олександру Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Дослідження та аналіз адаптивних методів керування процесами механічної обробки на токарних верстатах»

Керівник роботи к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «23» листопада 2023 року № 4/7-1091

2. Термін подання студентом завершеної роботи 28 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: задана траєкторія та характер руху транспортного засобу; опис умов роботи; загальні вимоги до алгоритму керування, загальні відомості щодо точності позиціонування та допустимих відхилень

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

Аналітична частина. Науково-дослідна частина. Технологічна частина. Конструкторська частина. Спеціальна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)  
Приклади маршрутів для різних випадків орієнтації – 1 аркуш формату А1. Навігаційна система автоматизованого транспортного засобу – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-схема навігатора – 1 аркуш формату А2. Функціональна блок-схема всієї системи – 1 аркуш формату А1. Варіанти застосування S-подібних траєкторій – 1 аркуш формату А1. Результати моделювання траєкторії руху – 1 аркуш формату А1. Варіанти траєкторії транспортного засобу – 1 аркуш формату А1.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., старший викладач		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 23 листопада 2023 року \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	25.11.2023	
2	Науково-дослідна частина	30.11.2023	
3	Технологічна частина	05.12.2023	
4	Конструкторська частина	10.12.2023	
5	Спеціальна частина	15.12.2022	
6	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.12.2023	
7	Графічна частина	25.12.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи	28.12.2023	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Іванюк О.В.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Капаціла Ю.Б.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему:

«Дослідження та аналіз адаптивних методів керування процесами механічної обробки на токарних верстатах» студентів групи КАМ-61 Бабій Т.Ю., Іванюк О.В.

Розрахунково-пояснювальна записка: 122 аркушів формату А4, 62 рисунки, 54 формули, 2 таблиці, 19 літературних джерел, графічна частина – 12 аркушів формату А1

Мета роботи: дослідження та аналіз адаптивних методів керування обробкою на токарних верстатах.

Для досягнення поставленої мети виконано завдання:

- вивчено сучасний стан питання, виконано літературний огляд за темою роботи, сформульовано висновки та основні завдання;
- розроблено динамічну модель процесу різання;
- розроблено модель теплопередачі інструменту;
- аналітично виведено рівняння ефективності системи;
- проведено дослідження системних параметрів, що впливають на термін служби інструменту та продуктивність системи в цілому;
- проведено оптимізацію продуктивності системи;
- виконано дослідження інтенсивності зношення інструменту, проведено аналіз отриманих результатів та розглянуто можливість їх застосування для функціонування адаптивної системи керування;
- встановлено, що застосування методу дистанційної термопари і відповідного алгоритму оптимізації дає прийнятні результати з адаптації процесу токарної обробки до умов, які змінюються і підвищення продуктивності процесу і якості обробки в цілому;
- розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Методи виконання роботи: економіко-статистичний, графічний, порівняльний, математичного моделювання; теоретико-емпіричний.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, АЛГОРИТМ, РІЗАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, РІЗАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	10
1.1 Загальні відомості про адаптивне керування механічною обробкою.....	10
1.2 Огляд виконаних досліджень за темою роботи за літературними та іншими джерелами. ....	15
1.3 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу.....	22
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	25
2.1 Розробки моделі системи обробки.....	25
2.2 Розробка моделі процесу – динаміка різання.....	28
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	34
3.1 Розробка моделі теплопередачі інструменту.....	34
3.2 Системні параметри, що впливають на термін служби інструменту .....	45
3.3 Індекс ефективності .....	56
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	65
4.1 Оптимізація продуктивності системи .....	65
4.2 Метод Понтрягіна для вирішення загальної задачі оптимального керування..	71
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	83
5.1 Програмне забезпечення для моделювання.....	83
5.2 Дослідження швидкості зношення інструменту .....	88
5.3 Альтернативна процедура розрахунку інтенсивності зношення інструменту .	89
5.5 Результати моделювання .....	95
6 ОХОРОНА ПРАЦІ БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	114
6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ .....	114
6.1.1 Навчання з питань охорони праці.....	114
6.1.2 Характеристика небезпечних зон обладнання і розробка заходів безпеки..	117
6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	121
6.2.1 Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	121
6.2.2 Оцінка інженерної і пожежної обстановки у надзвичайних ситуаціях .....	123
ВИСНОВКИ.....	125
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	126



## ВСТУП

Важливим завданням сучасного виробництва є автоматизація технологічних процесів на основі широкого використання металорізальних верстатів з ЧПК. Одним з шляхів підвищення ефективності роботи такого обладнання є створення адаптивних систем керування процесом оброблення, які отримують поточну інформацію про стан процесу різання та здійснюють відповідний керуючий вплив.

Ця кваліфікаційна робота присвячена дослідженню адаптивних методів керування до операції механічної обробки з метою підвищення економічної ефективності. Процес обробки, який досліджується, є токарною операцією на верстаті з ЧПК загального призначення. Оскільки контроль над витратами через контроль процесів є метою, продуктивність буде залежати від швидкості зношування інструменту та кількості матеріалу, що зрізається за одиницю часу, що зазвичай позначається як швидкість видалення металу. Вибір цього індексу ефективності також ґрунтується на поточному стані датчика, а також технології, яка використовує дистанційні засоби для вимірювання якості поверхні або точності.

Основними компонентами системи є робочий матеріал і інструментальне оснащення, причому інструментальне оснащення є основним компонентом.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Загальні відомості про адаптивне керування механічною обробкою

Однією з найважливіших характеристик середовища механічної обробки є його зміна з часом. Приблизно 98 % енергії, що подається на токарний верстат, перетворюється на теплову енергію в процесі різання. Теплова енергія, що виділяється внаслідок процесу тертя на інструменті, поверхні заготовки і стружки, в процесі різання виступає джерелом енергії в системі, впливаючи на фізичні властивості інструменту та робочого матеріалу. В більшості ситуацій різання сам робочий матеріал є джерелом змін через свій гетерогенний хімічний склад. Наприклад, випадково вибираючи будь-які дві ділянки сталеві заготовки, малоймовірно, що їх склад будуть абсолютно однаковими. Це викликає зміну твердості матеріалу та/або міцності на зсув. Через цю невідповідність виникають певні зони, які можуть спричинити поломку інструменту або, принаймні, його надмірне, так що потрібно зменшити швидкість різання або подачу. Іншим джерелом зміни обробки є початковий розмір деталі. Діаметр заготовки може змінюватися залежно від довжини, тому необхідно виконувати безперервне регулювання. Зношення інструменту також спричиняє велику кількість варіацій у процесі обробки. З часом і інструмент зношується, сили різання та енергоспоживання інструменту змінюються, а глибина різання зменшується від початкового значення. Останнє є важливим фактором, коли критерієм є допуск на точність. Ще одна зміна, з яку потрібно враховувати зі збільшенням часу обробки, це зменшення діаметра заготовки та, як наслідок, її жорсткості. Жорсткість є важливим критерієм стабільності системи, і якщо швидкість подачі не зменшити до відповідного значення, виникне надмірне відхилення заготовки та вібрація.

Ці зміни є лише деякими з тих, які можливі при токарній обробці. Загалом джерела змін залежатимуть від конкретної роботи, яка виконується.

Методика, обрана для керування системою обробки, повинна працювати в обраному системному середовищі, а також задовольняти вимоги до продуктивності системи. Методи відкритого та замкнутого циклу є найбільш

часто використовуваними методами керування в позиційних та сервосистемах.

При управлінні з відкритим контуром вхід системи пов'язаний з виходом деякою функцією підсилення або передачі. Система із замкнутим контуром використовує сигнал зворотного зв'язку з виходу, який порівнюється з опорним входом для генерації сигналу помилки, пропорційного різниці між входом і виходом.

Потім сигнал помилки зв'язується з виходом передаточною функцією. Обладнання з числовим керуванням зазвичай використовує цей принцип (рис. 1) для керування положенням.

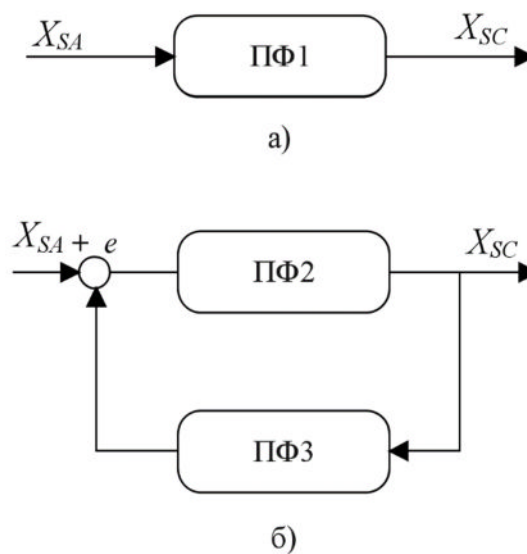


Рисунок 1 – Види систем:

а) – система відкритого циклу; б) – система замкнутого циклу

$X_{SC}$  – базова команда або опорна позиція (координата X);  $X_{SA}$  – фактична команда або опорна позиція;  $e$  – похибка  $e = X_{SC} - X_{SA}$ ; ПФ1 – передаточна функція, що пов'язує базове положення та фактичне положення; ПФ2 – передаточна функція, що пов'язує сигнал похибки з фактичним положенням; ПФ3 – передаточна функція, яка пов'язує вихідний сигнал з фактичним положенням

Підсилювачі, перетворювачі, пристрої для подавлення шумів тощо, будуть включені в реальну систему і повинні бути додані до основних схем, зображених на рис. 1. В системі, де зв'язок вхід-вихід відомий і фіксований, керування з відкритим контуром є задовільним. Коли співвідношення змінюється з часом,

використовується замкнутий цикл керування.

Якщо відома функціональна залежність від часу, замкнуту систему можна математично перетворити на розімкнену за допомогою регулятора (тобто пропорційного, інтегрального тощо). Усі системи, які використовують ці основні режими керування, мають одну спільну характеристику.

Оптимальне вхідне значення системи є відомим і постійним (або, якщо воно змінюється з часом, зв'язок відомий), так що можна безпосередньо або за допомогою контролера отримати оптимальне вихідне значення. В процесі обробки системне середовище постійно змінюється, і тому оптимальні вхідні значення постійно змінюються.

Система змінюється не лише як функція часу, але також як функція температури, властивостей матеріалу тощо. Ці функції зазвичай невідомі та часто є випадковими, як у випадку зон в заготовці, твердість яких відрізняється від решти матеріалу. Протягом багатьох років вибір швидкості обертання шпинделя та швидкості переміщення інструменту визначався емпірично, на основі поєднання досвіду та довідкових даних. Однак у стохастичному середовищі не можна очікувати, що ці методи дадуть оптимальні результати. Таким чином, необхідна така методика контролю, яка діє в середовищі, що змінюється в часі, зміни якого не можна передбачити, і який компенсує зміни навколишнього середовища шляхом моніторингу власної реакції для досягнення оптимальної продуктивності.

Принципом управління, яка потенційно пропонує вирішення цієї проблеми, є адаптивне керування. В цій базовій схемі управління вимірюється деяка змінна процесу, наприклад крутний момент, температура різання або температура інструменту, і використовується для регулювання швидкості обертання шпинделя або швидкості подачі в операції обробки. Вважається також, що адаптивне керування швидкістю чи подачею здатне оптимізувати продуктивність машини в режимі онлайн.

Основна блок-схема системи адаптивного керування зображена на рисунку 2. Сигнали від змінних процесу, контролера та вхідних команд надсилаються до адаптивного контролера, який обчислює загальну продуктивність системи.

Оптимальне значення продуктивності постійно шукається за допомогою відповідної техніки оптимізації. Результатом цієї оптимізації є нові оптимальні значення для входів керування, швидкості обертання шпинделя та швидкості подачі. Тоді контролер функціонує, постійно адаптуючись до змін у характеристиках інструменту та робочого матеріалу шляхом скидання швидкості та подачі для підтримки оптимальної продуктивності.

Після визначення проблеми ідентифікації типу середовища та вибору способу керування, проблема зводиться до пошуку взаємозв'язків, які регулюють форму передатних функцій кожного з блоків на рис. 2. Експериментальні та емпіричні дані щодо динаміки різання, взаємозв'язки інструмент-термін служби, термодинаміка інструменту, взаємозв'язок інструмента і зношення, фізичні характеристики матеріалу повинні бути систематизовані та досліджені для отримання необхідної інформації. Оскільки адаптивне управління є відносно новою галуззю, яка мало описана в літературі, зв'язок та інтеграція вищезазначеного матеріалу для створення ефективного проектування системи викликає певні труднощі.

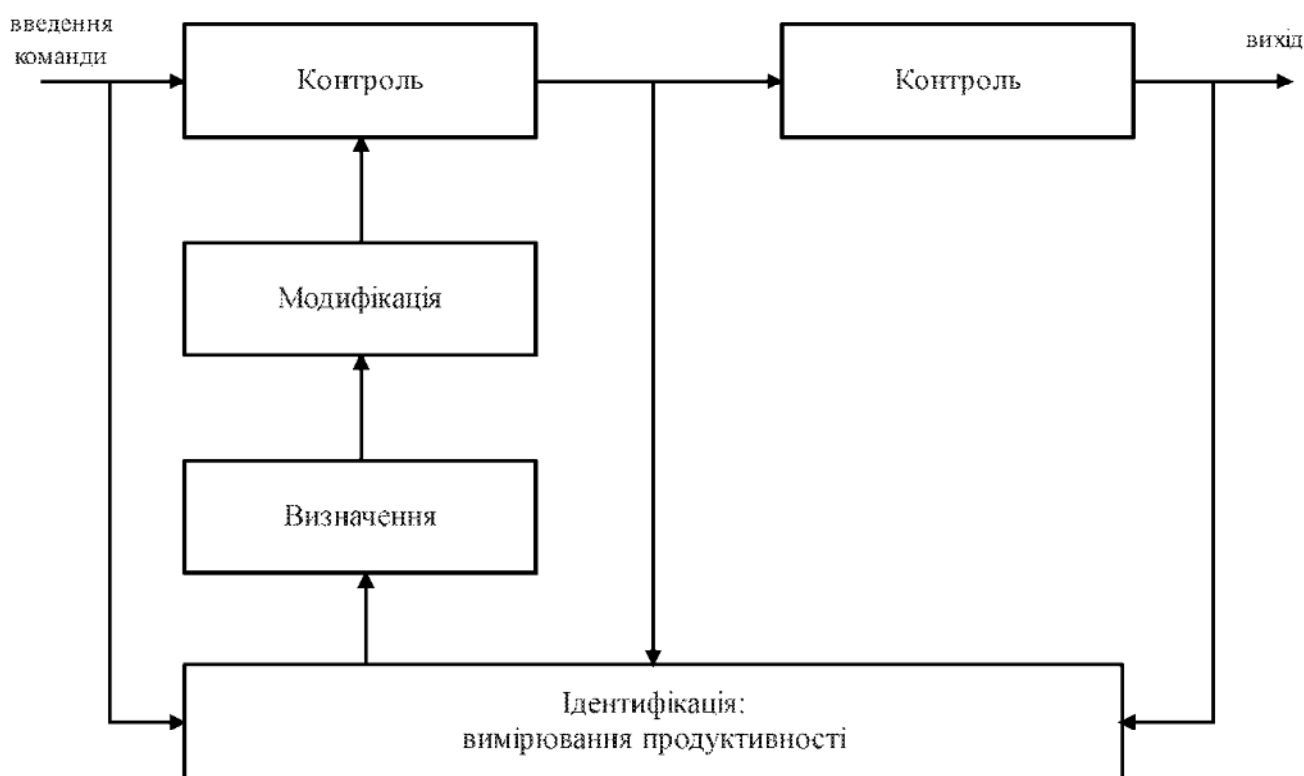


Рисунок 2 – Адаптивно керована система

Крім організаційних проблем, існують інші невирішені питання в системному проектуванні. Ці питання можна умовно розділити на дві категорії.

1. Проблеми з датчиком – багато проблем при вимірюванні параметрів процесу залишаються невирішеними. В першу чергу виникає проблема прийняття рішення про те, яку зі змінних вимірювати. Необхідно визначити, яка зі змінних процесу найкраще вказує на системний критерій, який потрібно виміряти. Це може відрізнятись залежно від матеріалів і операцій. В одному випадку температура вершини інструмента може дати найкращий результат, тоді як в іншому випадку зусилля різання на інструменті будуть найбільш корисними. Якщо зношення інструменту є критерієм ефективності, слід виміряти температуру інструменту в деякій віддаленій точці на інструменті, оскільки останні дослідження показали певну залежність між температурою інструменту та зношенням інструменту, особливо кратерним зношенням. Це здається логічним, оскільки в міру збільшення зношення інструменту поверхня стружки наближається до нижньої поверхні інструменту, і площа входу теплового потоку, яка є площею контакту на межі поділу інструмент-стружка, збільшується, викликаючи підвищення температури на нижній поверхні. Вибір змінних для вимірювання сильно обмежений поточним станом вимірювальної техніки.

В даний час не існує ефективних датчиків, які б могли одночасно вимірювати температуру і силу. Крім того, поки що немає ефективних засобів, які дозволяють однозначно пов'язати такі показники, як температура, якість обробки поверхні та зношення інструменту в практичній діяльності.

2. Методики обмеженого контролю. Сьогодні найбільш часто використовувані методи оптимізації реалізуються двома основними методами: метод проб і помилок і градієнтний метод. Незважаючи на те, що ці методи (та їх варіації) дуже розвинені, обмеження, накладені через відсутність доступних датчиків, обмежують їх застосування до проблеми обробки.

Існуючі методи оптимізації базуються на поступових змінах швидкості або подачі, які діють як невеликі крокові зміни поточних значень керуючих вхідних даних. Такі зміни обмежуються за своїм розміром і часовим інтервалом між ними

швидкістю і точністю використовуваного устаткування. В дуже динамічному процесі, наприклад, високошвидкісна обробка, затримка між вимірюваннями може бути занадто великою або розмір кроку може бути занадто великим, щоб врахувати процес, що швидко змінюється, що спричиняє неефективність оптимізації та робить систему нестабільною.

Одним з методів оптимізації, який дозволить вирішити цю проблему і базується на сучасних методах функції стану, називається принципом максимуму Понтрягіна.

Теоретичне застосування цієї методики розглянуто в наступних частинах роботи. Також в наступних частинах роботи будуть розглянуті деякі з сучасних застосувань адаптивного управління, потім будуть визначені параметри процесу та критерії системи, а також досліджені різні методи оптимізації. Спеціальна частина містить комп'ютерну модель адаптивної системи керування процесом обробки на токарному верстаті.

## **1.2 Огляд виконаних досліджень за темою роботи за літературними та іншими джерелами.**

Ця частина містить огляд деяких опублікованих досліджень щодо практичного застосування адаптивного керування. Інша література, яка стосується цієї теми, цитується пізніше у відповідних частинах кваліфікаційної роботи.

Щоб урівноважити будь-які протилежні висновки, які можна зробити на основі ранніх застосувань і результатів, у кінці цієї частини включено деякі з останніх досліджень щодо контролю температури.

Загалом питання застосування адаптивного керування в літературі висвітлено достатньо повно, кожна публікація присвячена, як правило, розгляду конкретного вузького питання. Є звичайно матеріали з теорії адаптивного керування в цілому, де розглядаються загальні принципи, теоретичні основи і аспекти практичного застосування адаптивного керування. В межах цієї роботи ці

відомості приймаються як загальновідомі і літературний огляд проведено лише за джерелами, в яких містяться результати, що безпосередньо стосуються теми кваліфікаційної роботи.

Проблемою адаптивного керування процесами механічного оброблення в свій час займалася велика кількість науковців, інженерів, науково-дослідних лабораторій, установ та організацій як в нашій країні, так і за її межами.

Однією з таких організацій є американська виробничо-технічна компанія Bendix, яка проводила дослідження в сфері застосування адаптивного керування для фрезерних верстатів з числовим керуванням.

Цілі дослідження були подвійними: по-перше, розробити детальну концепцію застосування адаптивного керування до фрезерних верстатів з числовим програмним керуванням; по-друге, оцінити здійсненність концепції за допомогою розробки конструкції, і випробування адаптивної системи управління.

Проект був розділений на чотири окремі етапи:

- 1) детальне вивчення всіх аспектів адаптивного контролера;
- 2) розробка та перевірка компонентів і підсистем;
- 3) складання, випробування, модифікація системи;
- 4) оцінка системи.

Перший етап включав дослідження та аналіз основних областей систем, процесу фрезерування та адаптивної системи керування. В результаті досліджень було зроблено висновок, що чотирма основними факторами ефективності фрезерування є швидкість зняття металу, стійкість інструменту, обробка поверхні та точність розмірів. Далі була зроблена безуспішна спроба пов'язати ці величини з контрольованими вхідними змінними, швидкістю та подачею, щоб отримати модель процесу. Це пояснюється проблемами з датчиком і неможливістю співвіднести вимірювані вихідні змінні з бажаними змінними оцінки ефективності. В результаті було вирішено вимірювати крутний момент шпинделя, температуру вершини та вібрацію інструменту як змінні процесу, які мають бути пов'язані у функції продуктивності, яку потім можна використати для оцінки та оптимізації.

Коригування швидкості та подачі використовувалися для отримання



оптимального індексу продуктивності в процедурі оптимізації пошуку, що називається модифікованим методом найкрутішого підйому. Згодом було випробувано та оцінено різні методи пошуку, такі як модифікований метод проб і помилок.

Щоб гарантувати, що прийнятий принцип керування системою не призведе до умов різання, які порушують необхідні показники якості продукту, були встановлені обмеження на вхідні параметри, а також вихідні змінні, які вимірюються. Наприклад, максимальне значення, визначене з емпіричних даних, було встановлено для швидкості та подачі для отримання зазначеної якості поверхні; і мінімальне обмеження було накладене на ці змінні для отримання необхідної швидкості видалення матеріалу (продуктивності). Граничні значення часу та температури, визначені емпірично, які вказували на загрозу поломки інструменту, а також максимальне значення зношення бічної частини, використовувалися як обмеження.

Проект Bendix продемонстрував ефективне застосування адаптивних методів керування, навіть якщо прототип системи не задовольняв визначення ідеального адаптивного керування. Він також дозволив виявити такі проблемні області, які все ще заважають розробці цієї схеми контролю:

1. Адаптивне керування обмежене неможливістю враховувати змінні процесу, які корелюють з продуктивністю, а також неточністю (через шум, неадекватну конструкцію тощо) наявних датчиків.

2. Незважаючи на те, що температура була включена як одна зі змінних процесу, яка вимірювалася для визначення продуктивності, в остаточному прототипі системи термопара інструментального датчика не показала адекватної індикації ступеню зношення інструменту, і була виключена з моделі через ненадійність використання термопари у виробничих середовищах.

Аналогічні дослідження проводились компанією Cincinnati Milling Machine Company. Її розробки в багатьох аспектах схожі з дослідницьким проектом Bendix, стосуються дослідження адаптивного керування процесом фрезерування, в якому двома керуючими змінними є швидкість і подача.

Разом з тим є декілька суттєвих відмінностей від проекту Bendix. Однією з

важливих відмінностей в адаптивному керуванні, яке було розроблено є те, що температура не використовується як параметр процесу, оскільки вважалося, що температуру неможливо точно виміряти в виробничому середовищі. Таке припущення головним чином базувалося на тому, що в кращому випадку можна виміряти лише середню температуру інструменту, а змінні умови різання, які впливають на калібрування датчика не враховуються. Проведені дослідження виявили величину зворотного зв'язку, що складається з вимірювань крутного моменту інструменту та датчика відхилення, чия відносна реакція на наші п'ять змінних процесу має той самий порядок величини, що і їх відповідний вплив на швидкість різання за постійного ресурсу інструменту. Ці п'ять змінних процесу були задані як: 1) ширина різання; 2) глибина різання; 3) зношення інструменту; 4) твердість заготовки; 5) жорсткість інструменту і заготовки.

В якості цільової функції була прийнята вартість обробки. Потім була взята похідна функції відносно швидкості шпинделя, щоб отримати оптимальне значення швидкості шпинделя для заданого набору умов різання. Відповідним чином це значення було пов'язане з крутним моментом шпинделя та прогином, щоб знайти їх оптимальні значення. Величина «зворотного зв'язку», згадана раніше, потім порівнювалася з оптимальними значеннями крутного моменту та прогину для підтримки оптимальної продуктивності.

Автоматичний контроль температури різального інструменту досліджувався A/C Machining. Ними було розроблено автоматичну систему контролю температури для дослідження температури інструменту як датчика адаптивного контролю. Їх рішення використовувати температуру різального інструменту як датчик ґрунтувалося на тому, що температура різального інструменту є однією з найбільш широко досліджуваних тем у різанні металу, як аналітично, так і експериментально; крім того, температура різального інструменту, як відомо, прямо корелює з терміном служби інструменту. Було проведено дослідження використання температури різального інструменту як датчика в складних адаптивних системах керування було, а також використання цього датчика в системі автоматичного керування з метою підтримки постійної температури різального інструменту шляхом зміни швидкості різання.

Дослідження містить теоретичне обґрунтування моделі на основі лінійної теорії керування, так і аналіз компонентів, що становлять прототип системи. Системні вимоги були визначені як: 1) стаціонарна точність; 2) мінімальний час для перехідного реагування на зміну умов різання; 3) адаптованість засобів керування та приладів до процесу обробки.

Здатність системи підтримувати постійну температуру під час різання має першочергове значення. При високих температурах різання час, необхідний для зміни небажаного значення на коректне значення температури, важливий, оскільки термін служби інструменту в цьому діапазоні експлуатації може сильно залежати від температури.

Результати та висновки дослідження допомагають проілюструвати проблеми, пов'язані з термопарою інструментального датчика.

1. Час реагування на зміну температури становить від 8 до 10 с.

2. Важлива характеристика термопари, що робить її використання непрактичним в виробничих умовах, полягає в тому, що інструмент не повинен від'єднуватися від заготовки. Якщо це відбувається, утворюється розрив ланцюга, що спричиняє проблеми з приладами, які неможливо легко вирішити.

3. Сигнал, отриманий від термопари, характеризується високим рівнем «шумів». Рівень шумів можна виправити за допомогою фільтра, однак це додає ще одну затримку в системі.

Важливість температури в механічній обробці досліджувалась протягом багатьох років. Температура вершини інструменту є прямим показником рівня енергії процесу різання; а також суттєво впливає на термін служби інструменту та зношення інструменту.

З цих причин важко уявити ефективну систему керування обробкою, яка не використовує цю змінну процесу. З аналізу попереднього матеріалу можна побачити, що температура не змогла дати адекватну індикацію стану системи або зношення інструменту, техніка вимірювання температури є неточною і непридатною для такого динамічного процесу. Через важливість цієї змінної та нездатність термопари інструментального блоку точно вимірювати температуру дослідження продовжуються. Було запропоновано багато альтернативних

підходів.

Вже кілька років експериментальна техніка, що включає рухомий фотопровідний детектор інфрачервоного випромінювання, який сканує бокову поверхню інструменту під час різання, досліджується в лабораторії різання металу в Університеті Іллінойсу. Інший метод, який називається технікою віддаленої термопари, привернув значну увагу в університеті Lehi. Призначення термопари полягає в тому, щоб використовувати тепло, що виділяється на поверхні різання для створення сигналу напруги, пропорційного температурі в бажаній точці на нижній поверхні пластини інструменту.

В статті, опублікованій М. Р. Groover і G. E. Kane, була розроблена схема для вимірювання температури вершині інструменту, що базується на використанні стандартних термопар, розташованих в певній точці інструменту, віддаленій від різальної кромки. Відмінною рисою дослідження було використання двох термопар для оцінки температури стружки інструменту. Їх робота включала два етапи: моделювання процесу теплообміну різального інструменту на ЕОМ і стосувався перевірка результатів комп'ютерного моделювання токарної операції. Розроблена ними модель базувалася на методі скінченних різниць, розв'язку рівняння з використанням граничних умов, які представляли фізичну конфігурацію різального інструменту та тримача пластинчастого типу. Вони виявили, що температуру вершини інструмента можна оцінити за допомогою рівняння виду

$$T_o = aT_1 + b \frac{dT_1}{dt} - cT_2.$$

Константи  $a$ ,  $b$  і  $c$  можна визначити емпірично, а розташування температур  $T_1$  і  $T_2$  зображено на рисунку 3.

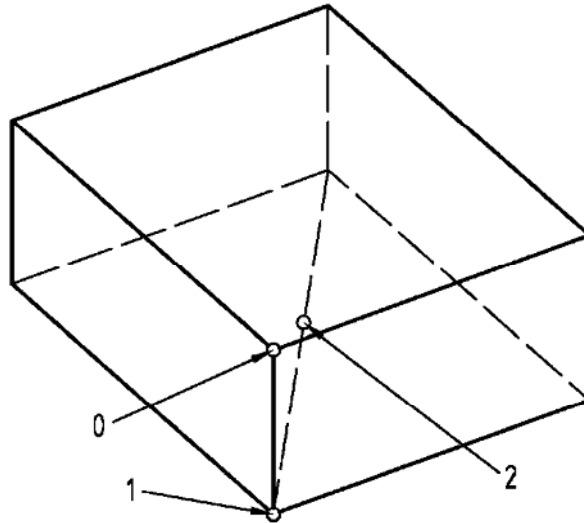


Рисунок 3 – Інструментальна вставка

В своїх висновках автори заявили, що вони знайшли техніку дистанційної термопари відносно нечутливою до змін матеріалу інструменту та робочого матеріалу.

Подальші дослідження були проведені за такими напрямками.

1. Розробка точної моделі процесу теплообміну між температурою вершини інструменту та віддаленим розташуванням інструменту, яка включає вплив зношення інструменту.

2. Порівняння температури віддаленого інструменту з такими змінними процесу, як зношення інструменту.

Кінцевою метою всіх цих досліджень є включення температури інструменту в схему адаптивного керування.

В Україні дослідженнями адаптивних систем керування верстатами займалися цілий ряд науковців і організацій.

Авторами Петраков Ю. В. та Мацківський О. С. була розроблена адаптивна система управління верстатами з ЧПК. Цей проект мав назву «Adaptive control system for CNC machine tools».

В Івано-Франківському національному університеті нафти і газу колективом авторів Б.Д. Сторож, Я.Б. Сторож, Я.М. Кулик було проведено комплекс робіт з дослідження процесу стружкоутворення і використання сучасних методик і засобів для розв'язання задач теорії різання методом скінченно-елементного аналізу.

Антоненко Я. С. (Донбаська державна машинобудівна академія) проводила дослідження методів точності важких токарних верстатів. Нею зокрема запропоновано адаптивну систему управління, що дозволяє компенсувати пружні деформації всіх елементів технологічної системи, що виникають під дією сил різання, а також теплові деформації, викликані зміною температури після початку процесу оброблення.

І.Є.Ткачук, Т.Є. Божко, В.Д. Рудь (Луцький національний технічний університет) проводили дослідження теплових потоків в зоні різання. Ними встановлено зв'язок між параметрами режимів різання при шліфуванні і контактною температурою в зоні різання, та побудовано графічні залежності.

Серед вітчизняних розробок можна знайти також немало інформації стосовно досліджень закономірностей зношування інструменту в процесі різання, розроблення методів діагностики стану різального інструменту, вибору режимів різання, що забезпечують мінімальне зношення різального інструменту.

В Україні продовжуються роботи з дослідження фізики процесу різання (Запоріжжя, Київ, Харків, Хмельницький), вивчення напруженого стану в різальному інструменті (Запоріжжя, Київ, Суми, Харків, Хмельницький), створення теоретичних моделей зношення різального інструменту (Хмельницький), комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються при різанні матеріалів (Київ, Суми, Одеса, Харків, Хмельницький), розроблення та вдосконалення систем числового програмного керування обладнанням (Запоріжжя, Київ, Харків, Одеса, Хмельницький).

Ці та інші дослідження були проведені як в Україні, так і за її межами і можуть бути корисними для розвитку адаптивних систем керування верстатами.

### **1.3 Висновки та постановка задачі на кваліфікаційну роботу**

Адаптивні системи керування металорізальним обладнанням широко використовуються для автоматизації процесів обробки. Ці системи включають в себе різноманітні сенсори, які збирають дані про оброблюваний матеріал, а також

програмне забезпечення, яке аналізує ці дані і керує різальним обладнанням для досягнення оптимальних результатів.

Основні переваги адаптивних систем керування металорізальним обладнанням:

- системи здатні адаптуватись до змін у матеріалі та умовах обробки, що дозволяє досягати високої точності обробки;
- завдяки аналізу даних і постійному коригуванню параметрів обробки, системи забезпечують оптимальне використання різального інструменту та матеріалів;
- адаптивні системи дозволяють уникати надмірного зношення інструментів та зменшують кількість відходів матеріалу;
- швидке реагування на зміни дозволяє збільшити продуктивність обладнання та знизити час простою.

Адаптивні системи керування металорізальним обладнанням можуть бути використані в різних галузях промисловості, де важливо забезпечити високу якість обробки.

Питання розроблення, дослідження та практичного застосування опрацьовані достатньо повно, проте необхідні додаткові дослідження, які можуть бути спрямовані на такі аспекти.

Оптимізація алгоритмів керування. Дослідження можуть включати оптимізацію алгоритмів керування металорізальним обладнанням з метою підвищення точності та продуктивності обробки металу.

Використання штучного інтелекту. Дослідження можуть спрямовуватися на використання методів штучного інтелекту для автоматичного адаптивного керування процесами обробки.

Дослідження нових матеріалів. В контексті адаптивних систем керування важливим є дослідження властивостей нових матеріалів та розробка адаптивних стратегій обробки для їх оптимального використання.

Ергономіка та безпека. Додаткові дослідження можуть зосереджуватися на вдосконаленні систем керування з метою покращення умов праці операторів, а також підвищення рівня безпеки обробки металу.

Ці напрями досліджень можуть сприяти подальшому розвитку адаптивних систем керування металорізальним обладнанням та забезпеченню їх ефективного практичного застосування в промисловості.



## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розробки моделі системи обробки

Ця частина кваліфікаційної роботи присвячена визначенню характеристик, які пов'язують вхідні та вихідні дані на рисунку 2. Організація запропонованої системи обробки показана на рисунку 4. Основна мета системи полягає в підтримці оптимального замкнутого контуру управління процесом різання. Це робиться з використанням постійного регулювання швидкості обертання шпинделя та швидкості подачі різця для досягнення оптимальної продуктивності.

Короткий опис діаграми, зображеної на рисунку 4, допоможе представити функції кожного з блоків і загальний потік сигналів у системі.

Спочатку буде описано процес, оскільки важливо знати, що потрібно контролювати. Процес різання в основному є процесом деформації зсуву.

Енергія, яка споживається за одиницю часу або, іншими словами, потужність, є добутком сили різання та швидкості:

$$P = F_c V_s. \quad (1)$$

Якщо потужність розділити на об'єм матеріалу, отримаємо питому енергію, тобто енергію одиниці об'єму видаленого металу.

$$U = \frac{P}{bt_w V} = \frac{F_c V_s}{bt_w V_s} = \frac{F_c}{bt_w};$$

де  $F_c$  — сила різання, перпендикулярна площині різання;

$V_s$  — частота обертання шпинделя;

$b$  — ширина різання;

$t_w$  — глибина різання.

Загальна питома енергія в першу чергу споживається як питома енергія,

необхідна для руйнування заготовки при зсуві, і як питома енергія тертя, яка утворюється під час ковзання стружки по поверхні інструменту.

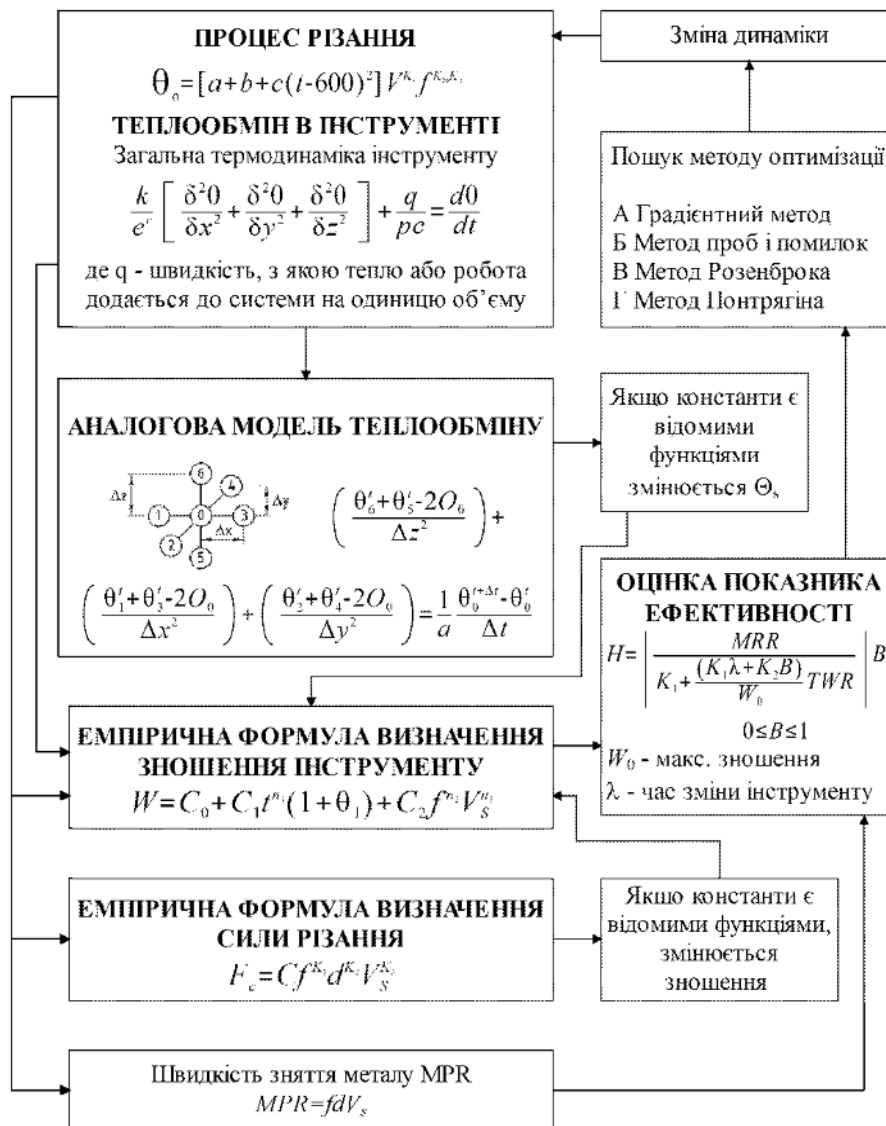


Рисунок 4 – Організація системи обробки

В будь-якому процесі чи системі головне значення мають узагальнені координати, які однозначно визначають положення системи, оскільки вони потрібні для розрахунку рівня енергії системи. В процесі різання енергія перетворюється на тепло, тому температура є важливим показником. Наприклад, якщо ми знаємо температуру на межі інструмент-датчик і розподіл температури в інструменті, можна оцінити процес передачі енергії від заготовки через інструмент. Цей процес описується рівнянням Фур'є, щоб теоретично можна було визначити температуру та рівень енергії в будь-якій точці інструменту.

Якщо припустити, що було обчислено або виміряно температуру процесу різання, ці значення та миттєві значення швидкості шпинделя, швидкості подачі та глибини різання вводяться в блоки, які пов'язують ці змінні з попередньо визначеними параметрами системи. Вибір цих параметрів залежить від різних операцій.

Вони базуються на таких критеріях, як швидкість обробки, вартість, допуск на точність або якість поверхні. Змодельована система, яка розробляється в цій роботі, використовує швидкість видалення металу та швидкість зношення інструменту як параметри.

Конттури зворотного зв'язку, показані на рисунку 4, є вхідною інформацією для виведення рівняння швидкості зношення інструменту.

Причини зношування інструменту різні, і тому переважні змінні, що сприяють кожній формі зношування, відрізняються. Хоча інформаційні цикли не використовувалися в змодельованій системі, запропонована ідея полягала б у виявленні змін у змінних процесу, щоб можна було визначити тип зношування та використати відповідне рівняння швидкості зношення.

Швидкість видалення металу та швидкість зношення інструменту надсилаються до блоку, який об'єднує їх у співвідношенні, що визначає індекс ефективності. Індекс ефективності оцінюється, а потім оптимізується. Розглядалися два типи методів оптимізації: процедури пошуку та методики варіаційного обчислення.

Різниця між цими двома типами буде пояснена далі. Процедура оптимізації обчислює необхідні прирости швидкості шпинделя та швидкості подачі, які додаються до останніх значень цих керуючих змінних, і ці нові значення вводяться в токарний верстат.

В реальній фізичній системі необхідно встановити зв'язок між вихідними сигналами датчика, вхідними сигналами команд і фактичними змінними, щоб визначити часову реакцію (затримку) змінної на сигнал. Затримка залежатиме від конструкції використовуваної машини та шуму сигналу, який створюється під час роботи.

Тут коротко описано функції кожного блоку; далі буде проаналізовано їхні

характеристики та визначено, як характеристики впливають на функцію передачі кожного з них.

## 2.2 Розробка моделі процесу – динаміка різання

Важливі області розгляду в процесі різання показані на рисунку 5.

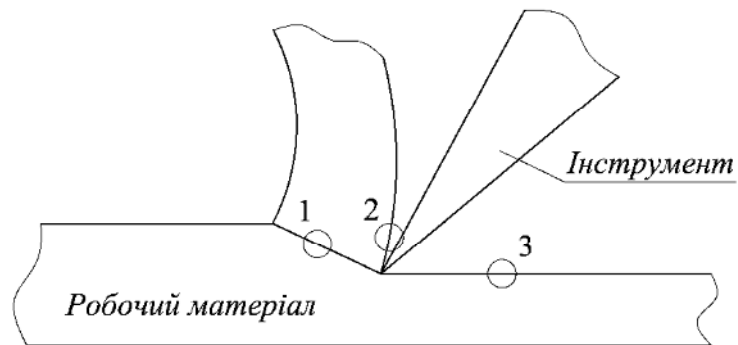


Рисунок 5 – Области розгляду в процесі різання

Характеристики кожної області можна описати таким чином.

Область 1. Ця область називається зоною зсуву, де пластичний потік відокремлює деформований метал від заготовки. Напруження зсуву, що розвивається вздовж площини потоку, значною мірою визначає потужність, яка витрачається на процес різання.

Область 2 – це зона датчика інструменту.

Коли стружка віддаляється від заготовки, вона ковзає по поверхні інструмента, викликаючи тертя та виробляючи тепло. Це призводить до підвищення температури заготовки, що спричиняє термічний зношення.

Область 3 – це оброблена поверхня, характер якої значною мірою визначається умовами двох інших областей.

Щоб визначити взаємозв'язок між змінними, такими як сила різання, температура вершини інструмента, частота обертання шпинделя, подача, глибина різання тощо, звичайною процедурою є розробка емпіричної формули на основі даних, отриманих за бажаних умов різання.

З цієї причини так само важливо розуміти методи підгонки кривих, як і

теорію механіки різання. Перевага емпіричної формули полягає в тому, що ми можемо пов'язати доступні змінні процесу або ті змінні, які можна виміряти. Більшість теоретично розроблених формул базується на таких величинах, як напруження зсуву, недеформована товщина стружки, недеформований кут зсуву тощо, які важко визначити експериментально.

Сила різання, перпендикулярна торцю інструменту, визначається із залежності

$$F_c = \frac{tb\tau \cos(\beta - \alpha)}{\sin \theta \cos(\theta + \beta - \alpha)},$$

де  $\tau$  – напруження зсуву в площині зсуву;

$t$  – товщина недеформованої стружки;

$b$  – ширина зрізу;

$\theta$  – недеформований кут зсуву;

$\beta$  – кут між рівнодійною силою і нормаллю до нахилу передньої поверхні або кут тертя;

$\alpha$  – передній кут інструменту.

Виведення цієї формули базується на таких умовах:

- 1) ідеальне ортогональне різання з постійною швидкістю;
- 2) прийнята глибина різання призводить до утворення суцільної стружки;
- 3) відсутні зусилля на бічних поверхнях інструменту;
- 4) поверхня різання плоска;
- 5) стружка не утворюється поперек своєї довжини;
- 6) інструмент ідеально гострий, зношення відсутнє.

Очевидно, що ці умови складно, якщо не неможливо отримати в реальних умовах. Розгляд залежності для визначення сили ілюструє його залежність від напруження зсуву в площині зсуву, недеформованого кута зсуву  $\theta$  і кута тертя.

Зараз неможливо виміряти  $\theta$  і лише наближення кута можна отримати в автономній процедурі, яка базується на теоремі неперервності. Але можна виміряти  $F_c$  і силу, дотичну до поверхні різання,  $F_t$ . Теоретичні формули, розроблені для простого процесу різання, або отримані для навіть більш складних

операцій цінні тим, що вони дають уяву про змінні та форму співвідношень, які визначають бажані умови різання.

Попередні дослідження були основою для визначення необхідних параметрів різання, які використовуються в змодельованій системі.

Кожен аспект операції різання досліджувався теоретично, але формула, що визначає кількість, була визначена емпірично. Наприклад, після досліджень кількох авторів, таких як Турре, було виявлено, що загальна форма співвідношення, яке виражає сили, перпендикулярні та тангенціальні до бічних сторін інструменту та різальної поверхні, була,

$$F = K d^{n_1} f^{n_2} v^{n_3}, \quad (2)$$

де  $n_1$ ,  $n_2$  і  $n_3$  константи, що залежать від робочого матеріалу;

$K$  – постійна величина, що залежить від швидкості, подачі, глибини різання та стану інструменту або ступеня зношення інструменту.

Хоча сила різання не використовувалася як параметр різання в моделі, розробленій в цій роботі, його, безумовно, слід використовувати в складнішій моделі або як вхідні дані процесу, або як визначник зношення, або як обидва значення.

Температура вершини інструмента  $\theta_0$ , є результатом енергії, що вивільняється в процесі зсувного різання на оброблюваному матеріалі та процесу тертя на поверхні розділу інструмент-стружка.

Теоретично, енергія, необхідна для руйнування робочого матеріалу при зсуві, визначається як

$$\mu_s = \frac{F_s V_{sv}}{b t_w V_s} = \frac{A_s V_{sv}}{b t_w V_s} = \frac{V_{sv}}{V_s \sin \theta'}$$

де  $F_s$  – зусилля різання;

$t_w$  – глибина різання;

$V_{sv}$  – швидкість зсуву;

$b$  – завантаження;

$V_s$  – частота обертання шпинделя;

$\theta$  – кут зсуву.

Енергія, що виділяється на межі інструменту, або питома енергія тертя

$$\mu_f = \frac{F_r V_c}{bt_w V_s} = \frac{F_r \sin \theta}{bt_w \cos(\theta - \alpha)},$$

де  $V_c$  – швидкість ковзання стружки по інструменту

$F_r$  – сила тертя;

$\alpha$  – передній кут інструменту.

Температура вершини інструменту не є постійною, а розподілена по довжині контакту інструменту, як показано на рисунку 6. В більш складній моделі процесу теплопередачі замість середньої температури можна використовувати фактичний розподіл температури.

З експериментальних даних було визначено таке співвідношення між вхідними сигналами керування,  $V_s$ ,  $f$  і температурою вершини інструменту  $\theta_0$ :

$$\theta_0 = KV_s^{n1} f^{n2} d^{n3}. \quad (3)$$

Це рівняння було отримано для випадку незношеного інструменту. В міру зношування різальної поверхні та боків інструменту кількість вивільненої енергії збільшується, що призводить до збільшення  $\theta_0$ . В формулі (3)  $K$  зростатиме разом із зношенням, що також впливає на збільшення кількості вивільненої енергії.

Експериментальні дані вказують на те, що зношення зростає лінійно з часом протягом терміну служби інструменту.

Для врахування зношення інструменту та подальшого підвищення температури. рівняння (3) було модифіковано з використанням співвідношення між зношенням і часом, щоб припустити, що аналогічне співвідношення існує між  $K$  і часом.

Отже:

$$\theta_0 = [A + Bt + C(t - 6)^2]V_s^{n_1} f^{n_2} d^{n_3}, \quad (4)$$

де  $d = \text{const} = 1,5 \text{ мм}$ ;

$A = 355,7$ ;

$B = 0,2$ ;

$C = 1$ ;

$n_1 = 0,107965$ ;

$n_2 = 0,03399$ ;

$n_3 = 0,316$ .

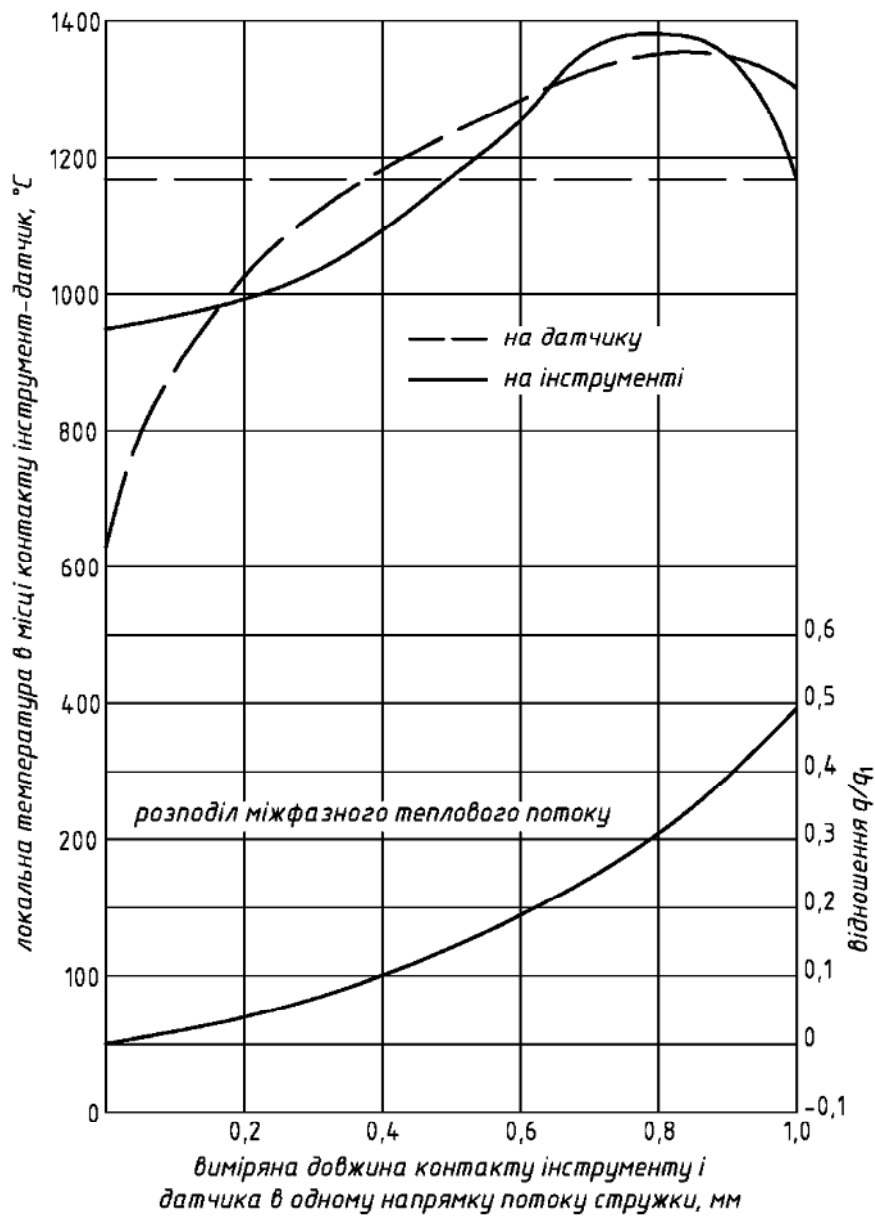


Рисунок 6 – Розподіл теплового потоку та температура на поверхні інструменту



Константи були отримані шляхом взяття натурального логарифму рівняння (3) і визначення значень перетворених змінних  $\ln V$ ,  $\ln f$  і  $\ln d$  за допомогою аналізу лінійної регресії за методом найменших квадратів. Єдиним недоліком емпіричного виразу є те, що для кожного нового робочого матеріалу необхідно знаходити нові константи.

Цю проблему можна вирішити шляхом співставлення  $\theta_0$  з частотою обертання шпинделя, швидкістю подачі та властивістю матеріалу, наприклад міцністю на зсуву або твердістю. Тоді отримане емпіричним шляхом рівняння можна застосовувати в більшому діапазоні операцій різання.

## 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Розробка моделі теплопередачі інструменту

Механіка процесу різання, розглянута в цьому розділі, створює вхідні та вихідні дані, які визначають стан системи. Рівень енергії різання та стан інструменту визначаються через температуру вершини інструмента та розподіл температури через вставку інструменту, тобто, процес теплопередачі визначає стан системи, який необхідно контролювати, і тому є основною проблемою процесу. Теоретична розробка вхідних даних системи насправді не потрібна, оскільки емпіричні співвідношення можна отримати з даних обробки.

Значення динаміки процесу генерації та передачі тепла вже може бути очевидним з обговорення розвитку техніки дистанційного вимірювання температури. Огляд деяких попередніх досліджень і розробок, пов'язаних із температурою при механічній обробці, додатково ілюструє її важливість.

Тейлор був, мабуть, одним із перших, хто підкреслив важливість температури у визначенні терміну служби інструменту. Деякі з найбільш ранніх робіт з проблеми вимірювального інструменту-

Температура вершини інструменту вперше була виміряна приблизно в 1925 році Шором, Готвейном і Гербертом [17], які, працюючи незалежно один від одного, розробили термопару з інструментальним датчиком, яка досі є найбільш часто використовуваною схемою вимірювання температури. Більш поглиблені дослідження розподілу температури на торці інструменту та боках і вплив зношення на розподіл температури були проведені такими відомими дослідниками, як Тригер і Чао, намагаючись додати більше значення значенню середньої температури, що визначається раніше розробленою термопарою з інструментальним датчиком. Інші дослідники намагалися використати поєднання інструмент-термопара в схемі адаптивного керування

Недоліками, які серйозно обмежували таке поєднання в практичній діяльності, були:

- 1) процедура калібрування займає багато часу, і її було б важко виконати

точно та економно в умовах виробництва;

2) калібрований зв'язок дуже чутливий до змін у хімічному складі робочого матеріалу та матеріалу інструменту;

3) поєднання термopара-інструмент-стружка виробляє характерний шумовий сигнал через динамічну природу процесу утворення стружки та періодичне коротке замикання стружки, яка скручується назад до інструменту;

4) точність вимірювань за допомогою термopари знижується при зношенні інструменту.

Як пояснювалося раніше, для подолання цих проблем були запропоновані різні альтернативні схеми, однією з яких був метод дистанційної термopари.

На рисунку 7 показано розташування дистанційних датчиків на різальній пластині.

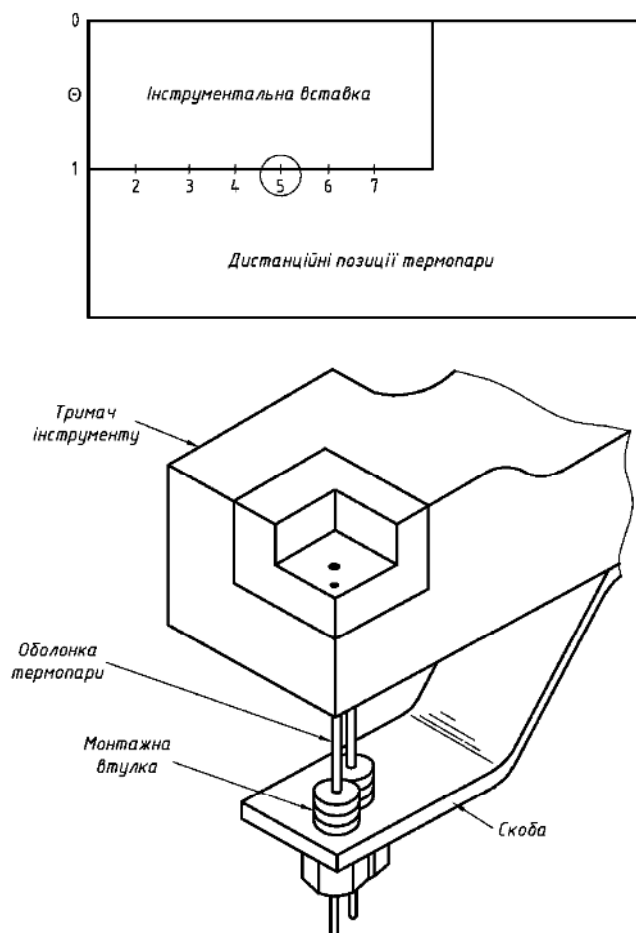


Рисунок 7 – Конструкція інструментальної вставки та тримача

Важливою характеристикою методу дистанційної термopари, є те, що

безумовно існує кореляція між дистанційною температурою та зношенням, яка є лінійною за своєю природою.

Було також пояснено, що таке співвідношення можна очікувати лише тому, що відстань  $\Delta X$  між поверхнею різання та віддаленим місцем вимірювання температури зменшується; і площа підведення енергії  $A$  (площа контакту між датчиком та інструментом) зростає.

Це можна перевірити, застосувавши формулу для передачі тепла шляхом теплопровідності (рис. 8).

$$q_c = -kA \frac{dT}{dX}$$

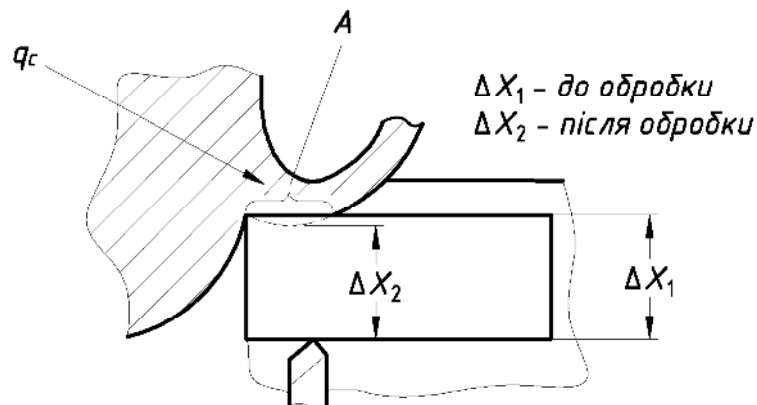


Рисунок 8 – Схема процесу різання

Отже, якщо  $A$  та/або  $dT/dX$  збільшуються (що призводить до зменшення  $\Delta X$ ), то  $q_c$  також збільшується. Виняток може бути лише в перші кілька хвилин різання. Спочатку при багатьох операціях точіння спостерігається лише кратерне зношування, а бічне відсутнє. В ідеалі тепловий потік можна візуалізувати, як показано на рис. 8. Тепло надходить через область  $A$  і протікає крізь інструмент і потрапляє в повітряний зазор між бічною частиною інструменту та робочим матеріалом. По мірі зношування бічної сторони оброблюваний матеріал контактує з бічною поверхнею інструменту. Основна маса оброблюваного матеріалу має значно нижчу температуру, ніж середня температура середовища різання. Це змушує оброблюваний матеріал працювати як тепловідвід протягом перших

кількох хвилин (період зношування) різання, доки не буде досягнуто стабільний стан механіки процесу (рис. 9).

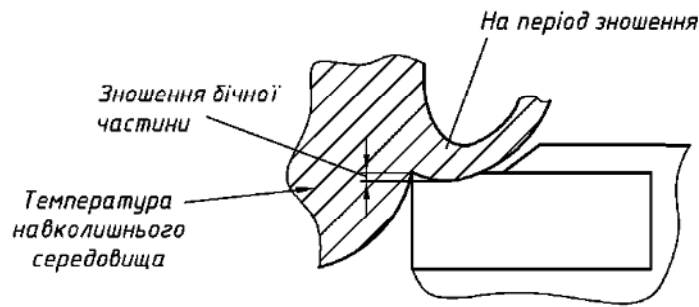


Рисунок 9 – Процес зношення бічної частини

З причин, які обговорювалися раніше, температура наконечника інструменту завжди була основною проблемою. Переваги методу віддаленої термопари можуть бути реалізовані лише в тому випадку, якщо можна розробити задовільну модель процесу передачі тепла через інструмент, що пов'язує віддалену температуру (або температури) з температурою наконечника інструмента.

Основне енергетичне співвідношення, що описує потік тепла через внутрішній елемент  $dx \, dy \, dz$  (рис. 10), при якому тепло не генерується всередині елемента, описується знайомим рівнянням Фур'є.

$$\frac{k}{ce} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

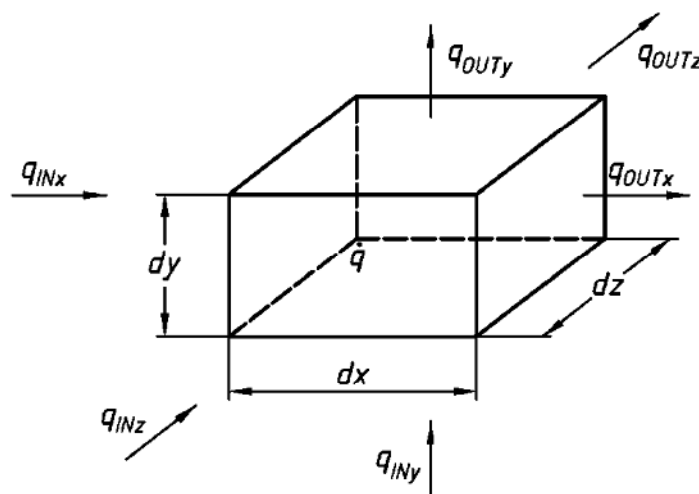


Рисунок 10 – Тепловий потік через елемент  $dx dy dz$

Рівняння в такому вигляді розв'язати надзвичайно важко. Більш практичний підхід для моделювання процесу теплопередачі був розроблений в процесі досліджень Ліпмана, Невіса та Кейна. Їх методика використовує метод скінченних різниць для розв'язання рівняння Фур'є. Граничні умови представляють фізичну конфігурацію інструментальної вставки та тримача. Потім рівняння Фур'є перетворюється на систему кінцевих різницевих рівнянь. Виведення та загальний вигляд рівняння (5) апроксимовано процедурою кінцевих різниць має вигляд:

$$\begin{aligned}
 ce \frac{d\theta(n, n)}{dt} b \Delta x \Delta y &= \frac{k \Delta y}{\Delta x} b [\theta(n + 1, n) - \theta(n, n)] - \\
 - \frac{k \Delta y}{\Delta x} b [\theta(n, n) - \theta(n - 1, n)] &+ \frac{k \Delta x}{\Delta y} b [\theta(n, n + 1) - \theta(n, n)] - \\
 - \frac{k \Delta x}{\Delta y} b [\theta(n, n) - \theta(n, n - 1)], &
 \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned}
 ce \frac{d\theta(n, n)}{dt} &= \frac{k}{(\Delta x)^2} (\theta(n + 1, n) - 2\theta(n, n) - \theta(n - 1, n)) + \\
 + \frac{k}{(\Delta y)^2} (\theta(n, n + 1) - 2\theta(n, n) - \theta(n, n - 4)). &
 \end{aligned} \tag{6}$$

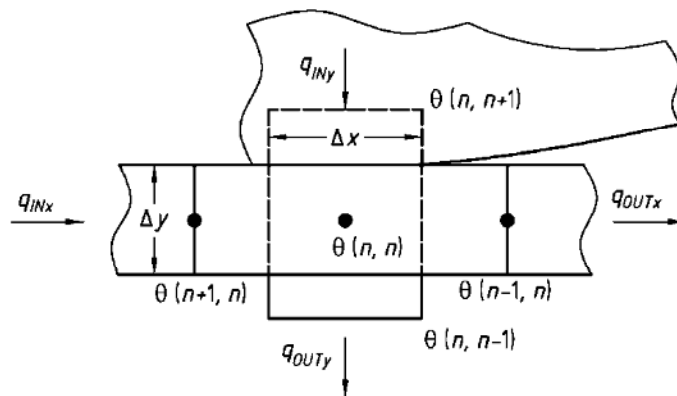


Рисунок 11 – Двовимірна модель теплопередачі для апроксимації рівняння Фур'є методом кінцевих різниць

Час є єдиною незалежною координатою у наведеному вище рівнянні. Нескінченно малі розміри  $dx$ ,  $dy$  і  $dz$  стають кінцевими розмірами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  і  $\Delta z$  і виражаються як константи, визначені для конкретної моделі.

Чим менші значення  $\Delta x$  і  $\Delta y$ , тим точніша модель. Область, що обмежує  $\theta_{n,n}$ , часто називають вузлом, і тоді метод описує вхід та вихід тепла вузла однорідної температури. Знову ж таки, чим більша кількість вузлів, тим точніший процес.

Наближена модель процесу обробки, що показує інструментальну пластину, інструментотримач і стружку, проілюстрована рис. 12. Модель буде корисною, лише якщо відомі такі величини:

$\theta_0$  – середня температура на стику інструмент-стружка;

$\theta_a$  – температура навколишнього середовища;

$k_1$  – сумарна теплопровідність мікросхеми і вставки;

$k_2$  – сумарна теплопровідність мікросхеми та тримача;

$k_3$  – сумарна теплопровідність вставки та тримача;

$k_4$  – теплопровідність вставки;

$k_5$  – теплопровідність різцетримача;

$h_1$  – коефіцієнт конвекції між вставкою і навколишнім середовищем;

$h_2$  – коефіцієнт конвекції між різцетримачем і навколишнім середовищем;

$c_1$  – питома теплоємність вставки;

$c_2$  – питома теплоємність різцетримача;

$e_1$  – густина матеріалу вставки;

$e_2$  – густина матеріалу різцетримача.

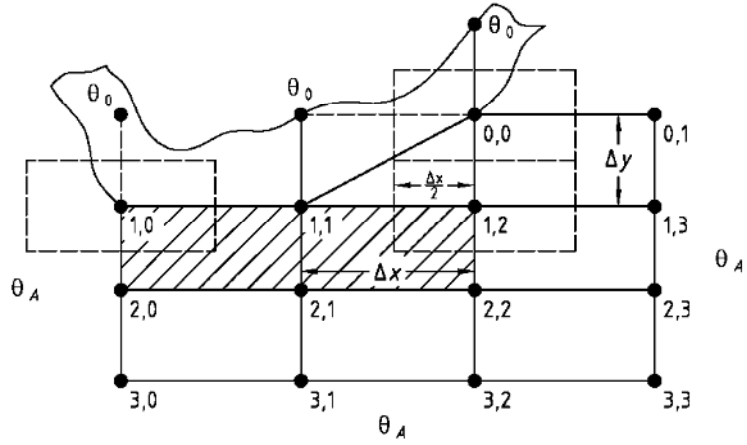


Рисунок 12 – Система вузлів

Передача тепла через модель, зображену на рис. 12, може бути описана чотирнадцятьма рівняннями, загальна форма яких ідентична рівнянню (6). Після деяких алгебраїчних перетворень процес можна звести до такої системи рівнянь:

$$\theta_{00} = A_1\theta_{01} + A_2\theta_{00} + A_3\theta_{11} + A_4\theta_{12} + B_1\theta_0. \quad (7)$$

$$\theta_{01} = A_5\theta_{00} + A_6\theta_{01} + A_7\theta_{13}. \quad (8)$$

$$\theta_{10} = A_8\theta_{10} - A_9\theta_{20} + A_{10}\theta_{11} + B_2\theta_0. \quad (9)$$

$$- - - - - \quad (10)$$

$$- - - - - \quad (11)$$

$$- - - - - \quad (12)$$

$$\theta_{20} = A_{25}\theta_{10} + A_{26}\theta_{20} + A_{27}\theta_{21} + A_{28}\theta_{30}. \quad (13)$$

$$\theta_{21} = A_{29}\theta_{20} + A_{30}\theta_{11} + A_{31}\theta_{21} + A_{32}\theta_{22} + A_{33}\theta_{31}. \quad (14)$$

$$- - - - - \quad (15)$$

$$- - - - - \quad (16)$$

$$- - - - - \quad (17)$$

$$\theta_{30} = A_{41}\theta_{20} + A_{42}\theta_{30} + A_{43}\theta_{31}. \quad (18)$$

$$- - - - - \quad (19)$$

$$- - - - - \quad (20)$$

$$- - - - - \quad (21)$$



$$\theta_{33} = A_{52}\theta_{32} + A_{52}\theta_{33} + A_{54}\theta_{23}. \quad (22)$$

Константи  $A_i (i = 1 - 54)$  мають загальний вигляд

$$a = \frac{k}{ce} \frac{1}{(\Delta y)^2} \text{ або } \frac{k}{ce} \frac{1}{(\Delta x)^2}.$$

В фактичному виведенні комбінована геометрія тримача інструменту та пластини призведе до того, що константи будуть набагато складнішими. Рівняння 6-21 можна виразити у формі матриці, показаній на наступній сторінці.

Загальне рівняння цієї матриці

$$\underline{\theta} = \underline{A}\underline{\theta} + \underline{B}, \text{ де } \theta_0 = U, \quad (23)$$

Риска під величиною означає, що це вектор.

$$\begin{bmatrix} \theta_{00} \\ \theta_{01} \\ \theta_{10} \\ \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \\ \theta_{20} \\ \theta_{21} \\ \theta_{22} \\ \theta_{23} \\ \theta_{30} \\ \theta_{31} \\ \theta_{32} \\ \theta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & A_2 & 0 & A_3 & A_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_5 & A_6 & 0 & 0 & 0 & A_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_8 & A_{10} & 0 & 0 & A_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & 0 & A_{11} & A_{15} & A_{13} & 0 & 0 & A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{17} & 0 & 0 & A_{16} & A_{18} & A_{20} & 0 & 0 & A_{19} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 & A_{21} & A_{23} & 0 & 0 & 0 & A_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{25} & 0 & 0 & 0 & A_{26} & A_{27} & 0 & 0 & A_{28} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{30} & 0 & 0 & A_{29} & A_{31} & A_{32} & 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{35} & 0 & 0 & A_{34} & A_{36} & A_{37} & 0 & 0 & A_{38} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{40} & 0 & 0 & A_{39} & A_{41} & 0 & 0 & A_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{41} & 0 & 0 & 0 & A_{42} & A_{43} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45} & 0 & 0 & A_{44} & A_{47} & A_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{49} & 0 & 0 & A_{48} & A_{51} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{54} & 0 & 0 & A_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{00} \\ \theta_{01} \\ \theta_{10} \\ \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \theta_{13} \\ \theta_{20} \\ \theta_{21} \\ \theta_{22} \\ \theta_{23} \\ \theta_{30} \\ \theta_{31} \\ \theta_{32} \\ \theta_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \\ B_2 \\ B_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Це зазвичай називають формою рівнянь системи зі змінною стану та є першим кроком в методиці оптимізації системи, яка базується на підході до змінної стану, що називається принципом Понтрягіна.

Як було зазначено раніше, корисність рівняння. (24) залежить від оцінки постійних матриць  $\underline{A}$  і  $\underline{B}$ . Раніше було показано, що ці константи є комбінаціями теплопровідності матеріалів, коефіцієнтів конвекції, питомої теплоємності,

густини та вузлових розмірів ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ). Усі ці величини повинні бути визначені емпірично, оскільки такі властивості, як провідність, густина і питома теплоємність, є функціями температури, часу та фізичних змін в інструменті під час операції різання. Коли їх робочі діапазони відомі, середнє або граничне значення (це значення залежатиме від коефіцієнта безпеки системи) можна замінити в рівнянні (24).

З уже визначеною температурою вершини інструменту,  $\theta_0$ , яка є вхідною або примусовою функцією системи, і оціненими матрицями  $\underline{A}$  і  $\underline{B}$ , рівняння системи можна запрограмувати на комп'ютері для моделювання. Основна проблема методу кінцевих різниць полягає в тому, що чим більшої точності ми хочемо, тим більше вузлів і функціональних зв'язків нам потрібно, і час комп'ютера, необхідний для виконання процесу, збільшується. Тоді точність процесу обмежується кількістю вузлів, необхідних для отримання співвідношення один до одного між часом різання та часом обчислень на комп'ютері. Якщо комп'ютерний час перевищує час різання, моделювання неефективне.

Альтернативним підходом до пошуку моделі процесу теплообміну, який допомагає подолати зазначену вище проблему, було використання відомої емпіричної техніки. Зв'язок між вхідною  $\theta_0$  і вихідною температурою процесу, яка в даному випадку є температурою інструменту, було встановлено на основі експериментальних даних. Графік показав, що залежність між вхідною температурою  $\theta_0$ ,  $\theta_1$  в часі може бути апроксимована рівнянням другого порядку:

$$\theta_1 = \left[ \frac{k}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} \right] \theta_0. \quad (25)$$

де константи  $k, \tau_1, \tau_2$  обчислювалися за допомогою нелінійного методу підгонки кривої найменших квадратів на основі покрокового методу Гаусса-Ньютона

Модель також була розроблена на основі теоретичного виведення системи другого порядку (два вузли), яка була трохи складнішою та точнішою, ніж наведене вище рівняння.

В загальному вигляді:

$$\theta_1 = \left[ \frac{k(\tau_2 S + 1)}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} \right] \theta_0. \quad (26)$$

Значення констант в формулі (25) були такими:  $\tau_1 = 2,47$ ;  $\tau_2 = 0,1$ ;  $k = 0,7056$ .

Формулу (26) було перетворено в наступну форму для спрощення програмування.

$$\theta_1 = \left[ \frac{A(\tau_2 S + 1)}{(S + R_1)(S + R_2)} \right] \theta_0.$$

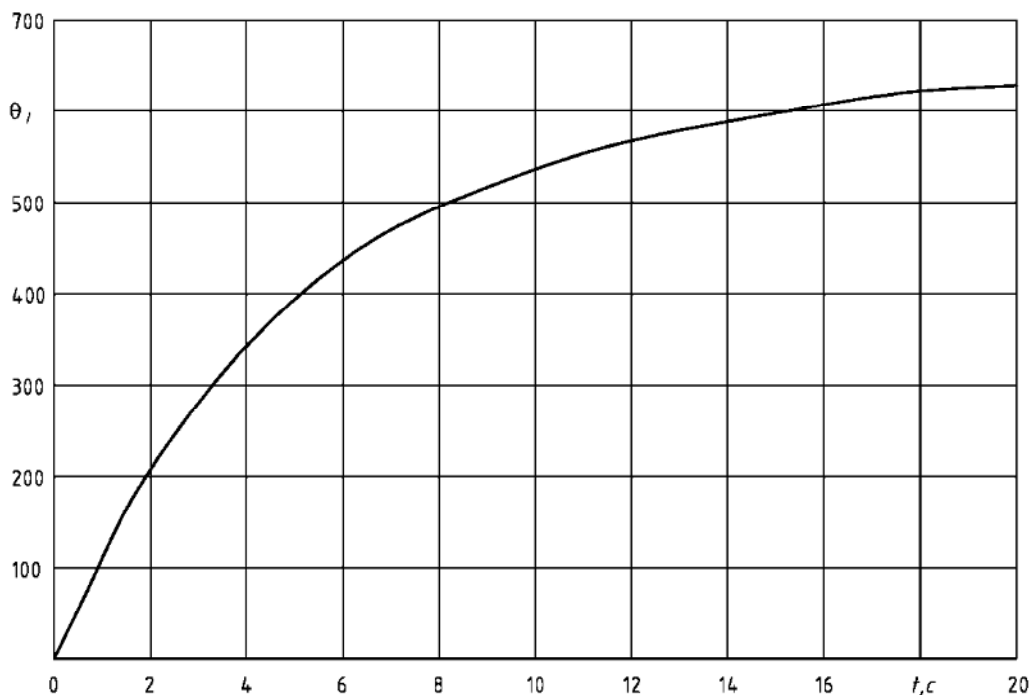


Рисунок 13 – Залежність  $\theta_1$  від часу

В цьому випадку константи мають такі значення:  $A = 0,30183$ ;  $\tau_2 = 2,0323$ ;  $R_1 = 0,19914$ ;  $R_2 = 260033$ .

Єдиними температурами або змінними стану, необхідними для оцінки параметрів запропонованої моделі системи в цій дипломній роботі, є  $\theta_0$  і  $\theta_1$ . Таким чином, ця емпірична процедура, здається, вирішила проблему опису процесу теплопередачі, і за набагато менший час, ніж вузлове аналогове моделювання.

Недоліком цього методу є те, що він не описує загальний стан системи так ретельно, як вузловий метод. Наприклад, якщо в майбутньому засіб оцінки терміну служби інструменту або інший критерій різання було встановлено на

основі розподілу температури на бічних сторонах або поверхні інструменту (верхній чи нижній), це рівняння не можна буде використовувати.

Емпірична процедура та отримане в результаті рівняння теплопередачі мають ще одну дуже важливу перевагу, окрім часу. Вузлові рівняння (6-21) були розроблені з використанням припущення, що єдиною зміною в системі було введення енергії. Проте вже встановлено, що константи в матриці  $A$ , є не константами, а функціями часу і температури. Іншим згаданим раніше джерелом зміни системи є зношення інструменту. Під час більшості операцій різання зі збільшенням часу інструмент зношується на поверхні різання та боках інструменту. Далі будуть показані типові графіки зношення бічних сторін в залежності від часу. Для врахування зношення при вузловому методі розміри  $\Delta x$  і  $\Delta y$  в області різальної кромки і торця повинні були б змінюватися залежно від часу, ймовірно, в меншій мірі. Вузли також можуть бути усунені. Ця підвищена складність значно збільшить час моделювання. Однак, використовуючи емпіричний метод, зношення інструменту враховується по суті, просто тому, що отримане рівняння базується на даних, отриманих за фактичних умов різання.

Таким чином, перевагами емпіричного методу є час і властива йому реакція на зношення інструменту, тоді як перевагою вузлового методу є повний опис стану системи. Рішення про те, який метод використовувати, чи використовувати комбінацію методів, ймовірно, залежатиме від кількості змінних, необхідних для оцінки критеріїв системи.

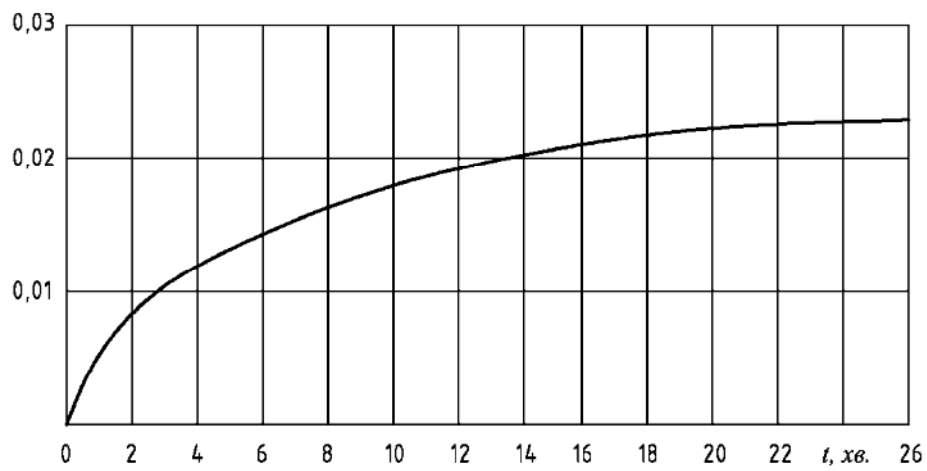
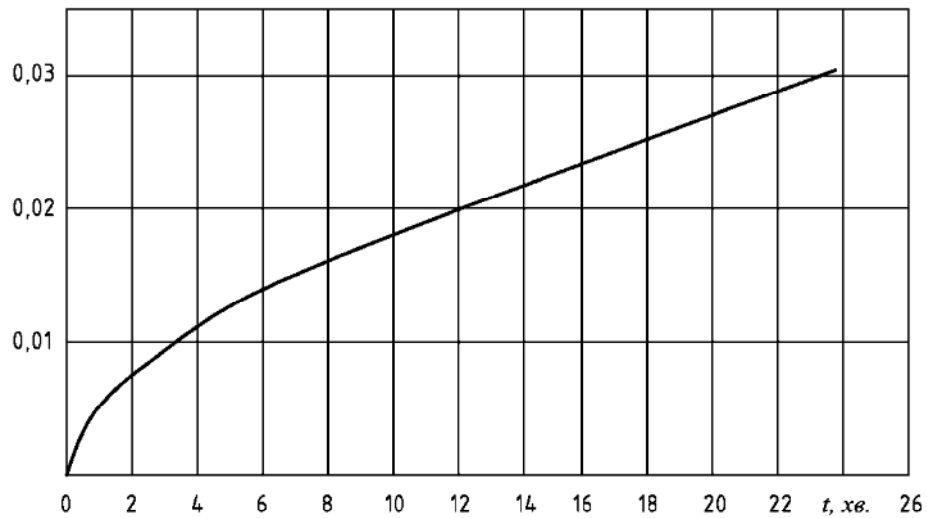


Рисунок 14 – Зношування бічної частини в часі

### 3.2 Системні параметри, що впливають на термін служби інструменту

В цій частині кваліфікаційної роботи буде розглянуто фактори, які впливають на термін служби інструменту, зокрема зношення інструменту.

Ознаками закінчення терміну придатності інструменту, коли він перестає задовільно працювати, є такі:

- а) значне зростання сили різання;
- б) значне зростання енергоспоживання;
- в) якість поверхні не відповідає вимогам;
- г) значне підвищення температури інструменту;
- д) збільшення швидкості зношення інструменту;
- е) фізична поломка інструменту.
- є) комбінація вищезазначеного.

Будь-який із цих критеріїв можна використовувати для визначення терміну служби інструменту.

Відмови інструментів зазвичай поділяють на три категорії:

1. Порушення температури. Властивості матеріалу інструменту можуть змінюватися в залежності від температури, зниження твердості і міцності при підвищенні температури. Таким чином, надмірне споживання енергії, що створює підвищення температури, може спричинити розм'якшення матеріалу інструменту та неможливість правильного різання.

2. Механічне руйнування різальної частини інструменту, яке може бути викликано неправильним кутом заточування.

3. Надмірне зношення інструменту – в цьому випадку інструмент зношується до такої міри, що бажані параметри оброблених деталей не можуть бути дотримані, наприклад розміри або чистота поверхні.

Вібрація та биття шпинделя також можуть бути результатом надмірного зношення.

Приклади факторів, які впливають на термін служби інструменту:

- 1) швидкість різання;
- 2) подача;
- 3) глибина різання;
- 4) матеріал заготовки;
- 5) інструментальний матеріал;
- 6) геометрія інструменту;
- 7) наявність або відсутність мастильно-охолоджуючої рідини;
- 8) теплопровідність;
- 9) питома теплоємність інструментального матеріалу

В 1907 році Ф.В. Тейлор опублікував статтю, присвячену дослідженням, в ході яких він розробив формулювання, яке досі є основою обчислення ресурсу інструменту. Співвідношення ресурсу інструменту та швидкості, виражене у формі добре відомого рівняння ресурсу інструменту Тейлора:

$$V_s T^{\bar{n}} = C,$$

де  $V$  – швидкість різання;

$T$  – період стійкості різального інструменту;

$n$  – нахил кривої в часі;

$C$  – константа для заданих умов різання.

Отже, термін служби інструменту можна визначити на основі багатьох різних критеріїв.

Це може бути час різання, за який можна отримати поверхню заданої якості або час до поломки інструмента. Вибір залежить від виду операції. Інші залежності, крім формули Тейлора, були отримані для визначення терміну служби інструменту. Дуже часто, наприклад, застосовується формула Ернста, яка враховує залежність між температурою та стійкістю інструменту:

$$\frac{T(\theta_0 - 32)^m}{1,8} = B,$$

де  $T$  – стійкість інструменту;

$\theta$  – температура поверхні інструменту;

$m$  – змінна, яка залежить від матеріалу та геометрії інструменту;

$B$  – константа, яка залежить комбінації інструмент-робочий матеріал.

В будь-якій операції різання, яка використовує допуск як критерій, зношення інструменту зазвичай є важливим фактором. Існує кілька типів зношення, але загалом його можна розділити на три види:

1) абразивне зношення;

2) адгезійне зношення;

3) дифузійне зношення.

Ділянки інструменту, на яких найчастіше виникає зношення будь-якого типу (рис. 15): зношення передньої і задньої поверхонь, зношення вершини інструменту, зношення бічних поверхонь, утворення лунок (кратерів) на поверхнях.

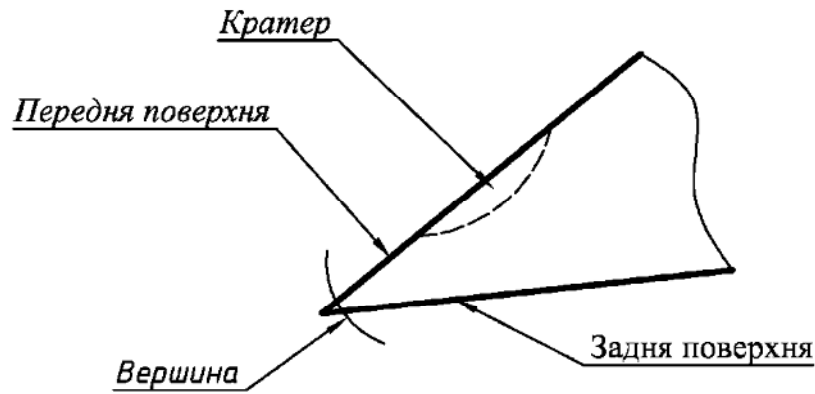


Рисунок 15 – Зони зношення інструменту

Основні принципи зношення інструменту закладені в мікроструктурах інструменту та робочих матеріалів. Незважаючи на те, що поверхня будь-якого матеріалу здається неозброєним оком гладкою, насправді це дуже неправильна безперервна поверхня складається з виступів, які, ймовірно, представляють міцніші складові матеріалу. Зношування відбувається потім пластичною деформацією, зварюванням різання або зняття виступів робочого матеріалу інструментом, і тому сильно залежить від роботи та матеріалів інструменту. Основна концепція абразивного або фрикційного зношення полягає в тому, що сильніші компоненти оброблюваного матеріалу впливають на слабші елементи в інструменті, і виключно через їх більшу міцність на зсув призводять до зрізу частинок інструменту. Цей процес значною мірою залежить від твердості, пружних властивостей і геометрії двох поверхонь, що сполучаються. Справжня площа контакту на межі різання може бути задана як

$$A_r = \text{зона дійсних контактів} = \frac{H_{wm}}{F_c}. \quad (28)$$

де  $F_c$  – сила різання, перпендикулярна торцю інструмента;

$H_{wm}$  – твердість, виміряна за методом Мейера:

$$H_{wm} = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}},$$



де  $F$  – навантаження на індентор, що залишає сферичну лунку;

$d$  – діаметр індентора.

Статичний коефіцієнт тертя залежить від міцності робочого матеріалу на зсув і контактної твердості як:

$$M = \frac{S_{sa}}{H},$$

де  $S$  – міцність на зріз заготовки,

$H$  – твердість пластини інструменту.

Двома основними умовами, що впливають на зношення, є швидкість тертя та тиск різання. Тиск визначає напругу стиску в межах асперитових з'єднань, тоді як швидкість різання та склад матеріалу визначають частоту, з якою асперити контактують.

Для будь-якої операції різання можна скласти таблицю характеристик матеріалу інструменту і заготовки. Ця таблиця може служити в якості довідкового матеріалу в прогнозуванні складових матриці робочого матеріалу, які можуть спричинити абразивне зношення; і ті елементи всередині інструменту та робочого матеріалу, які можуть перетікати або дифундувати один в одного і таким чином зношуватися через адгезію або дифузію

Загалом, більш тверді та міцні матеріали в заготовці будуть зношувати слабші та крихкіші матеріали інструменту. Також важливо розуміти, що властивості матеріалів елементів, які можна отримати з інженерних довідників, служать лише відносною основою для порівняння, оскільки поєднання деформаційного зміцнення, холодної обробки, фазових перетворень матеріалу тощо змінить їх фактичні значення в області розділу інструмент-датчик.

Три форми зношення, пор які згадувалося раніше, не є незалежними; і з цих трьох абразивне зношення є основною формою. Наприклад, якщо утворюється зварне з'єднання між контактуючими поверхнями через температуру або тиск; воно повинно було спочатку утворитися в результаті процесу дифузії, а згодом зруйнуватися в результаті процесу стирання.

Механіка абразивного зношування досить складна. Отримання основної

форми залежності зношення від швидкості різання, швидкості подачі та температури базується на згині та остаточному зрізанні мікронерівностей під дією зсувних і стискаючих навантажень (рис. 17).

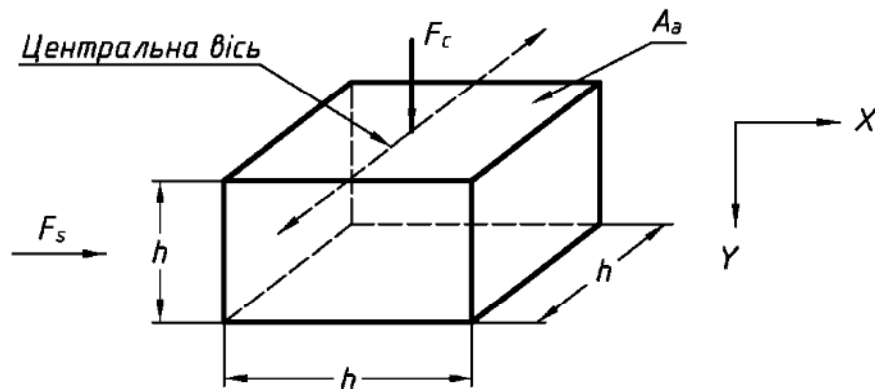


Рисунок 17 – Елемент під дією зусиль згину

Нехай  $F_e$  – зусилля різання, перпендикулярне торцю інструменту,  $F_s$  – зусилля зсуву паралельно торцю інструменту,  $A_a$  – площа горизонтальної поверхні.

Напруження згину

$$\tau_b = \frac{F_s \left(\frac{h}{2}\right) \left(\frac{h}{2}\right)}{\left(\frac{h}{3}\right)} = \frac{3F_s}{2};$$

Напруження стиску –  $\tau_c = F_c A$ .

Тоді напруження в напрямку у дорівнює:

$$\tau_y = F_c A - \frac{3F_s}{2} \quad \text{– в точці ліворуч від центральної осі;}$$

$$\tau_y = F_c A \quad \text{– на центральній осі;}$$

$$\tau_y = F_c A + \frac{3F_s}{2} \quad \text{– в точці праворуч від центральної осі,}$$

$$\tau_{xy} = \frac{F_s \left(\frac{h}{2}\right) \left(\frac{h}{2}\right) / 2}{\left(\frac{h}{3}\right)^3 / 12} = \frac{6F_s}{2}.$$

Енергія, необхідна для руйнування мікронерівностей, дорівнює сумі енергії пружної деформації плюс енергії, необхідної для руйнування на межі розділу інструмент-стружка. Робота, що виконується інструментом, спричинена силами зрізу та стиснення, дорівнює

$$d = -Cd\theta_0,$$

де  $C$  – питома теплоємність

$\theta_0$  – температура в зоні стружка/інструмент.

Для крихкого матеріалу, такого як карбід вольфраму, залежність напруження-деформація може бути описана процесом, зображеним на рис. 17.

Нехай  $U_t$  – загальна енергія для руйнування

$$U_t = \tau_y \xi_y + \tau_{xy} \left( \gamma_{xyf} - \frac{\gamma_{xy}}{2} \right) + \frac{1}{2} (\tau_{xyf} - \tau_{xy}) (\gamma_{xyf} - \gamma_{xy}), \quad (29)$$

де  $\tau_{xy}$  – напруження зсуву;

$\gamma_{xy}$  – деформація зсуву;

$\tau_{xyf}$  – напруження зсуву, необхідне для руйнування;

$\gamma_{xyf}$  – деформація зсуву при руйнуванні;

$\tau_y$  – осьове напруження;

$\tau_{yf}$  – осьове напруження, необхідне для руйнування;

$\xi_y$  – осьова деформація при руйнуванні.

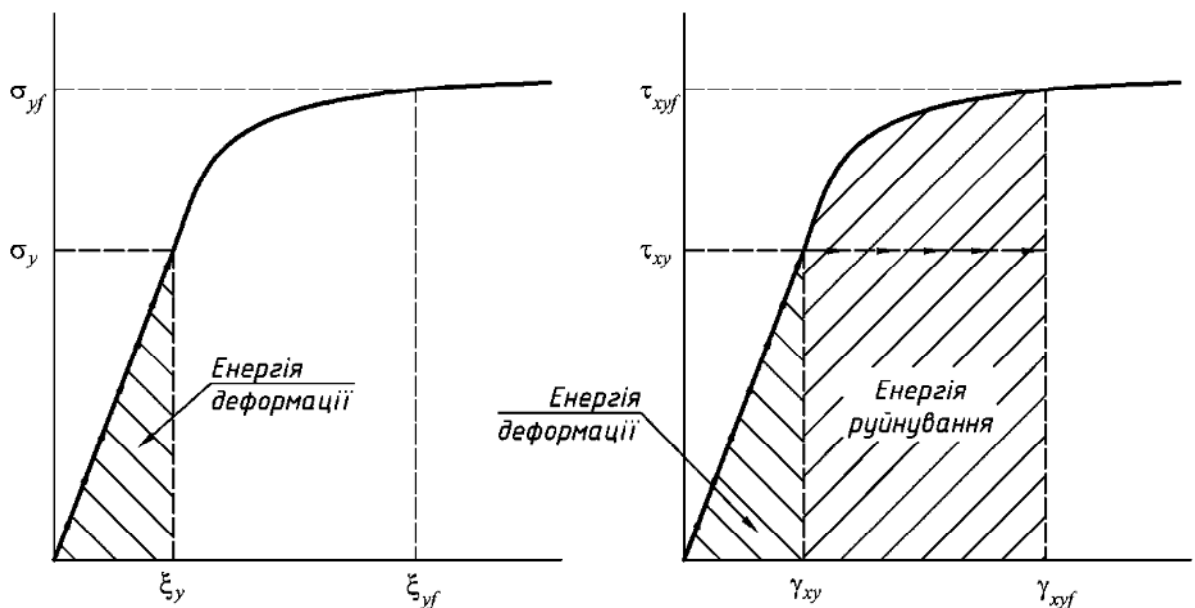


Рисунок 17 – Типове співвідношення напруження-деформація для крихкого матеріалу

Підставляємо такі співвідношення у наведені вище.

$T_y = F_c A_a + \frac{3F_s}{2}$  (припускаючи, що згинальний момент невеликий і початкове руйнування починається з правого боку мікронерівностей);

$$T_{xy} = \frac{6F_s}{2};$$
$$\xi_y = \frac{\tau_y}{E}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G};$$
$$\gamma_{xyf} = \frac{\tau_{xyf}}{2}.$$

де  $E$  – модуль пружності твердосплавного інструменту;

$G$  – модуль зсуву для змінного твердосплавного інструменту;

$\tau_{xyf}$  – напруження розриву при зсуві.

$$U_T = \frac{1}{E} \left( F_c A_a + \frac{3F_s}{2} \right)^2 + \frac{6F_s}{G} \left( \tau_{xyf} - \frac{3F_s}{2} \right) + \frac{1}{2G} \left( \tau_{xy} - \frac{F_s}{2} \right)^2. \quad (30)$$

Зміна енергії в шарі інструменту безпосередньо під нерівностями дорівнює сумі роботи, виконаної над нерівностями (енергія деформації), і енергії зсуву, вивільненої робочим матеріалом; і залежить від градієнта теплового потоку, характерного для матеріалу інструменту.

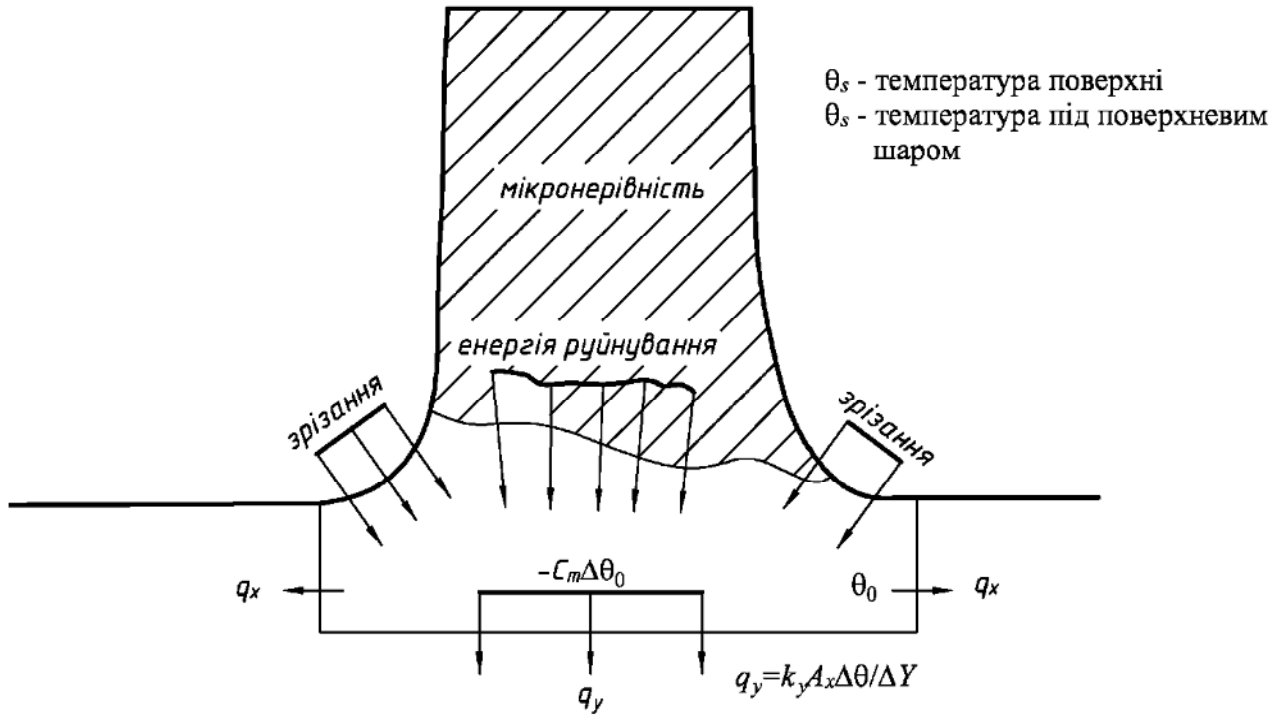


Рисунок 18 – Потік тепла в нерівностях

Використовуючи позначення  $U_s$  – енергія зсуву маси  $m$ ,  $C$  – питома теплоємність інструменту,  $m$  – маса матеріалу безпосередньо під нерівностями,  $k_y$  – теплопровідність в напрямку  $y$ , запишемо

$$\begin{aligned}
 U_t + U_s &= Cm\Delta\theta_0 + k_y A_x \frac{\Delta\theta_0}{\Delta y}; \\
 U_s &= \frac{F_c V_s}{V_s df}; \\
 Cm\Delta\theta_0 + k_y A_x \frac{\Delta\theta_0}{\Delta Y} &= \frac{1}{E} \left( F_c A_a + \frac{3F_s}{2} \right)^2 + \frac{6F_s}{G} \left( \tau_{xyf} - \frac{3F_s}{2} \right) + \\
 &+ \frac{1}{2G} \left( \tau_{xyf} - \frac{5F_s}{2} \right)^2 + \frac{F_c V_s}{vdf}.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Виходячи з цих трьох позицій:

- 1) зношення мікронерівностей визначається як  $W = eA_a$  ;
- 2) вважається, що глибина фрагмента маси безпосередньо під нерівностями настільки мала, що  $\Delta\theta_0/\Delta y = 0$ ;
- 3) з експериментальних даних одержано, що форма відповіді  $\theta_1$ , температура

віддаленого інструменту, на введення кроку така сама, як  $\theta_0$ ,  
отримуємо формулу зношення:

$$W = \frac{1}{F_c} (K_1 + K_2 \theta_1) + K_3 \frac{F_s}{F_c} + K_4 \frac{F_s^2}{F_c} + K_5 \frac{1}{F_c} + K_6. \quad (32)$$

Ця залежність призвела до перетворення емпіричної формули  
(припускаючи, що глибина різання  $d$  є постійною),

$$W = B_0 + B_1 f^{n_1} + B_2 F^{n_2} \theta_1 + B_3 f^{n_3} V_s^{n_4} \quad (33)$$

яка була замінена в програмі підгонки нелінійної кривої найменших квадратів.  
Результати, отримані за допомогою цієї формули, і константи, визначені  
програмою, порівнювалися з фактичними даними, і згодом була використана в  
процесі моделювання.,

Визначені константи:  $B_0 = 0,000905$ ;  $B_1 = 10$ ;  $B_2 = - 0,001078$ ;  $B_3 = 10$ ;  $n_1 = 3,13$ ;  $n_2 = 3,13$ ;  $n_3 = 0,5$ ;  $n_4 = 0,5$ .

Рівняння (33) описує процес абразивного зношування для конкретної  
операції точіння, яка моделюється.

Було запропоновано декілька рівнянь для опису зношування через адгезію  
для простого процесу ковзання. Одне з них розглядає процес перенесення атома  
через дійсну площу контакту,  $A_r$ . Об'єм зношення, що виникає внаслідок ковзання  
на деяку відстань, становить

$$W = ZN \frac{1}{H};$$

де  $Z$  – імовірність видалення атома з поверхні; в залежності від умов, в яких  
відбувається процес, матеріалу, швидкості ковзання, температури, нормального  
навантаження на поверхню  $N$  і твердості  $H$  більш м'якого з двох матеріалів, що  
контактують.

Зношення через адгезію може відбуватися такими способами:

1) значне зменшення твердості інструменту – дифузія вуглецю у відносно  
глибокому поверхневому шарі інструменту може спричинити зменшення

твердості та подальшу пластичну деформацію інструменту, викликаючи суттєві зміни в геометрії інструменту, що призводить до великих зусиль і раптової повної відмови інструменту; дифузія основних компонентів інструменту в заготовку – матеріал інструменту або основна складова міцності інструменту може бути розчинена в робочому матеріалі та поверхні стружки, в ливарних сплавах, твердосплавних або керамічних інструментах це може бути основним явищем зношення;

2) дифузія незначних фрагментів інструменту в процесі роботи – компонент матеріалу інструменту може дифундувати, залишаючи поверхневий шар із погіршеними властивостями матеріалу, наприклад, в твердосплавних інструментах кобальтова зв'язка може бути втрачена;

3) дифузія компонента робочого матеріалу в інструмент.

Компонент робочого матеріалу, що дифундує в інструмент, може змінити фізичні властивості поверхневого шару. Наприклад, дифузія свинцю в інструмент може призвести до утворення тонкого крихкого поверхневого шару, який може бути видалений шляхом руйнування.

Як і у випадку зношення від стирання та адгезії, було запропоновано кілька виразів для розрахунку зносу внаслідок дифузії. За одним з таких рівнянь розраховують імовірність дифузії, а згодом утворення зварного шва як:

$$K_w = C_w e^{-E_w/RT}$$

і ймовірність розриву зварного шва для забезпечення перенесення металу, як:

$$K_f = C_f e^{-E_f/RT},$$

де  $C_w$ ,  $C_f$  – константи;

$E_w$ ,  $E_f$  – енергія активації відповідно зварювання та руйнування;

$R$  – універсальна газова стала;

$T$  – температура на межі інструмент-датчик.

Наведені вище вирази можна використати для опису імовірності  $k$  у виразі

для визначення зношення:

$$W = k \frac{N}{3\tau_y},$$

де  $N$  і  $l$  є такими, як визначено раніше;

$\tau_y$  – текучість або напруження текучості для слабшого матеріалу в контакті;

$k$  – ймовірність того, що нерівності при контакті призведуть до утворення частинок зношення,  $k = K_w K_f$ .

Для досягнення економічної ефективності механічної обробки довговічність інструменту та зношення інструменту є важливими, якщо не головними факторами. Їх зв'язок із продуктивністю системи розглядається далі.

### 3.3 Індекс ефективності

На яких критеріях повинна базуватися продуктивність системи залежить виключно від операції обробки. Більшість виробництв зосереджені головним чином на виробництві деталей в кількості та в межах встановлених розмірних характеристик. В таких операціях метою буде максимальна продуктивність або мінімальні експлуатаційні витрати. Досягнення оптимальних економічних результатів за цих умов вимагає усунення причин непередбачуваного терміну служби інструменту. Однак, коли виготовляються прецизійні деталі на замовлення, надто тонка обробка поверхні, або допуск на критичні розміри, як правило, служить індексом ефективності, а вартість виробництва, хоча і є фактором, не буде найважливішим критерієм.

В цій частині кваліфікаційної роботи виведено дві альтернативні форми індексу ефективності, які базуються на економічних критеріях. Показник якості дуже корисний, коли використовуються методи пошукової оптимізації і використовується в імітаційній моделі, розробленій в цій роботі.

Друга форма полягає в тому, що кінцевий результат є інтегральним



індексом продуктивності, вираженим через змінні керування та змінні стану. Індекс ефективності в цій формі потім можна використовувати в процедурі оптимізації Понтрягіна.

Як уже було зазначено, продуктивність системи фрезерування кількісно описується відповідним чином визначеним коефіцієнтом ефективності. Це єдине число  $H$ , величина якого є мірою того, яка операція процесу задовольняє певним заздалегідь визначеним критеріям.

Загальна вартість зняття металу протягом терміну служби інструменту:

$$B = G_{av} V_o l_{t1} = K_1 T + K_1 \tau + K_2,$$

де  $K_1$  – пряма оплата праці плюс оплата накладних витрат;

$K_2$  = вартість механічної обробки плюс початкова вартість інструменту;

$T$  = термін служби інструменту (між повторним заточуванням) плюс час простою, необхідний для зміни інструментів;

$G_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T G_i dt$  – вартість одиниці об'єму видаленого металу;

$V_o l_{t1} = \int_0^T MRR dt$  – загальний об'єм металу, видаленого за один період служби інструменту;

$MRR$  – миттєва швидкість видалення металу.

Знайдемо  $S$  з рівняння (36):

$$G_{av} = \frac{K_1 T + K_1 \tau + K_2}{V_o l_{t1}} = \frac{K_1 + \frac{1}{T} (K_1 \tau + K_2)}{\frac{1}{T} \int_0^T MRR dt}.$$

Припускається, що зношування інструменту відбувається або як кратерне зношування, або як контактне зношування (бокове зношування), і в будь-якому випадку воно поступово збільшується як функція часу. Вважаючи  $W_0$  максимально допустимим зношення перед повторним шліфуванням, маємо

$$W_0 = \int_0^T TWR dt,$$

де  $TWR$  – швидкість зношення інструменту.

Тому

$$\frac{W_0}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T WR dt;$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{W_0 T} \int_0^T WR dt.$$

Підставляючи  $G_{avg}$  а та  $1/T$ , маємо,

$$\frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{K_1 + \frac{K_1 \tau + K_2}{W_0} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T TWR dt \right]}{\frac{1}{T} \int_0^T MRR dt}.$$

Кілька величин у наведеному вище виразі усереднюються протягом терміну служби інструменту, миттєвий вираз отримують, беручи обмеження, коли період усереднення наближається до нуля.

$$G_i = \lim_{T \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T i dt \right] = \frac{\lim_{T \rightarrow 0} K_1 + \left( \frac{K_1 \tau + K_2}{W_0} \right) \left[ \frac{1}{T} \int_0^T TWR dt \right]}{\frac{1}{T} \int_0^T MRR dt} =$$

$$= \frac{K_1 + \left[ \frac{K_1 \tau + K_2}{W_0} \right] WR}{MRR}.$$

Це рівняння можна розділити на два компоненти, що представляють витрати на різання металу та час зміни інструменту, а також початкові витрати та витрати на повторне шліфування інструменту.

$$G_i = K_1 \left[ \frac{1}{MRR} + \frac{\tau}{MRR} \frac{TWR}{W_0} \right] + K_2 \left( \frac{1}{MRR} \right) \left( \frac{TWR}{W_0} \right). \quad (34)$$

Перший член у рівнянні (34) є вартістю через час, що минув, або величиною, зворотною миттєвій швидкості зняття металу, і має розмірність хвилин на кубічний міліметр.

Таким чином, якщо рівняння (34) модифікується видаленням другого члена, отримуємо залежність продуктивності.

Тоді показник якості  $H$  визначається як

$$H = \left| \frac{MRR}{K_1 + \left[ \frac{K_1 \tau + K_2 B}{W_0} \right] TWR} \right| \quad B = \text{const} \quad (35)$$

де  $0 \leq B \leq 1$ .

Знаки абсолютного значення вказують на те, що враховується лише значення величини. Константа  $B$  може бути скоригована для встановлення критеріїв ефективності. Якщо  $B$  дорівнює нулю, критерієм буде тільки швидкість обробки, тоді як, якщо  $B$  дорівнює одиниці, це будуть лише витрати. Проміжні значення  $B$  являють собою компроміс між критеріями вартості та продуктивності.

Існує також методика, за якою загальна вартість обробки використовується для визначення продуктивності системи.

Ця величина дорівнює сумі:

- 1) вартості машини та експлуатаційної вартості;
- 2) вартості інструменту;
- 3) непродуктивної вартості.

Ці критерії вартості є функціями подачі, швидкості, глибини різання, характеристик інструменту та обладнання, матеріалу заготовки, охолоджуючої рідини тощо. Оскільки багато з цих величин змінюються з часом, продуктивність також змінюватиметься з часом. Це означає, що розроблене рівняння дасть миттєву оцінку продуктивності системи.

З виведення Бендікса повинно бути очевидно, що індекс продуктивності, заснований на середній загальній вартості обробки ( $TMC$ ), є функцією швидкості зняття металу ( $MRR$ ) і швидкості зношення інструменту ( $TWR$ ). Середні значення  $TMC$ ,  $TWR$  і  $MRR$  визначаються як:

$$(TMC)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T (TMC)_i dt; \quad (36)$$

$$(TWR)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T (TWR)_i dt; \quad (37)$$

$$(MRR)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T (MRR)_i dt. \quad (38)$$

де  $T$  – загальний час обробки.

Взявши межу рівнянь (36-38), коли період усереднення наближається до нуля, ми отримуємо миттєві значення величин, або:

$$(TMC)_i = \lim_{T \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (TMC)_i dt \right];$$

$$(TWR)_i = \lim_{T \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (TWR)_i dt \right];$$

$$(MRR)_i = \lim_{T \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T (MRR)_i dt \right].$$

Величини, використані в наступному виведенні, представляють їх миттєві значення.

Нехай  $TMC$  – загальна вартість обробки;  $MC$  – вартість обробки та експлуатації;  $TC$  – вартість інструменту;  $NPC$  – непродуктивні витрати.

Тоді

$$TMC = MC + TC + NPC. \quad (39)$$

Вартість обробки та експлуатації можна оцінити таким чином:

$$MC = (MT) (K_1),$$

де  $MT$  – загальний час роботи інструменту;

$K_1$  – норма праці та накладних витрат.

Час обробки дорівнює

$$MT = \frac{(\pi/4)l_c(D_i^2 - D_f^2)}{V_s f d},$$

де  $l$  – довжина різання;

$D_i$  – початковий діаметр;

$D_f$  – кінцевий діаметр;

$V_s$  – швидкість обертання шпинделя;

$f$  – подача на оберт;

$d$  – глибина різання;  $d = \frac{D_i - f}{2}$ .

Якщо під час операції різання глибина і довжина різання залишаються постійними, то

$$\frac{(\pi/4)l_c(D_i^2 - D_f^2)}{V_s f d} = K_2$$

і

$$MC = K_1 \left( \frac{K_2}{V_s f} \right).$$

Вартість інструменту залежить від таких складових:

$TCC$  – вартість зміни інструменту;

$TDC$  – вартість амортизації інструменту;

$TIC$  – вартість запасів інструменту;

$P$  – продуктивність;

$TCT$  – час зміни інструменту,

і визначається таким виразом:

$$TC = \frac{TCC + T C + T C}{P}$$

Вартість зміни інструменту –  $TCC = K_1 (TCT)$ .

Час зміни інструменту зазвичай постійний, тому  $TCC = \text{const}$ , або  $TCC = K_4$ .

Вартість амортизації інструменту на кромку визначається як:

$TDC =$  (вартість одноразової вставки) (кількість вставок, що використовуються в  $MT$ ) + вартість тримача.

Для даної операції наведені вище величини зазвичай є постійними, тому  $VMT = K_5$ .

Інвентарна вартість інструменту дорівнює  $TIC =$  (кількість інструментів на верстаті + кількість інструментів на складі) (вартість/інструмент) (коефіцієнт собівартості запасів).

Знову ж таки, ці величини зазвичай постійні,  $TIC = K_6$  і вартість інструменту тоді:

$$TC = \frac{K_4 + K_5 + K_6}{P} = \frac{K_7}{P}$$

Остаточна величина, яку потрібно оцінити у вираженні загальних витрат на обробку, є невиробничими витратами ( $NPC$ ).  $NPC$  залежить від:

$LT$  – час завантаження;

$ULT$  – час вивантаження;

$NCT$  - інший час, не пов'язаний з різанням, який дорівнює

$$NPC = (LT + ULT + NCT)(K_1).$$

Оскільки всі умови постійні, то і непродуктивні витрати постійні для даної операції або  $NPC = K_8$ .

В результаті загальна вартість обробки:

$$TMC = \frac{K_1 K_2}{V_s f} + \frac{K_7}{P} + K_8.$$

Продуктивність можна оцінити таким чином:  $P = (\text{термін служби інструменту}) \times (\text{швидкість видалення матеріалу})$ .

Нехай  $W_0 =$  максимально допустиме зношення інструменту,

$MRR = V_s f d$  – швидкість зняття металу;

$TWR =$  швидкість зношення інструменту.

$$P = \frac{W_0}{TWR} (MRR) = \frac{W_0 (V_s f d)}{TWR},$$

$$TMC = K_1 \frac{K_2}{V_s f} + \frac{K_7 TWR}{W_0 d V_s f} + K_8.$$

Нехай  $K_1 K_2 = K_9$  і  $K_7 / W_0 d = K_{10}$ , тоді

$$TMC = \frac{K_7}{V_s f} + K_{10} \frac{TWR}{V_s f} + K_8. \quad (40)$$

Раніше було підтверджено, що зношення інструменту ( $W$ ) можна отримати з виразу у формі:

$$W = B_0 + B_1 f^{n_1} B_2 f^{n_2} \theta_1 + B_3 f^{n_3} V_s^{n_4}. \quad (41)$$

Рівняння (41) передбачає, що глибина різання залишається постійною. Диференціювання рівняння (41) призводить до наступного рівняння:

Приблизно після однієї-двох хвилин різання величина  $\dot{\theta}_1$  є постійною.

Нехай

$$B_1 n_1 = G_1;$$

$$n_1^{-1} = m_1;$$

$$B_2 n_2 = G_2;$$

$$n_2^{-1} = m_2;$$

$$B_2 \dot{\theta}_1 = G_3;$$

$$B_3 n_4 = G_5;$$

$$n_3^{-1} = m_3;$$

$$n_4^{-1} = m_4.$$

Отримуємо таке рівняння:

$$\dot{W} = TWR = G_1 f^{m_1} + G_2 f^{m_2} \theta_1 + G_3 f^{n_2} + G_4 f^{m_3} V_s^{n_4} + G_5 f^{n_3} V_s^{m_4}.$$

Тоді загальна форма рівняння швидкості зношування для емпіричного використання

$$\dot{W} = A_1 f^{a_1} + A_2 f^{a_2} \theta_1 + A_3 f^{a_3} V_s^{a_4}.$$

Для  $t \leq 2$  хв. значення  $\theta_1$  не є постійним. З наведених графіків видно, що підвищення температури за перші дві хвилини є експоненціальним, а отже, рівняння має вигляд:

$$\theta_1 = a + bt + c(e^{a(t-2)} - 1) \quad t < 2 \text{ хв.}$$

і може представляти адекватну оцінку для  $\theta_1$ . Інший підхід полягав би в тому, щоб включити експоненціальне зростання в постійний початковий вхідний крок.

Для  $t > 2$

$$TMC = \frac{K_9}{V_s f} + \frac{K_{10}}{V_s f} (A_1 f^{a_1} + A_2 f^{a_2} \theta_1 + A_3 f^{a_3} V_s^{a_4}) + K_8. \quad (42)$$

Шляхом мінімізації рівняння (42) продуктивність системи повинна бути оптимізована.



## 4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 4.1 Оптимізація продуктивності системи

Індекс ефективності, виражений через керуючі входи ( $V^s$  і  $f$ ) і змінну стану ( $\theta_1$ ); або оцінка якості, рівняння (35), виражене з точки зору параметрів системи (MRR і TWR), фактично формує поверхню відгуку, на якій оптимізується модель системи.

Існує багато методів оптимізації, з них можна виділити два основних:

- 1) оптимізація за допомогою варіаційного числення;
- 2) метод самооптимізації.

Градiєнтний метод або самооптимізації, використовувався для оптимізації показника ефективності в імітаційній моделі.

Цей метод та інші процедури самооптимізації будуть розглянуті в першу чергу.

В методиках, які використовують градієнтні методи, кроки щупа виконуються для визначення приблизного локального градієнта поверхні відгуку, а потім робиться більший крок в найкрутішому напрямку.

Логічна структура типової градієнтної методики для знаходження максимального значення функції  $H(f, V)$  схематично зображено у вигляді блок-схеми на рисунку 20.

На цій діаграмі  $\Delta f$  і  $\Delta V_s$  є поступовими змінами  $f$  і  $V_s$ , які називаються «зондами».

В методі проб і помилок напрямок крокової зміни незалежної змінної визначається або послідовно, або випадково. Тоді логіка керування визначає, чи слід робити крок на основі попередніх значень продуктивності в цьому напрямку.

Логічна структура типової методики проб і помилок для знаходження максимального значення функції  $H(f, V_s)$  зображена на блок-схемі (рис. 21).



Рисунок 20 – Градієнтний метод:

$F$ : – обчислене значення навантаження;  $V$ : – обчислене значення швидкості;  
 $STEP F$  – ступеневе збільшення навантаження;  $STEP V$  – ступеневе збільшення швидкості;  $H_1 = H_1 - H_0$ ;  $H_2 = H_2 - H_1$

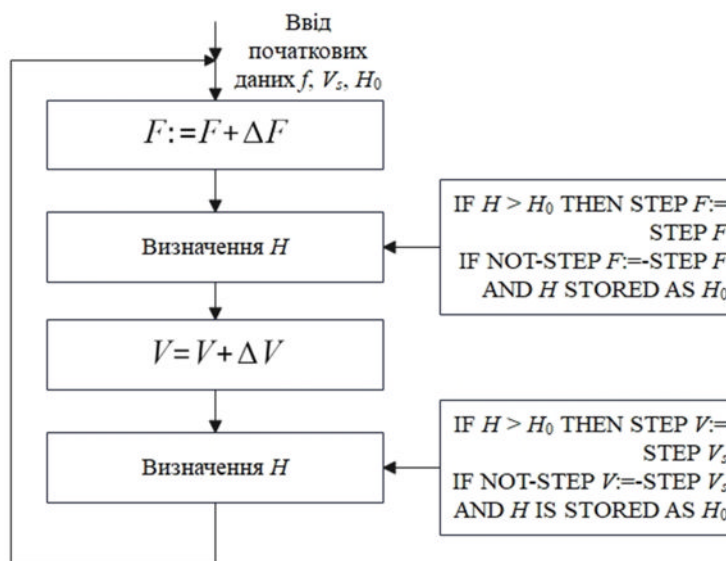


Рисунок 21 – Метод проб і помилок

На блок-схемі, показаній на малюнку 21, використовуються лише чотири напрямки пошуку ( $\pm\Delta f_p$ ,  $\pm\Delta V_{sp}$ ). В принципі кількість можливих напрямків пошуку не обмежена.

В ході досліджень було встановлено, що після кількох випробувань бажаний напрямок пошуку можна визначити, підраховавши кількість успішних кроків, зроблених в кожному напрямку. Таким чином найменш ймовірні напрямки пошуку можна виключити з подальших випробувань.

Можна змінити базовий метод проб і помилок і градієнтні методи для покращення їх продуктивності. Такі варіанти можна сформулювати таким чином.

1. Пропорційний розмір кроку. Розмір кроку приймається пропорційним деякій задалегідь визначеній швидкості зміни індексу ефективності.

2. Збільшення кроку до максимуму – в цьому випадку пошук триває вздовж заданого крокового напрямку, поки не буде досягнуто подальшого збільшення індексу ефективності.

3. Зменшення розміру кроку – цей варіант застосовується лише до методу проб і помилок. При цьому способі розмір кроку зменшується, якщо в пошуку встановлено циклічний шаблон.

4. Зміщення позиції пошуку – знову ж таки, це програма, адаптована лише до методу проб і помилок: у ній позиція пошуку зміщується з центру циклічного шаблону, якщо такий шаблон встановлено в пошуку.

Інший варіант простого методу проб і помилок називається методом Мугелеса і призначений для роботи за наявності меж або крайових обмежень на поверхні відгуку, яка представляє індекс ефективності. Його робота схожа на логіку проб і помилок, за винятком випадків, коли кроки в усіх напрямках не призводять до покращення, тоді запускаються спеціальні підпрограми RIDGE або EDGE.

Підпрограма RIDGE призначена для підтримки просування вздовж межі без зменшення розміру кроку. Це досягається шляхом кроку зонда до середини двох точок зонда з найвищим значенням.

Якщо отримане значення більше базового значення, то пошук починається

від середини; інакше оцінка положення межі здійснюється шляхом генерації квадратичної підгонки до трьох точок. Логічна структура RIDGE схематично проілюстрована блок-схемою, показаною на рисунку 22.

Програма EDGE подібна до RIDGE, але містить можливість блокування обмеженням одного або більше кроків зонду.

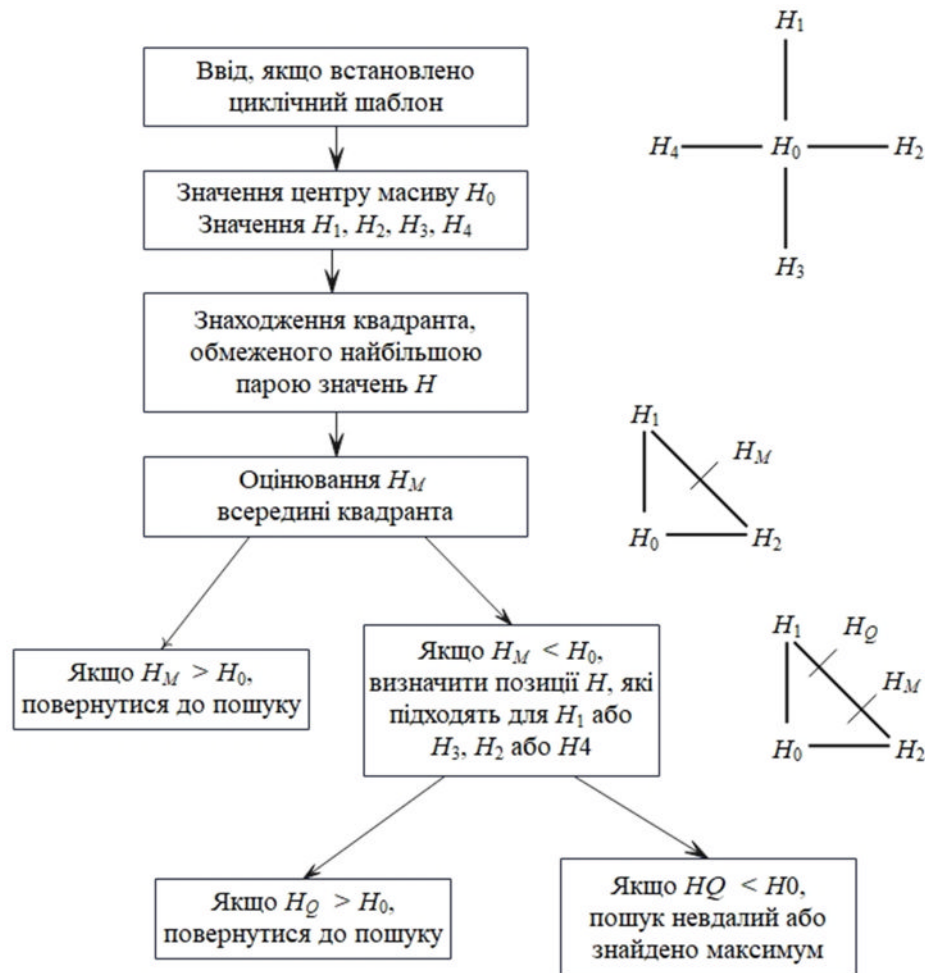


Рисунок 22 – Стратегія для RIDGE

Існує велика кількість цифрових комп'ютерних методик для визначення екстремумів функцій, чиї похідні не можуть бути оцінені. Це метод Розенброка, адаптація методу Розенброка Девісом, Своном і Кенпі, симплекс-метод і метод Пауелла.

Дослідження виявили, що всі чотири методи дають порівнювані результати на двовимірній поверхні відгуку, тому буде розглядатися лише метод Розенброка.

При цьому методі початковий крок робиться по заданій траєкторії. Якщо крок успішний, пошук продовжується в цьому напрямку з використанням більшого кроку. Проте, якщо крок невдалий, робляться менші кроки в протилежному напрямку, поки максимум вздовж цієї траєкторії не буде розташований з точністю до найменшого кроку.

Напрямки траєкторій генеруються під час пошуку, причому одна траєкторія узгоджується з найбільш вдалим на даний момент напрямком пошуку, а інші траєкторії ортогональні цьому напрямку. Логічна структура стратегії Розенброка схематично зображена на блок-схемі на рис. 23.

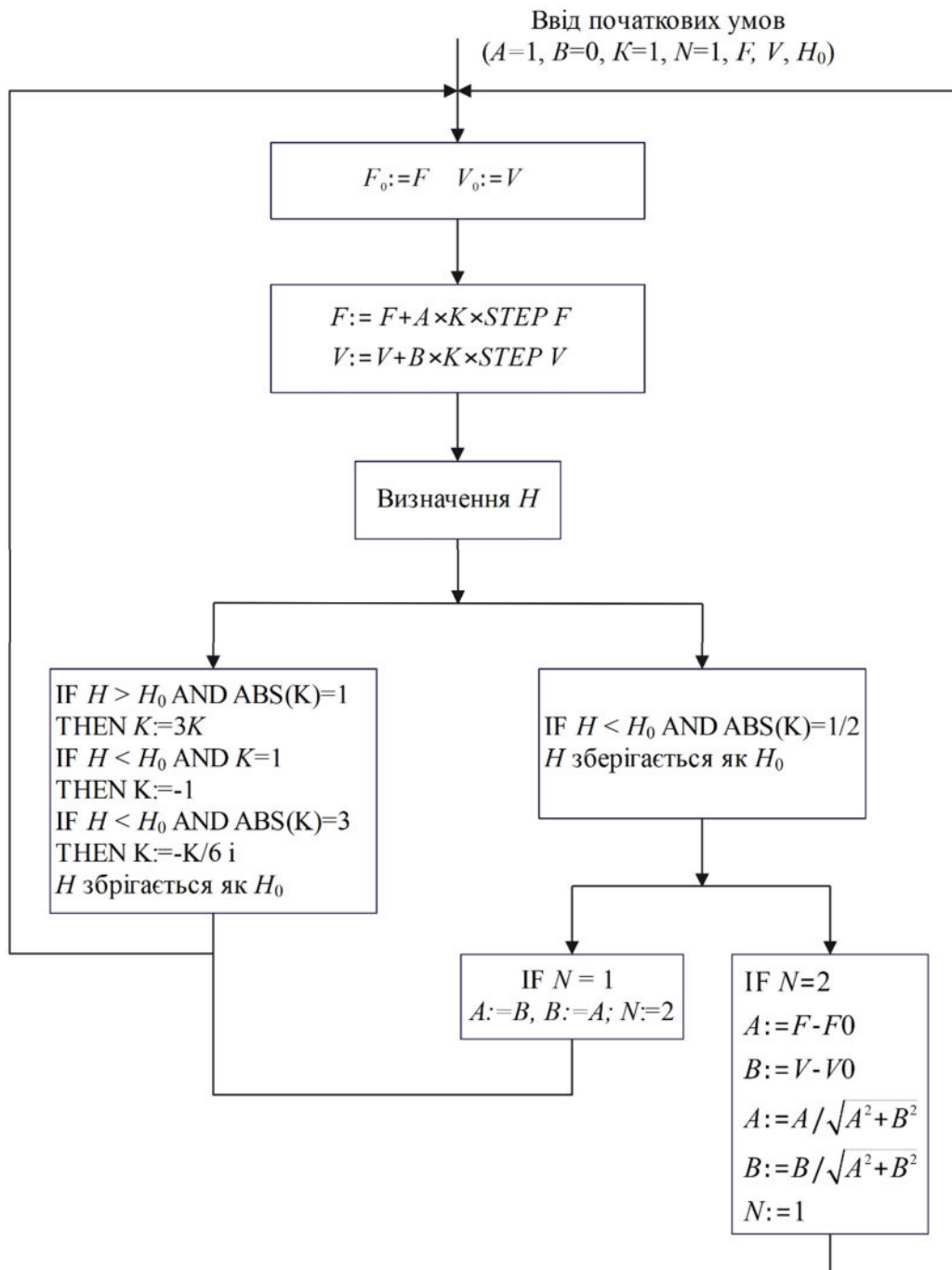


Рисунок 23 – Блок-схема алгоритму Розенброка

Попередні результати загалом охоплюють деякі з доступних зараз методик самооптимізації. Успішне використання цих процедур залежить від обчислювальних можливостей комп'ютера, економічних обмежень і порівняння відгуку та граничних характеристик системи з технікою оптимізації, розробленою для функціонування в цих умовах.

Альтернативним підходом до проблеми оптимізації, згаданим раніше, є принцип Понтрягіна, яка базується на представленні системи функцією стану та варіаційному численні.

## 4.2 Метод Понтрягіна для вирішення загальної задачі оптимального керування

Основою для використання принципу Понтрягіна є рівняння стану системи, визначене раніше. При використанні цього представлення системи, виникає проблема в знаходженні оптимального керування  $u(t)$ , або закон керування  $u = k[\theta(t), t]$ , який переводить систему  $\dot{\theta}(t) = f(\theta, u, t)$  з деякого початкового стану або стану при  $\theta^i = \theta(t_i)$ , до деякого термінального стану або умови  $\theta_f = \theta(t_f)$ , мінімізуючи інтегральний показник ефективності.

$$P.I. = \int_{t_i}^{t_f} L(\theta, u, t) dt. \quad (43)$$

Рівняння (42), індекс продуктивності, розроблений раніше, є миттєвим значенням загальної вартості обробки; виражений через змінну стану  $\theta_1$  та керуючі впливи  $V_s$  і  $f$ . Загальна вартість обробки для операції різання була задана раніше як:

$$(TMC)_{av} = \frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_f} (TMC)_{instant} dt, \quad (44)$$

$T$  – загальний час різання = const.

Порівнюючи рівняння (43) і (44), маємо:

$$L(\theta, u, t) = (TMC)_{instant}.$$

Метод Понтрягіна для вирішення загальної задачі оптимального керування базується на таких кроках (таблиця 1).

Таблиця 1 – Метод Понтрягіна

Крок 1	Формування $H$ -функції Понтрягіна $H(\theta, u, \lambda, t) = L(\theta, u, t) + \lambda^t F(x, u, t)$
Крок 2	Мінімізація $H(\theta, u, \lambda, t)$ відносно всіх допустимих векторів керування, які потрібно знайти $u^o = u^o(\theta, u, t)$ Оптимальне значення керуючого входу.
Крок 3	Знаходження оптимальної $H$ -функції $H^o(\theta, \lambda, t) = H(\theta, u^o, \lambda, t) = \min H(\theta, u, \lambda, t)$ $u$ повинно належати до контрольної області, яка обмежена граничними значеннями $V_s$ і $f$ .
Крок 4	Розв'язок системи з $N$ рівнянь $\dot{\theta} = \frac{H^o(\theta, \lambda, t)}{d};$ $\dot{\lambda} = -\frac{H^o(\theta, \lambda, t)}{d\theta},$ із заданою початковою та кінцевою граничною умовою та узагальненою граничною умовою $\left[ \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial \theta} \right]^T d\theta \Big _{t_f} + \left[ H^o(\theta, \lambda, t) + \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial t} \right] dt \Big _{t_f} = 0.$
Крок 5	Підстановка результатів кроку 4 у вираз для $u^o$ , для одержання оптимального контролю.

Наведена вище процедура включає додавання функції вартості кінцевого стану до попередньої інтегральної функції ефективності, виведеної раніше.

Тому

$$P.I. = \int_{t_i}^{t_f} L(\theta, u, t) dt + S[\theta(t_f), t_f]. \quad (45)$$

Оскільки не встановлено зв'язок між вартістю та кінцевою температурою інструменту, функція витрат дорівнює нулю, або

$$S[\theta(t_f), t_f] = 0.$$

Необхідно встановити системні обмеження:

1) максимальна подача – обмеження надмірних сил різання;



2) мінімальна подача – забезпечення мінімальної швидкості видалення металу;

3) максимальна швидкість шпинделя – запобігання надмірному зношенню інструменту та прогоранню поверхні;

4) мінімальна швидкість шпинделя – забезпечення мінімальної швидкості видалення металу та необхідну обробку поверхні.

Ці умови необхідно визначити експериментально. Початкові умови системи:

$$at t_i = 0,$$

$$\theta_1 = 0,$$

$$TWR = 0.$$

$$\frac{dH}{dt} = 0.$$

Остаточні умови системи можна визначити трьома способами.

Експериментально можна визначити максимальне значення зношення, при якому інструмент перестає задовільно здійснювати різання; і кінцеву температуру інструменту при цьому стані зношення. Якби процес різання був безперервним, можна було б також отримати остаточний час, але в більшості виробничих операцій (перерви на природні потреби, налаштування тощо) це було б неможливо.

Граничні умови системи можна визначити трьома способами.

Спосіб 1: кінцеві умови  $\theta(t_f)$  і  $t_f$  абсолютно не визначені. Значення  $dt$  і  $d\theta$  в загальній граничній умові,

$$\left[ \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial \theta} - \lambda \right]^T d\theta \Big|_{t_f} + \left[ H^o(\theta, \lambda, t) + \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial t} \right] dt \Big|_{t_f} = 0. \quad (46)$$

полягає в тому, що вони являють собою відхилення температури і часу відповідно, між кінцевими точками оптимальної траєкторії та деякої довільної варіаційної траєкторії. В цьому випадку  $\theta(t_f)$  і  $t_f$  вільні. Тому, щоб задовольнити рівність (46), необхідно, щоб

$$\left[ \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial \theta} - \lambda \right]^T d\theta \Big|_{t_f} = 0$$

i

$$\left[ H^o(\theta, \lambda, t) + \frac{\partial S(\theta, t)}{\partial \theta} \right]^T dt \Big|_{t_f} = 0.$$

Оскільки  $(\theta, t) = 0$ , то можна записати

$$[-\lambda]^T d\theta \Big|_{t_f} = 0$$

i

$$[H^o(\theta, \lambda, t)]^T dt \Big|_{t_f} = 0.$$

Спосіб 2. Кінцева умова  $\theta(t_f)$  визначена експериментально, а  $t_f$  не визначено. В цьому випадку  $d\theta$  дорівнює нулю, оскільки всі траєкторії мають закінчуватися при однаковій температурі, але  $dt$  є довільним, так що

$$[H^o(\theta, \lambda, t)]^T dt \Big|_{t_f} = 0.$$

Спосіб 3. Граничні умови  $\theta(t_f)$  і  $t_f$  визначені, а тому і  $d\theta$ , і  $dt$  дорівнюють нулю; а узагальнена гранична умова спрощено задовольняється без подальших обмежень на кінцеві значення  $\theta$ ,  $\lambda$  або  $H^o$ .

Метод Понтрягіна, хоча і досить простий, може бути дуже трудомісткою процедурою, яку можна виконати вручну, особливо для такої великої системи рівнянь, як ті, що описані раніше. Загалом, чим більша система рівнянь, тим важче знайти розв'язок, навіть за допомогою комп'ютера. Для ілюстрації процедури та проблем, які можуть виникнути, розроблено систему другого порядку (рис. 24).

$$ce \frac{d\theta_1}{dt} b(\Delta X) (\Delta Y) = \frac{k_1(\Delta X_1)}{\Delta Y} b(\theta_0 - \theta_1) - \frac{k_2(\Delta X_1)}{\Delta Y} + \frac{k_3 \Delta Y}{\Delta X_1} \quad (47)$$

$$\begin{aligned}
& (\theta_A - \theta_1) - \frac{k(\Delta Y)b}{(\Delta X_1 + \Delta X_2)} (\theta_1 - \theta_2) \\
ce \frac{d\theta_2}{dt} 2b(\Delta X_2)\Delta Y &= k_2 \frac{(\Delta X_2)}{\Delta Y} b(\theta_{t_4} - \theta_2) - \frac{k_2 \Delta X_2 b}{\Delta Y} (\theta_2 - \theta_{t_2}) + \\
& \frac{k_4 \Delta Y}{(X_1 + X_2)} b(\theta_1 - \theta_2) - \frac{k_2 \Delta Y b}{\Delta X_2} (\theta_2 - \theta_{t_3})
\end{aligned} \tag{48}$$

отже

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{k_1}{ce} \frac{1}{(\Delta Y)^2}, \quad K_2 = \frac{k_2}{ce} \frac{1}{(\Delta Y)^2}; \quad K_3 = \frac{k_3}{ce} \frac{1}{(\Delta X_1)^2} \\
K_4 &= \frac{k_4}{ce} \frac{1}{\frac{(\Delta X_1 + \Delta X_2)\Delta X_1}{2}}, \quad K_5 = \frac{k_4}{ce} \frac{1}{\frac{(\Delta X_1 + \Delta X_2)\Delta X_2}{2}}; \quad K_6 = \frac{k_2}{ce} \frac{1}{(\Delta X_2)^2}.
\end{aligned}$$

де  $\theta_A$  – температура навколишнього середовища;

$k_4$  – теплопровідність інструменту;

$k_4$  – інструментальний коефіцієнт конвекції;

$k_4$  – теплопровідність комбінованого інструменту-інструментотримача;

$k_4$  – теплопровідність на межі інструмент-датчик;

$\theta_{th}$  – температура інструментотримача.

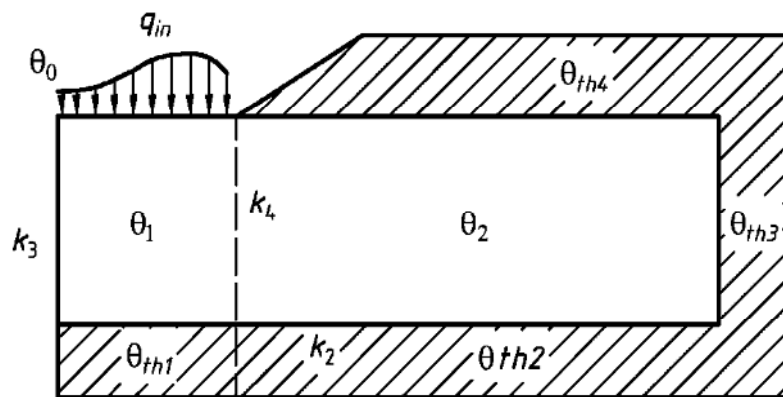


Рисунок 24 – Спрощена інструментальна модель, яка використовується для ілюстрації принципу Понтрягіна

Підставляючи в рівняння (47) і (48)

$$\theta_1 = K_1(\theta_0 - \theta_1) - K_2(\theta_1 - \theta_{t_1}) + K_3(\theta_A - \theta_1) - K_4(\theta_1 - \theta_2). \tag{49}$$

$$\theta_2 = K_2(\theta_{t-4} - \theta_2) - K_2(\theta_2 - \theta_{t-2}) + K_5(\theta_1 - \theta_2) - K_6(\theta_2 - \theta_{t-3}). \quad (50)$$

Нехай

$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = A_2;$$

$$K_1 = A_1 = B;$$

$$2K_2 + K_5 + K_6 = A_3;$$

$$K_4 = A_4;$$

$$K_5 = A_5.$$

Еталонна температура  $\theta_A = 0$ , і припускаючи, що початково  $\theta_A = \theta_{t-1} = \theta_{t-2} = \theta_{t-3} = \theta_{t-4}$  отримують такі рівняння

$$\dot{\theta}_1 = -A_2\theta_1 + A_4\theta_2 + B\theta_0. \quad (51)$$

$$\dot{\theta}_2 = -A_5\theta_1 - A_3\theta_2. \quad (52)$$

Або в матричній формі

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_2 & A_4 \\ A_5 & A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} [\theta_0].$$

Індекс продуктивності був заданий формулою (42) як

$$(TMC)_i = \frac{K_9}{V_s f} + \frac{K_{10}}{V_s f} (A_1 f^{a1} + A_2 f^{a2} \theta_1 + A_3 f^{a3} V_s^{a4}) + K_8.$$

Якщо припустити, що глибина різання постійна, то оптимізація наступного рівняння повинна оптимізувати систему.

$$L(\theta, u, t) = \frac{C_7}{V_s f} + \frac{C_8}{V_s f} (A_1 f^{n1} + A_2 f^{n2} \theta_1 + A_3 f^{n3} V_s^{n4}).$$

Наведені вище константи необхідно переоцінювати для кожної зміни глибини різання.

Експериментально було виявлено, що середню температуру на межі розділу

інструмент-стружка можна виразити як

$$\theta_0 = K(fV_s)^m.$$

Нехай  $B1 = BK$ ;  $u_1 = f$ ;  $u_2 = V_s$ .

Матричне рівняння стає

$$F(\theta, u, t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_2 & A_4 \\ A_5 & -A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} [u_1 u_2]^m$$

і

$$L(\theta, u, t) = C_7(u_1 u_2)^{-1} + C_8(u_1 u_2)^{-1} [a_1 u_1^{n_1} + a_2 u_1^{n_2} \theta_1 + a_3 u_1^{n_3} u_2^{n_4}].$$

Приймаємо

$$u_1^{n_3} u_2^{n_4} = (u_1 u_2)^{m_1};$$

$$u_1 u_2 = u_3.$$

Тоді

$$F(\theta, u, t) = \begin{bmatrix} -A_2 & A_4 \\ A_5 & -A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} [u_3]^m. \quad (53)$$

$$L(\theta, u, t) = u_3^{-1} C_7 + C_8 u_1^{n_1} + a_2 u_1^{n_2} \theta_1 + a_3 u_3^{m_1}. \quad (54)$$

Дотримуючись поетапної процедури, описаної раніше

$$\begin{aligned} H(\theta, u, \lambda, t) &= L(\theta, u, t) + \lambda^T F(\theta, u, t) \\ &= C_7 u_3^{-1} + C_8 [a_1 u_1^{n_1} + a_2 u_1^{n_2} \theta_1 + a_3 u_1^{n_3} u_2^{n_4}] + [\lambda_1 \lambda_2] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \\ &= C_7 u_3^{-1} + C_8 [a_1 u_1^{n_1} + a_2 u_1^{n_2} \theta_1 + a_3 u_3^{m_1}] + \lambda_1 (-A_2 \theta_1 + A_4 \theta_2 + B_1 u_3^m) + \\ &\quad \lambda_2 (A_5 \theta_1 - A_3 \theta_2). \end{aligned}$$

$$\text{а) } \frac{\partial H}{\partial u_1} = 0 = C_4 a_1 n_1 u_1^{n_1-1} u_3^{-1} + C_4 a_2 n_2 u_1^{n_2-1} u_3^{-1} \theta_1 = a_1 n_1 u_1^{n_1-1} + a_2 n_2 u_1^{n_2-1} \theta_1;$$

$$\text{б) } \frac{\partial H}{\partial u_2} = 0;$$

$$\text{в) } \frac{\partial H}{\partial u_3} = -C_3 u_3^{-2} - C_4 a_1 u_1^{n_1} u_3^{-2} - C_4 a_2 u_1^{n_2} u_3^{-2} \theta_1 + C_4 a_3 (m_1 - 1) u_3^{m_1-1} +$$

$$\lambda_1 B_1 m u_3^{m-1} = 0.$$

З формули (а)

$$a_1 n_1 u_1^{n_1-1} = -a_2 n_2 u_1^{n_2-1} \theta_1;$$

$$u_1^{n_1-1} = \frac{-a_2 n_2}{a_1 n_1} u_1^{n_2-1} \theta_1;$$

$$u_1^{n_1-n_2} = \frac{-a_2 n_2}{a_1 n_1} \theta_1;$$

$$u_1 = \frac{-a_2 n_2^{n_2-n_1}}{a_1 n_1} \theta_1^{n_2-n_1}.$$

Нехай

$$D_1 = \left[ \frac{-a_2 n_2}{a_1 n_1} \right]^{n_2-n_1};$$

$$d_1 = n_2 - n_1.$$

З формули (в)

$$-u_3^{-2} (C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 u_1^{n_2} \theta_1) + C_4 a_3 (m_1 - 1) u_3^{m_1-1} + \lambda_1 B_1 m u_3^{m-1} = 0.$$

$$-(C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 u_1^{n_2} \theta_1) + C_4 a_3 (m_1 - 1) u_3^{m_1} + \lambda_1 B_1 m u_3^{m-1} = 0.$$

Розв'язання цього рівняння для  $u_3$  надзвичайно складне без фактичних значень, тому виконаємо наближення рішення для цих можливих випадків.

Випадок 1.

$$m_1 \simeq m + 1 = m_2.$$

$$\frac{C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 u_1^{n_2} \theta_1}{C_4 a_3 (m_1 - 1) + \lambda_1 B_1 m} = u_3^{m_2}.$$

$$u_3^o = \left[ \frac{C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 \theta_1 u_1^{n_2}}{C_4 a_3 (m_1 - 1) + \lambda_1 B_1 m} \right]^{-m_2}.$$

Випадок 2

$$m + 1 \gg m_1.$$

$$u_3^o = \left[ \frac{C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 u_1^{n_2} \theta_1}{u_1 B_1 m} \right]^{-(m-1)}.$$

Випадок 3

$$m + 1 \gg m_1.$$

$$u_3^o = \left[ \frac{C_3 + C_4 a_1 u_1^{n_1} + C_4 a_2 u_1^{n_2} \theta_1}{u_1 B_1 m} \right]^{-(m-1)}.$$

Оскільки форма рівнянь для всіх трьох випадків однакова (відрізняється лише знаменник), а мета полягає лише в тому, щоб проілюструвати процедуру, можна продовжити оптимізацію, використовуючи рівняння для випадку 1.

Приймаємо

$$D_2 = C_4 a_1, \quad D_3 = C_4 a_2, \quad D_4 = C_4 a_3 (m_1 - 1), \quad D_5 = B_1 m.$$

$$u_3^o = \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{C_3 + D_2 u_1^{n_1} + D_3 u_1^{n_2} \theta_1} \right]^{m_2}.$$

Але оскільки відомо, що  $u_1^o = D_1 \theta_1 d_1$ , то

$$u_3^o = \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{C_3 + D_1 D_2 \theta_1^{n_2} + D_3 D_1 \theta_1^{2n_2-1} \theta_1} \right]^{m_2}.$$

$$d_2 = 2n_2 - n_1 + 1.$$

$$E_1 = C_3.$$

$$E_2 = D_2 D_1.$$

$$E_3 = D_3 D_1.$$

$$u_3^o = \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_2}.$$

Оптимальну вхідну швидкість шпинделя можна визначити із співвідношення

$$u_1 u_2 = u_3;$$

$$u_2 = \frac{u_3}{u_1}.$$

$$u_2^o = \frac{\left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_2}}{D_1 \theta_1^{d_1}}.$$

$$H^o = \left[ \frac{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d}{D_4 + \lambda_1 D_5} \right]^{m_2} \left\{ E_1 + C_4 a_1 D_1 \theta_1^{d_1 n_1} + a_2 D_1 \theta_1^{d_1 d} \theta_1 + \right. \\ \left. a_3 \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_1 m_2} \right\} + \\ \lambda_1 \left( -A_1 \theta_1 + A_4 \theta_2 + B_1 \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_2 m} \right) + \lambda_5 (A_5 \theta_1 + A_3 \theta_2).$$

$$\frac{\partial H^o}{\partial \theta_1} = -A_1 \theta_1 + A_4 \theta_2 + B_1 \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_2 m} = \dot{\theta}_1.$$

$$\frac{\partial H^o}{\partial \theta_2} = A_5 \theta_1 - A_3 \theta_2 = \dot{\theta}_2.$$

$$TERM I = \frac{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^{d_2}}{D_4 + \lambda_1 D_5}.$$

$$\frac{-\partial H^o}{\partial \theta_1} = m_2 (TERM I)^{m_2-1} \left\{ E_1 + C_4 a_1 D_1 \theta_1^{d_1 n_1} + a_2 D_1 \theta_1^{d_1 d} \theta_1 + \right. \\ \left. a_3 \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d} \right]^{m_1 m_2} \right\} \left\{ \frac{n_2 E_2 \theta_1^{n_2-1} + d_3 E_3 \theta_1^{d_2-1}}{D_4 + \lambda_1 D_5} \right\} + \\ (TERM I)^{m_2} \left\{ d_1 n_1 C_4 a_1 D_1 \theta_1^{d_1 n_1-1} + a_2 D_1 (d_1 d_2 + 1) \theta_1^{d_1 d} + \right. \\ \left. a_3 \left\{ \frac{-(n_2 E_2 \theta_1^{n_2-1} + E_3 d_2 \theta_1^{d_1 n_1-1})}{(E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^d)^2} (m_1 m_2) \left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^{s_2}} \right]^{m_1 m_2-1} \right\} \right\} \\ \frac{-\partial H}{\partial \theta_2} = \lambda_1 A_4 - \lambda_2 A_3 = \dot{\lambda}_2.$$

Розв'язання цієї системи рівнянь теоретично можливе, оскільки є чотири рівняння та чотири невідомих  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ . Однак нелінійні члени ускладнюють проблему, роблячи розв'язок дуже складним. Потрібно отримати рішення для  $\theta_1$  і  $\lambda_1$  як функції часу, щоб їх можна було підставити в рівняння для  $u_1^o$ ,  $u_2^o$  і  $u_3^o$  для



визначення оптимальних значень швидкості подачі як функції часу різання системи, як показано на схемі (рис.25).

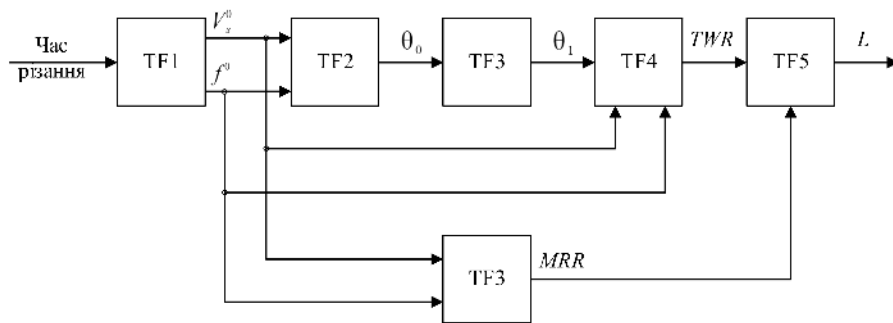


Рисунок 25 – Оптимальна система з відкритим контуром

Під час процедури оптимізації також були розроблені деякі корисні зв'язки, які можуть бути корисними для сприяння контролю системи шляхом забезпечення проміжних циклів зворотного зв'язку.

Наприклад, було встановлено, що

$$u_1^o = f^o D_1 \theta_1^{d_1}$$

і

$$u_2^o = V_s^o = \frac{\left[ \frac{D_4 + \lambda_1 D_5}{E_1 + E_2 \theta_1^{n_2} + E_3 \theta_1^{d_2}} \right]^{m_2}}{D_1 \theta_1^{d_1}}.$$

Просто вимірюючи дистанційну температуру, можна визначити оптимальну витрату матеріалу. Для визначення оптимальної швидкості обертання шпинделя  $V_s^o$  залежно від часу окрім вимірюваного значення  $\theta_1$  необхідне значення якщо  $\lambda_1$ . Система, зображена на рис. 26, включає проміжний контур зворотного зв'язку, який використовує ці співвідношення.

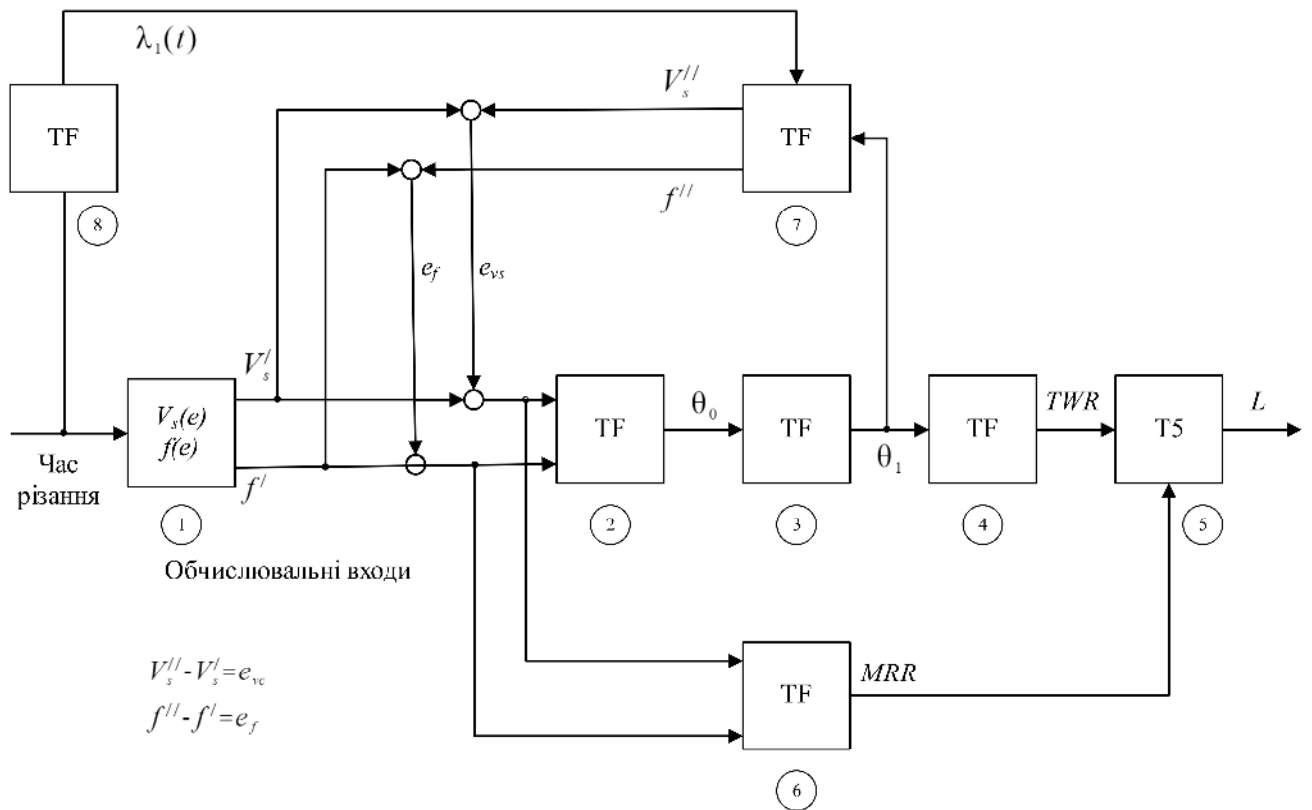


Рисунок 26 – Система з відкритим циклом і зворотнім зв'язком

Важко сказати, яким буде точний ефект такого циклу зворотного зв'язку. Якщо між обчисленими керуючими входними сигналами та значеннями керуючих змінних, обчислених за допомогою  $\theta_1$ , існує великий часовий проміжок, сигнал помилки не відповідатиме різниці між обчисленими значеннями та вимірюваними значеннями і може внести помилку в систему, яка може працювати точно без додаткового циклу. Однак якщо  $V_s$  і  $f$  дуже малі (поза діапазоном значущості, який використовується системою), а часовий проміжок між блоками 1 і 3 дуже малий, тоді вимірюване значення відповідає розрахованому контрольному значенню, і цикл зворотного зв'язку може бути корисним для зменшення помилки.

## 5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 5.1 Програмне забезпечення для моделювання

Програма аналогового моделювання LEANS призначена для моделювання процесів теплопередачі, продуктивності і оптимізації, складається з набору інтеграторів, визначників, констант, множників тощо, які використовуються як сполучні елементи. Кожен модуль програми складається з блоків. Узагальнена структура блоку наведена на рис. 27.

Структура всієї системи зображена на рис. 28, а блок-схеми окремих модулів – на рис. 29 - 32.

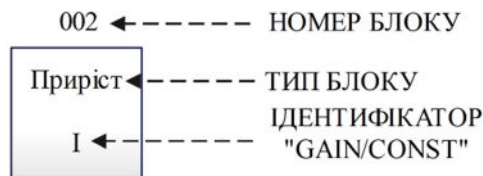


Рисунок 27 – Загальне представлення блоку

#### Модуль I. Процес різання – взаємодія стружки та інструменту.

Загальне рівняння

$$\theta_0 = (A + Bt + C(t - 100)^2) V_s^{n_1} f^{n_2} d^{n_3},$$

де  $A = 355,7;$

$B = 0,2;$

$C = 1;$

$n_1 = 0,316;$

$n_2 = 0,03399;$

$n_3 = 0,107965.$

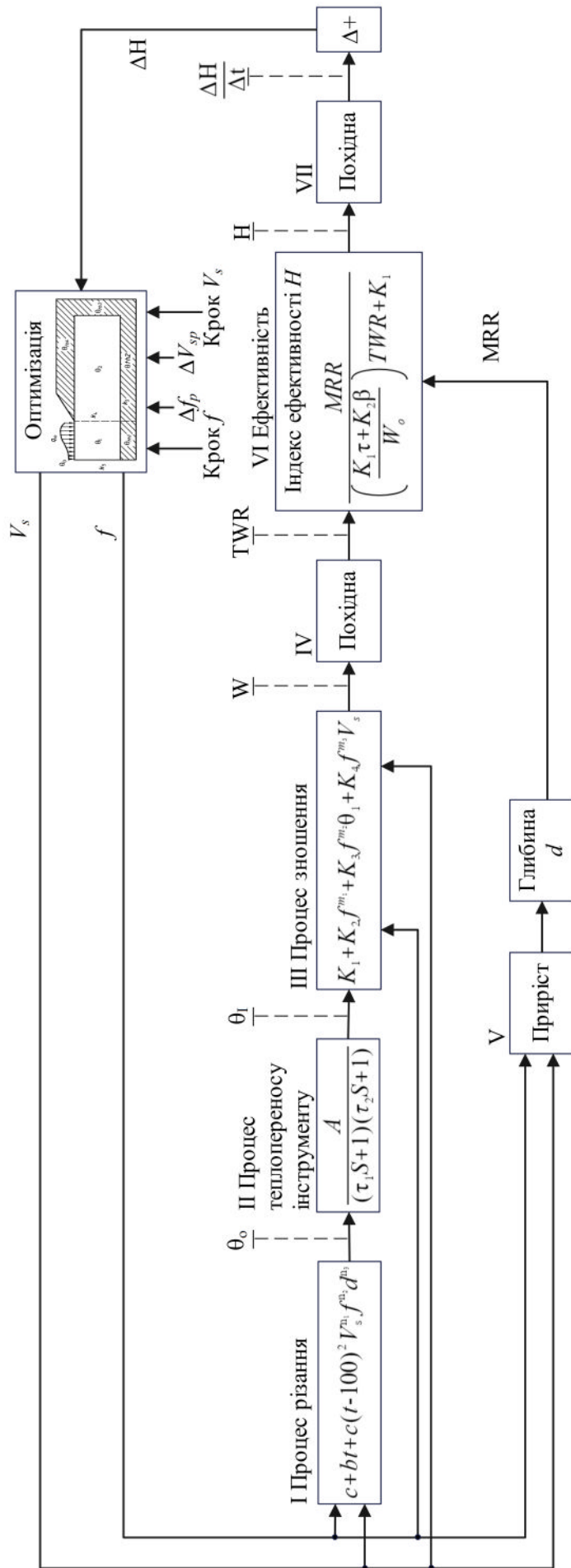


Рисунок 28 – Загальна структура системи

## Модуль II – Процес теплопередачі через інструмент

Рівняння 1

$$\theta_1 = \left[ \frac{A}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} \right] \theta_0 = \left\{ \frac{1/S}{\tau_1 + 1/S} \right\} \left[ \frac{1/S}{\tau_2 + 1/S} \right] A \theta_0,$$

де  $A = 0,7056$ ;

$\tau_1 = 2,47$ ;  $\tau_2 = 0,1$ .

Рівняння 2

$$\theta_1 = K \left[ \frac{\tau_2 S + 1}{(S + A)(S + B)} \right] \theta_0 = K \left[ \left( \frac{\tau_2 + 1/S}{1 + A/S} \right) \left( \frac{1/S}{1 + B/S} \right) \right] \theta_0,$$

де  $A = 2,0033$ ;

$K = 0,3018$ ;

$B = 0,19914$ ;

$\tau_2 = 2,032$ .

## Модуль III – Процес зношування інструменту

Цей процес задано рівнянням у формі:

$$W = K_1 + K_2 f^{m_1} + K_3 f^{m_2} \theta_1 + K_4 f^{m_4} v_5^{m_3},$$

де  $K_1 = 0,000905$ ;

$m_1 = m_2 = 3,13$ ;

$K_2 = K_3 = 10$ ;

$m_3 = m_4 = 0,5$ ;

$K_4 = 0,001078$ .

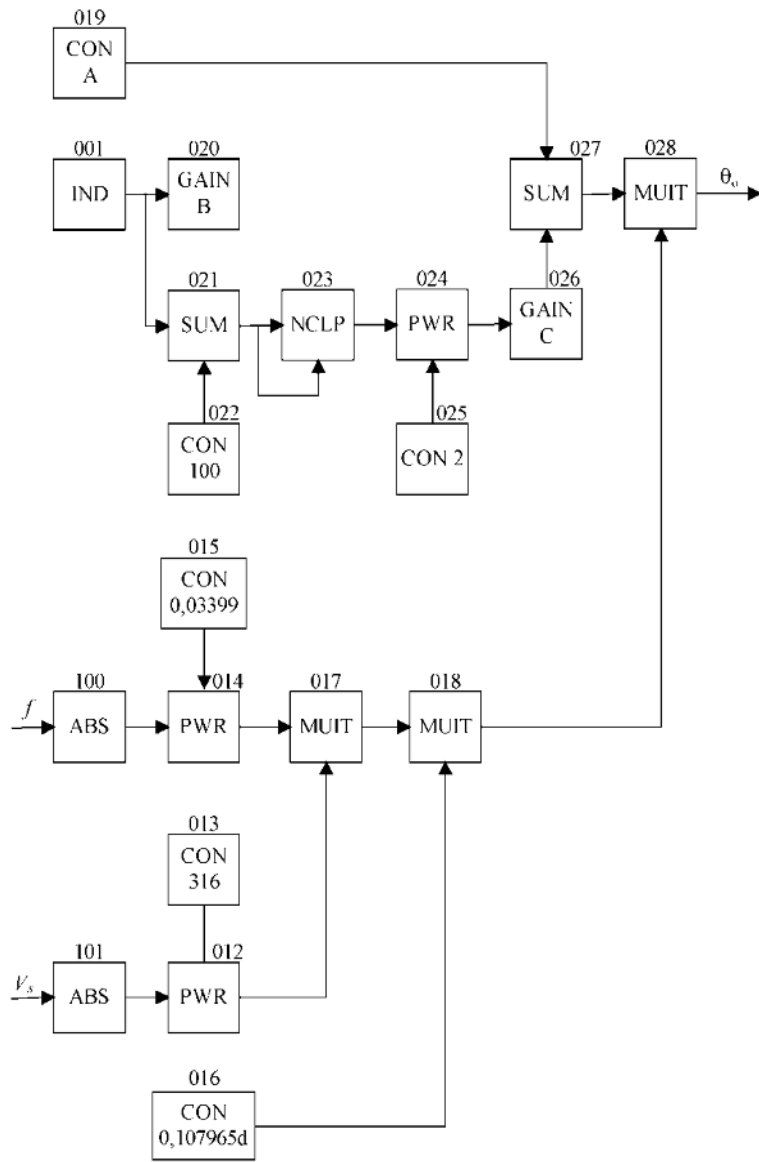


Рисунок 29 – Модуль дослідження динаміки різання

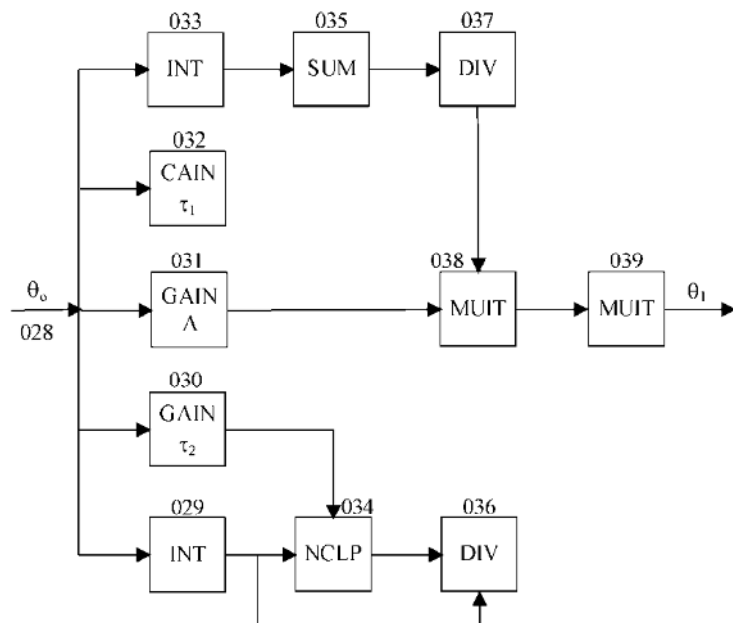


Рисунок 30 – Модуль визначення теплопередачі через інструмент за рівнянням 1

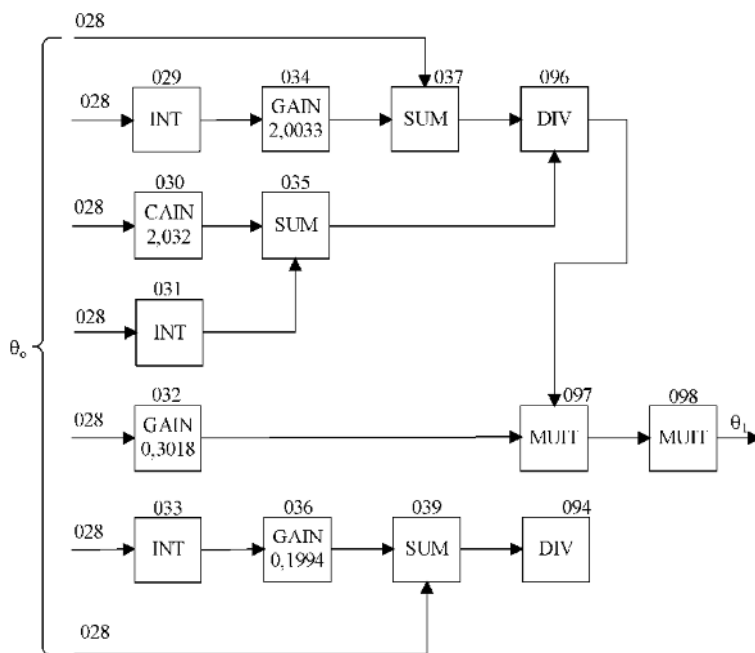


Рисунок 31 – Модуль визначення теплопередачі через інструмент за рівнянням 2

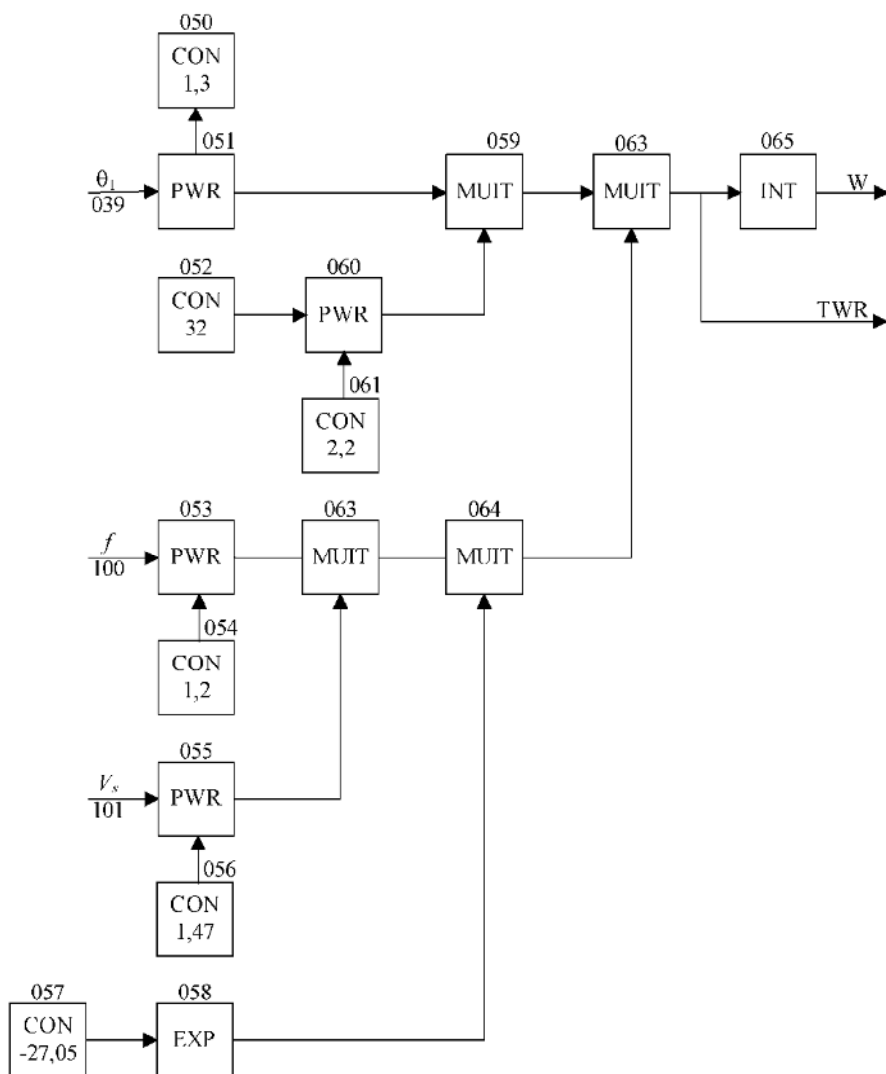


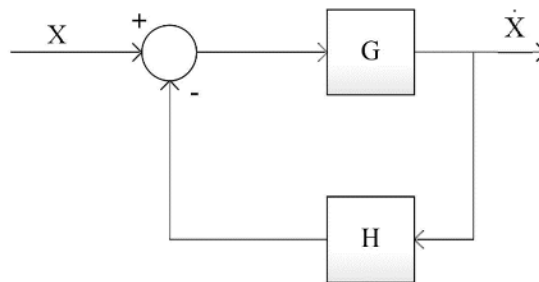
Рисунок 32 – Процес зношування інструменту (модель 1)

## 5.2 Дослідження швидкості зношення інструменту

Зношення розраховується так, щоб можна було визначити швидкість зношування інструменту, необхідну для оцінки добротності  $H$ . Незважаючи на те, програма містить блок, специфічною функцією якого є визначення похідної величини за часом, процедура розрахунку похідної має тенденцію ставати нестабільною за певних умов, використовуваних під час моделювання системи обробки. Щоб уникнути цієї проблеми, було використано наступне наближення для обчислення похідних величин у системі.

Нехай  $X$  – будь-яка загальна величина, а  $\dot{X}$  – похідна.

Тоді  $X$  і  $\dot{X}$  співвідносяться як



або

$$X \left[ \frac{G}{1 + GH} \right] = \dot{X}$$

Якщо  $H = 1/S$ , де  $S$  є оператором, і ділення на  $G$ , яке має деяке відносно велике значення ( $G \gg 0$ ), то

$$X \left[ \frac{1}{\frac{1}{G} + \frac{1}{S}} \right] = \dot{X}$$

або

$$XS \cong \dot{\phantom{X}}$$

Були проведені тести для порівняння двох методів розрахунку для похідної.



Було використано спрощене рівняння зношення, щоб похідний блок працював задовільно. Використане рівняння було таким самим, як рівняння (41), однак швидкість, подача та глибина різання залишалися постійними, а температура вводилася як змінна функція часу.

Результати виявилися ідентичними.

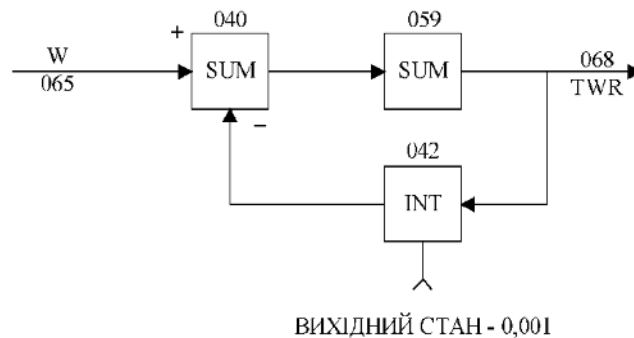


Рисунок 33 – Швидкість зношення інструменту (модель 1)

### 5.3 Альтернативна процедура розрахунку інтенсивності зношення інструменту

Було проведено кілька моделювання всієї системи обробки з використанням рівняння зношення (41) для визначення швидкості зношення інструменту.

Було виявлено, що ця процедура створила нереалістичну реакцію швидкості зношення інструменту на зміни швидкості шпинделя та швидкості подачі. З параметром продуктивності  $V$ , встановленим на 0,5 у всіх варіантах моделювання, логіка керування намагається збільшити, утримувати стабільно або зменшувати з найнижчою можливою швидкістю швидкість видалення металу (продуктивність), одночасно зменшуючи або утримуючи стабільність близько нуля швидкості зношення інструменту. З використанням рівняння зношення (41) це досягається збільшенням швидкості подачі при зменшенні швидкості шпинделя.

Включення конкретного рівняння зношення в модель системи дає можливість розрахувати будь-яке значення зношення в будь-який момент часу. В процесі моделювання можна спостерігати, що коли TWR стає дуже малим

(наближається до нуля), процедура оптимізації обчислює значення контрольних вхідних даних, які призведуть до того, що зношення в поточний момент часу буде меншим (на дуже малу величину), ніж значення, розраховане для останнього моменту часу. Це призводить до одержання негативного значення зношення інструменту. Отже, проблема полягає в тому, що зношення інструменту може набувати негативного значення в момент, коли змінюються умови різання (негативний зношення виникає після значного зниження швидкості та лише незначного збільшення швидкості подачі). Щоб усунути цю проблему, швидкість зношення інструменту розраховують за залежністю

$$TWR = KV_s^{R_1 R_2} H^{R_3} \theta_1^{R_4},$$

де  $K$  – constant =  $e^{-27,05}$ ;

$R_1$  – constant = 1,47;

$H$  – твердість; вважається постійною = 32,0 Rockwell

$R_2$  – constant = 2,2;

$R_3$  – constant = 1,3.

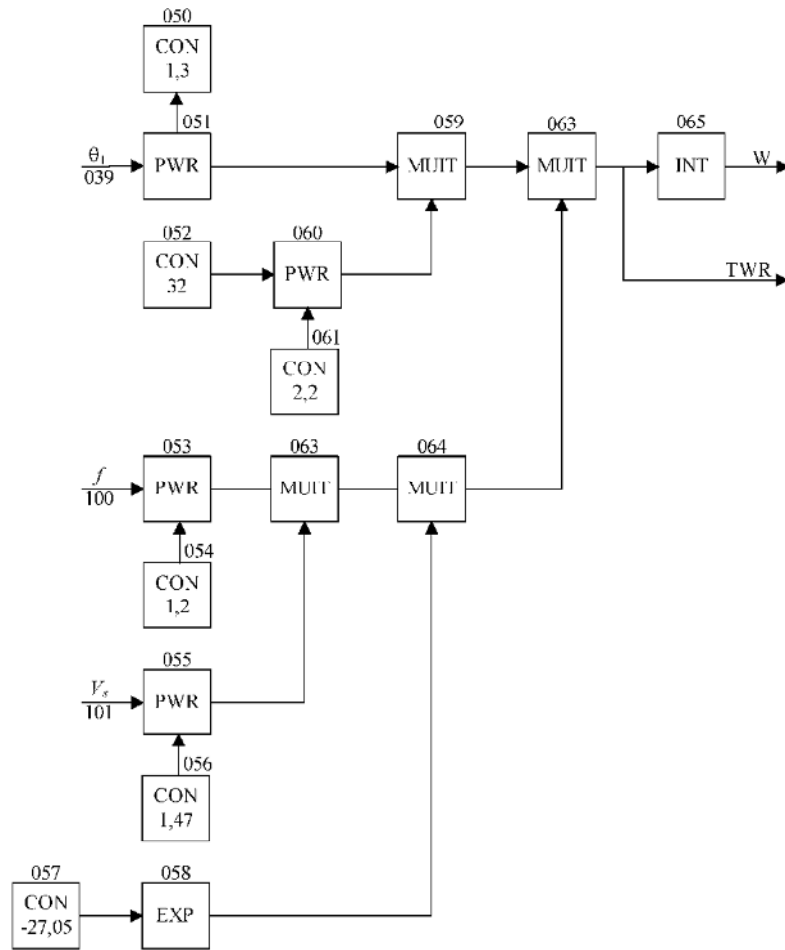


Рисунок 34 – Швидкість зношення інструменту (модель II)

Розрахунок швидкості зняття металу

$$MRR = V_s f d,$$

де  $d = 0,05$ .

$K_a = 5,08$  мм/с або 304 мм/хв.

Блок- схема процедури розрахунку за альтернативною методикою наведена на рис. 35.

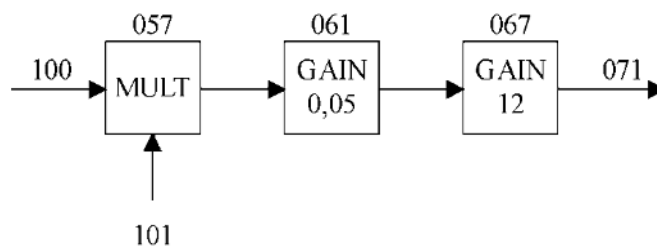


Рисунок 35 – Швидкість видалення матеріалу

Показник ефективності визначається за залежністю

$$H = \frac{MRR}{\left[ \frac{K_1 \tau + K_2 B}{W} \right] WR + K_1}$$

де  $K_1 = 0,011$ ;

$K_2 = 6,67$ ;

$\tau = 300$  с;

$W_o = 0,05$  мм або  $0,12$  мм;

$B = 0,5$ .

Значення  $B = 0$  приймається при оцінці продуктивності, а  $B = 1$  при оцінці продуктивності.

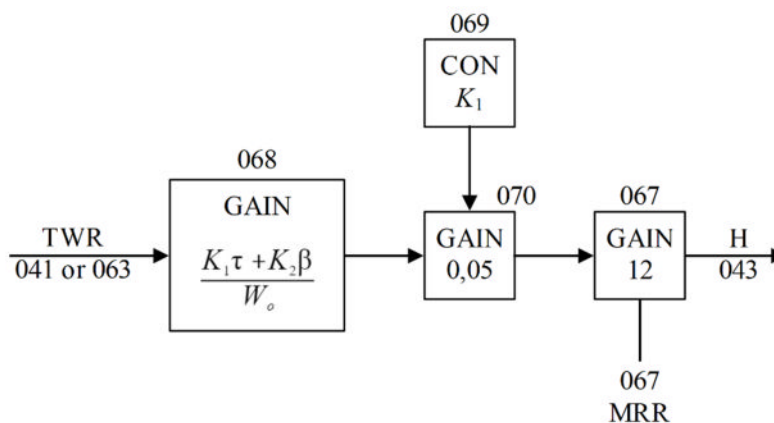


Рисунок 36 – Діаграма переваг

67

Розрахунок  $H$  з використанням похідної апроксимації.

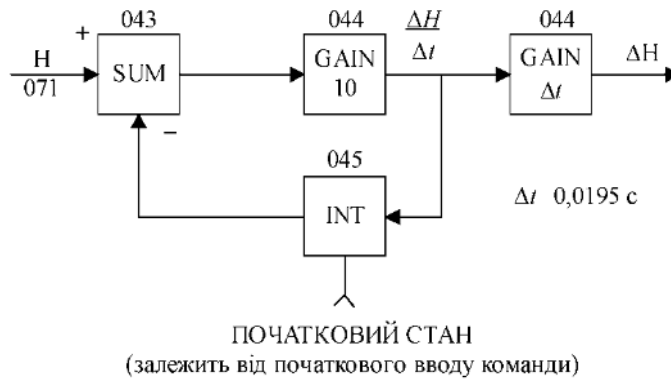


Рисунок 37 – Обчислення  $\Delta H$

## 5.4 Оптимізація процесу механічної обробки

Техніка градієнтної оптимізації була єдиною процедурою пошуку, яка використовувалася при моделювання механічної обробки. Блок-схема зображена на рис. 20. Збільшення подачі (крок  $f$ ) і швидкості (крок  $V_s$ ) по черзі виходить з блоку 080 кожних 0,975 с. Ці значення множаться на градієнт  $\Delta H_1 / \sqrt{\Delta H_1^2 + H_2^2}$ , який обчислюється між блоками 010 і 089, для отримання змін швидкості  $\Delta V_s$  і подачі  $\Delta f$ . Значення приросту подачі ( $\Delta f$ ) і швидкості ( $\Delta V_s$ ) по черзі вводяться в систему через кожних 0,975 секунд і сумуються з новими значеннями подачі  $f'$  і швидкості  $V'$  в блоках 110, 111, щоб визначити величину і напрямок градієнта.

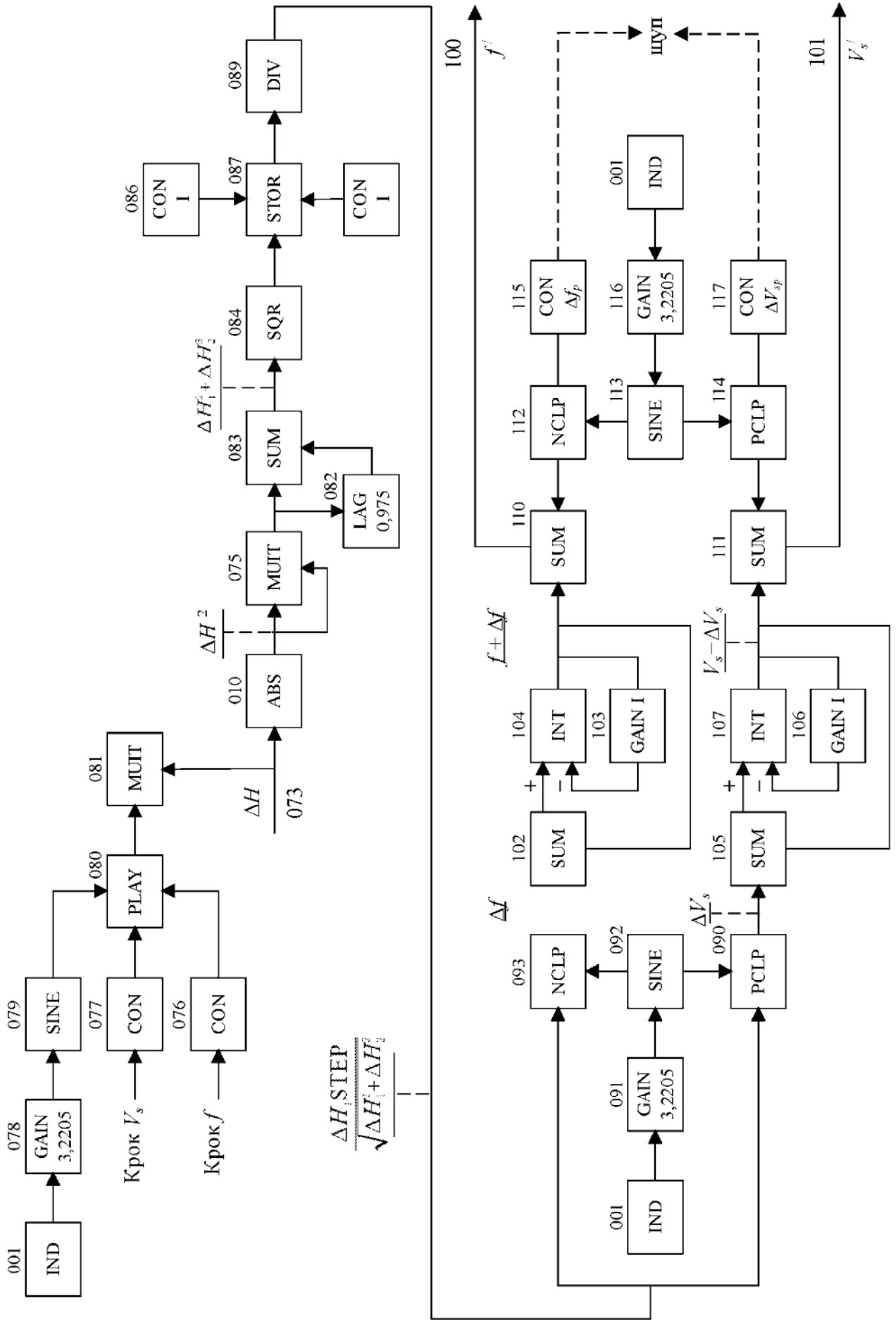


Рисунок 38 – Блок-схема процедури оптимізації

Зміни швидкості  $\Delta V_s$  і подачі  $\Delta f$  додаються до попередніх значень швидкості та подачі для визначення нових значень  $f'$  і  $V_s'$  в блоках 102 і 105. Цикли, які створюються інтеграторами 104, 107 і підсиленнями 103, 106, є лише процедурою усереднення. Іншими словами, значення, що виходять з блоків 102, 105 приблизно дорівнює вихідним інтеграторам 104, 107. Єдине завдання блоків 104, 107 полягає в тому, щоб виконувати обчислювальні процедури програми.

## 5.5 Результати моделювання

Моделюючи обчислення було виконано за декілька проходів з використанням чотирьох наборів початкових умов різання (табл. 2).

Таблиця 2 – Початкові умови різання

	Частота обертання шпинделя, $\text{хв}^{-1}$	Подача, мм/об.
Умова 1	2040	0,2642
Умова 2	3570	0,2642
Умова 3	2040	0,2286
Умова 4	3570	0,5182

Для кожної з цих умов була змодельована робота двох різних моделей систем обробки, що призвело до восьми запусків програми.

Модель I включала рівняння зношення (41) і процедуру швидкості зношення інструменту (TWR), показану на рис. 33.

Модель II була такою ж, як і модель I, за винятком того, що в ній використовувалася процедура обчислення TWR як на рис. 24.

Ще два проходи, щоб визначити ефект використання різних кроків і розмірів зонда, були зроблені з моделлю I та першим набором умови різання. Загалом було проведено десять дослідів. Розмір кроку приймалося для  $V_s = 100$  м/хв., для  $f = 0,0025$  мм/об.

Ці умови використовувалися в усіх випадках, якщо не вказано інше. Для кожного набору умов різання, представлених на наступних сторінках, показано графіки швидкості та швидкості подачі.

Модель I – Графіки на рис. 41 – 46.

Початкові умови:  $V_s - 2040$  м / хв.,  $f - 0,2642$  мм/об.

Типовий графік (форму цього графіка було отримано для всіх умов з використанням моделі I) швидкості зношення інструменту наведено на рис. 40. Цей графік ілюструє від'ємні значення TWR, викликані коливаннями зношення, показаними на типовому графіку (форма цього графіка була однаковою для всіх умов в моделі I) на рис. 39. Цієї проблеми можна було б уникнути, якщо накласти обмеження на зношення таким чином, щоб воно ніколи не зменшувалося, тобто, якщо оптимізація вказала значення швидкості та подачі, які зменшують зношення, щоб зменшити TWR, це значення зношення буде обійдено для попереднього більшого значення (це спричинить  $TWR = 0$  в даний момент часу).

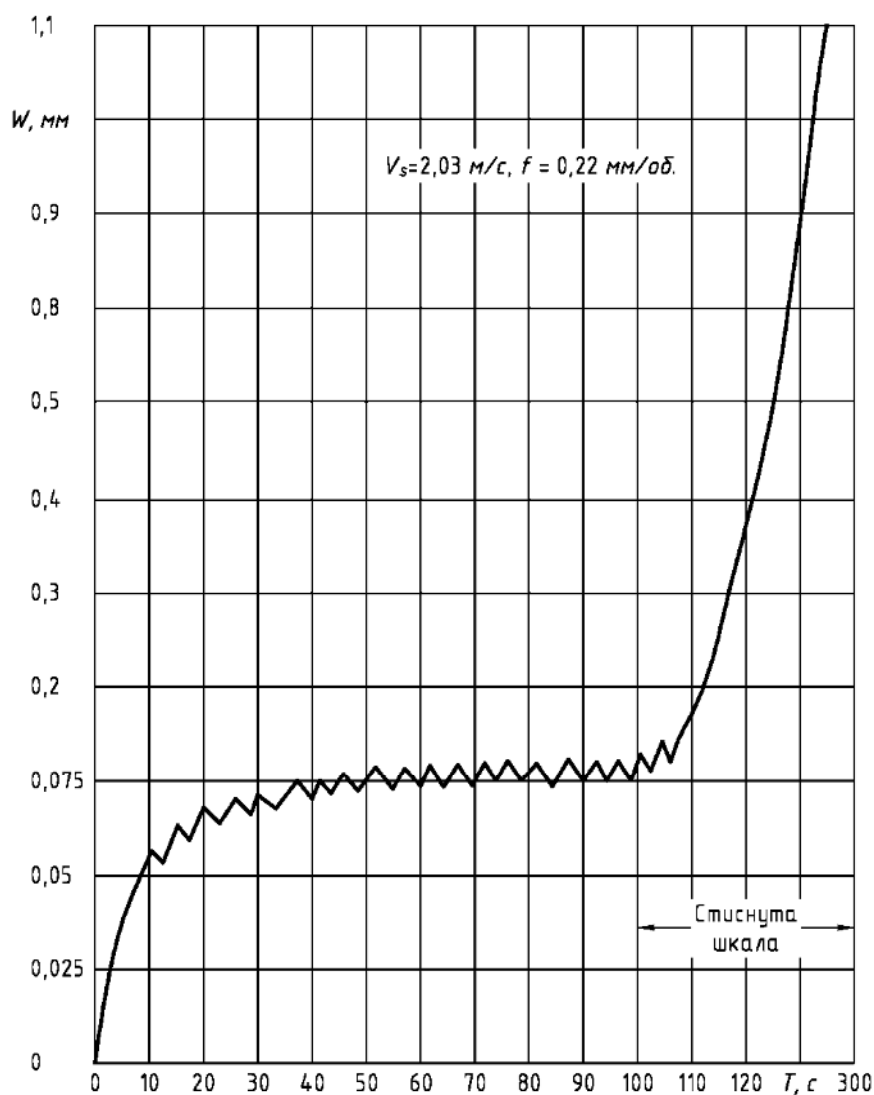


Рисунок 39 – Залежність зношення інструменту від часу



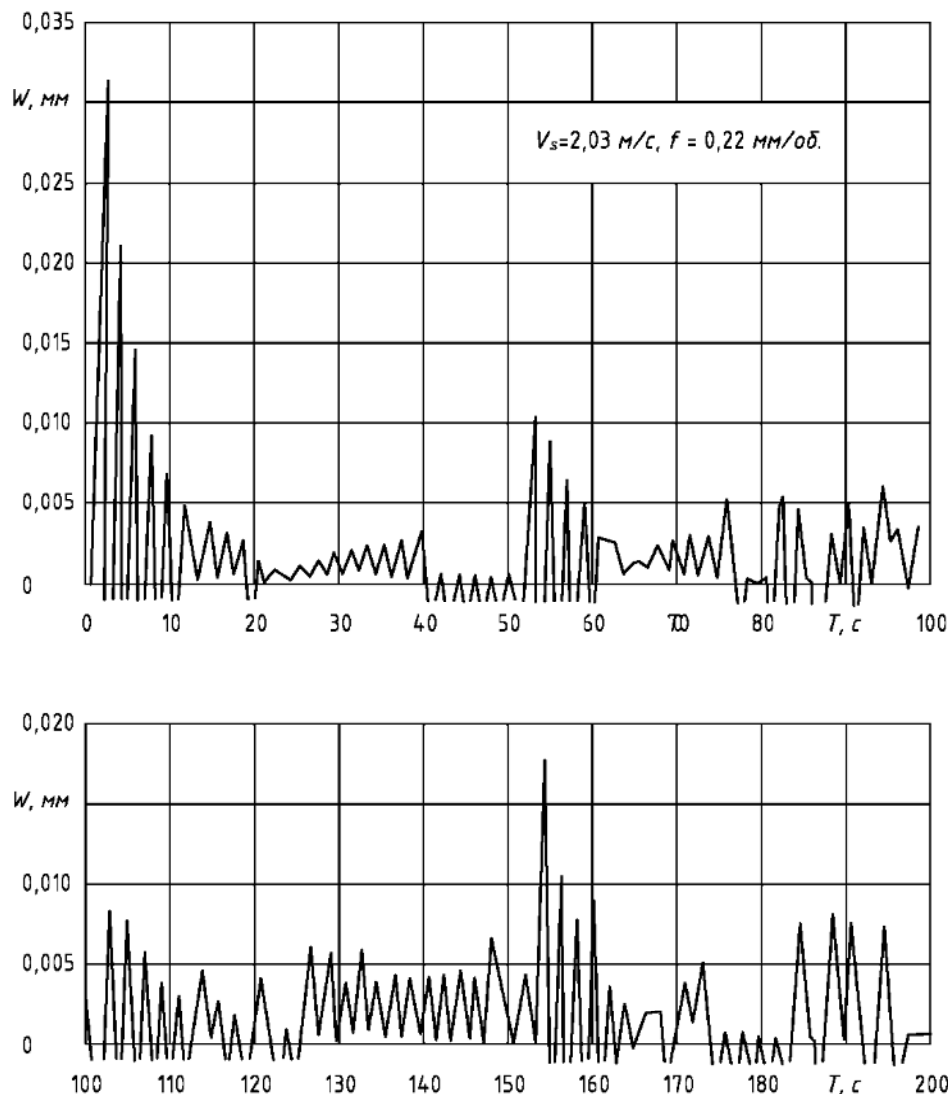


Рисунок 40 – Швидкість зношення інструменту в залежності від часу

Незважаючи на те, що модель I є нереалістичною, це не впливає на логіку керування. Крім періодичних ступінчастих коливань  $H$ , коли TWR стає негативним, форми відповіді для керуючих входів все ще дійсні, хоча значення та діапазони, які вони припускають, є сумнівними. Як обговорювалося раніше, і тому очікувалося, в середньому швидкість зменшується, а швидкість подачі збільшується. Процедура пошуку очевидна як для частоти обертання, так і для швидкості подачі, оскільки вони коливаються навколо деякого середнього значення. Коефіцієнт добротності  $H$ , залишається по суті постійним приблизно на рівні +2.

Ефект від зменшення кроку швидкості  $V_s - 3 \text{ м/хв.}$  і подачі  $f - 0,0025 \text{ мм/об.}$  показано на графіках на рис. 43-46. Загалом ці результати показують, що

отримано той самий характер залежностей, показник добротності по суті постійний, а при менших розмірах коливання швидкості реакції нижчі.

### МОДЕЛЬ І УМОВА 1

$V_s = 120$  м/хв.,  $f = 0,2642$  мм/об.

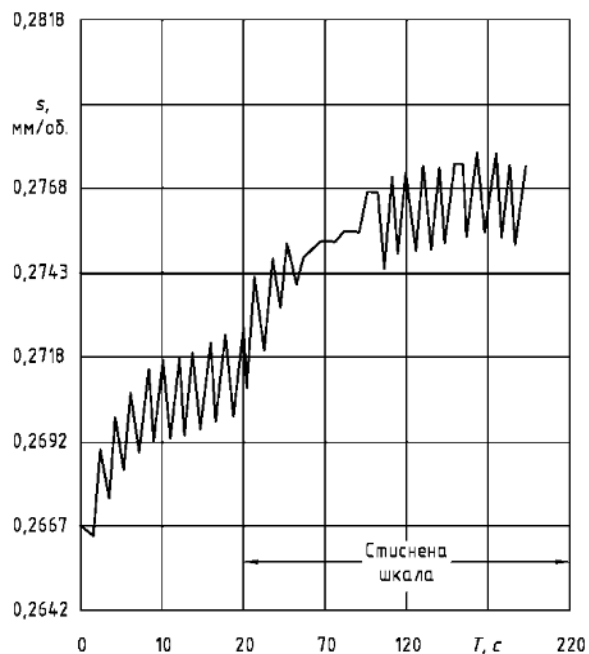


Рисунок 41

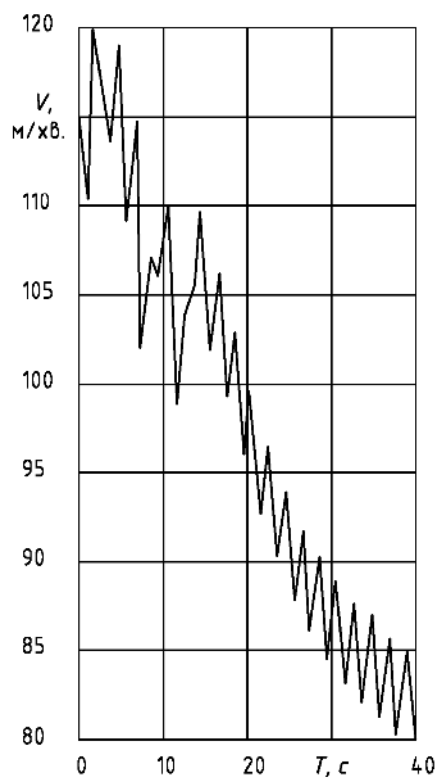


Рисунок 42

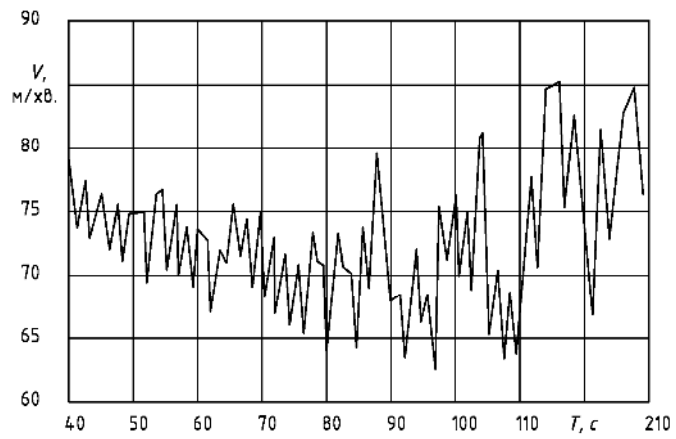


Рисунок 42 (продовження)

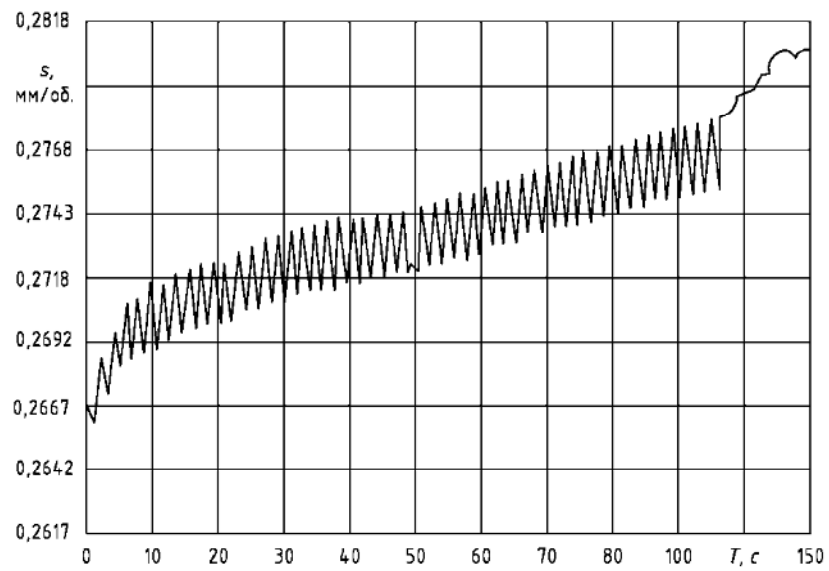


Рисунок 43

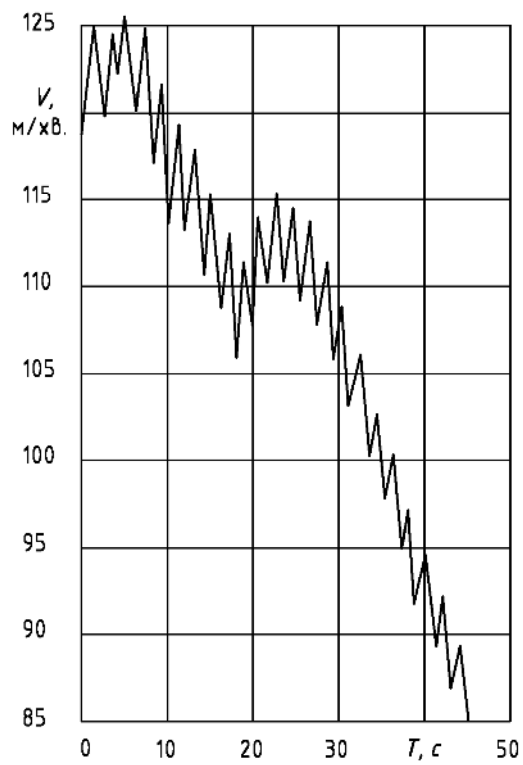


Рисунок 44

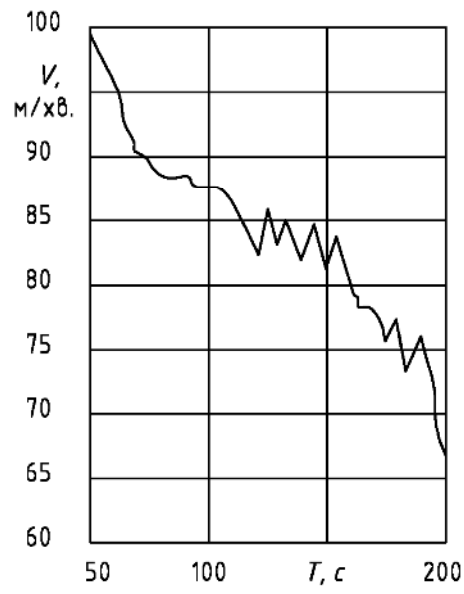


Рисунок 44 (продовження)

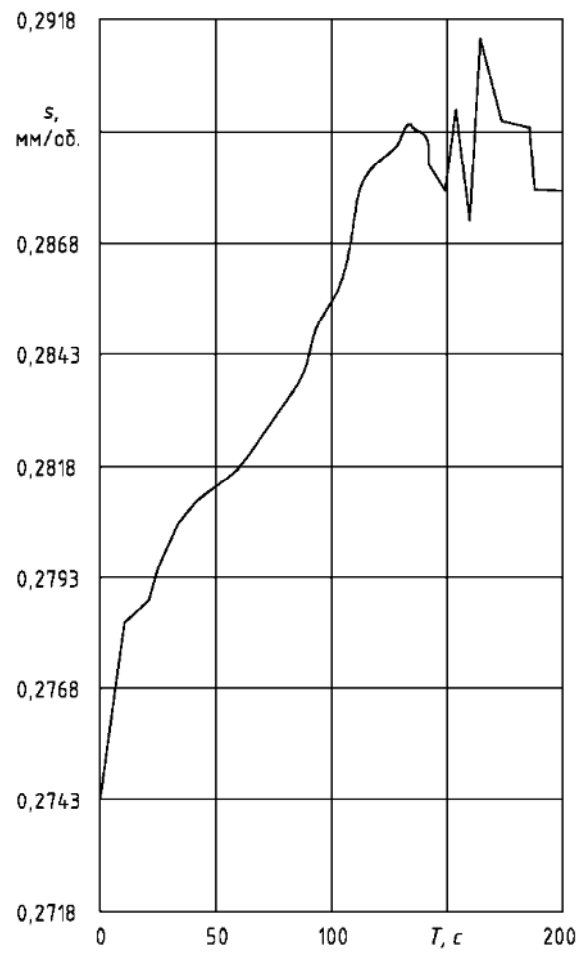


Рисунок 45

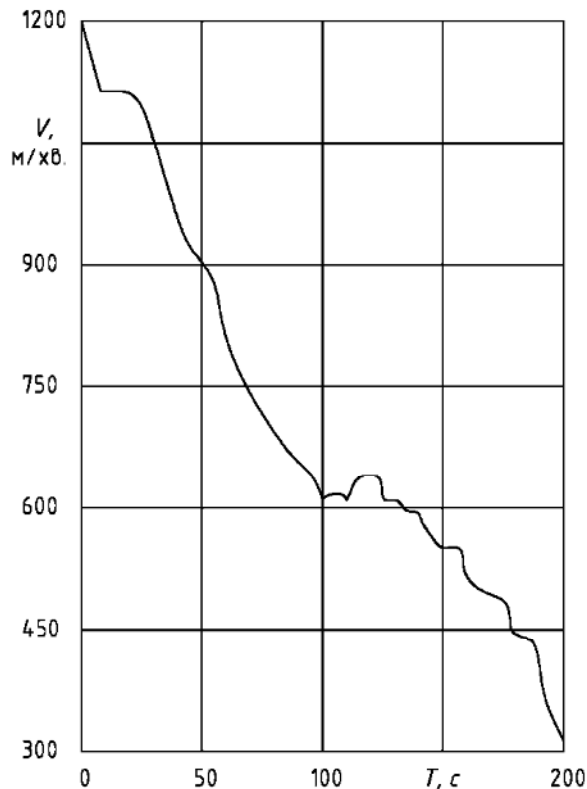


Рисунок 46

Загалом ці результати дозволяють зробити такі висновки.

1. Для  $H$  потрібно більше часу, щоб знайти оптимальне значення, щодо якого він намагається підтримувати стабільність. Цей результат, коли він нарешті знайдений, виявляється нижчим, ніж коли робляться більші кроки. Однак можна стверджувати, що система ще не досягла стійкого стану і врешті-решт підніметься до вищого значення.

2. Вплив варіювання кроків  $V_s$  між 1,5 і 3 м/хв був несуттєвим,

Модель I – Графіки на рис. 47-48.

Початкові умови:  $V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,26$  мм/об.

Форма відгуків швидкості та подачі така ж, як і для умови (1). Швидкість зменшується, а подача збільшується.

Коефіцієнт ефективності демонструє зростання коливань для цих умов і знаходить середнє значення +3, яке вище, ніж знайдене в умові (1).

Модель I – Графіки на рис. 49, 50.

Початкові умови:  $V_s = 120$  м/хв.,  $f = 0,25$  мм/об.

## МОДЕЛЬ І УМОВА 2

Початкові умови:  $V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,26$  мм/об.

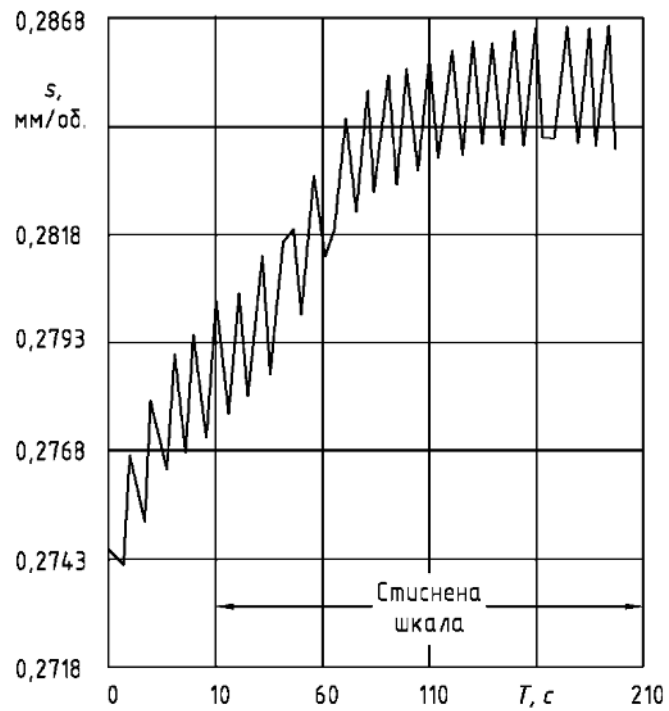


Рисунок 47

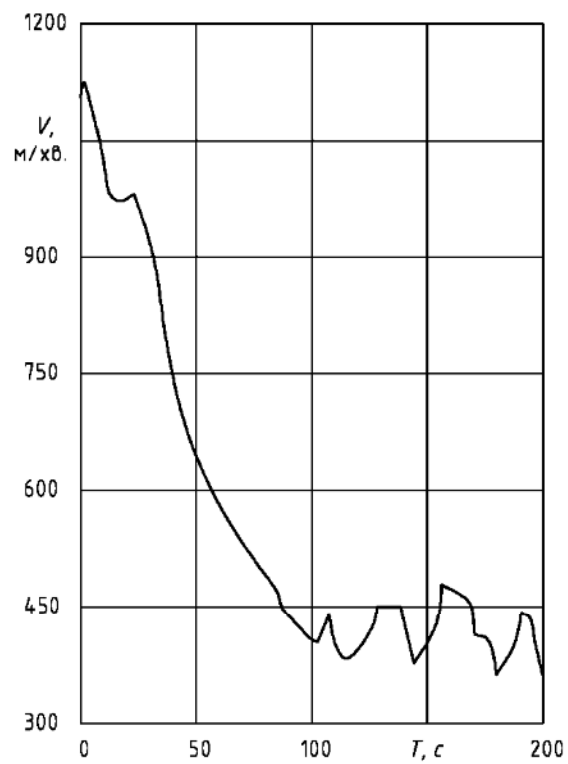


Рисунок 48

МОДЕЛЬ І УМОВА 3

Початкові умови:  $V_s = 120$  м/хв.,  $f = 0,25$  мм/об.

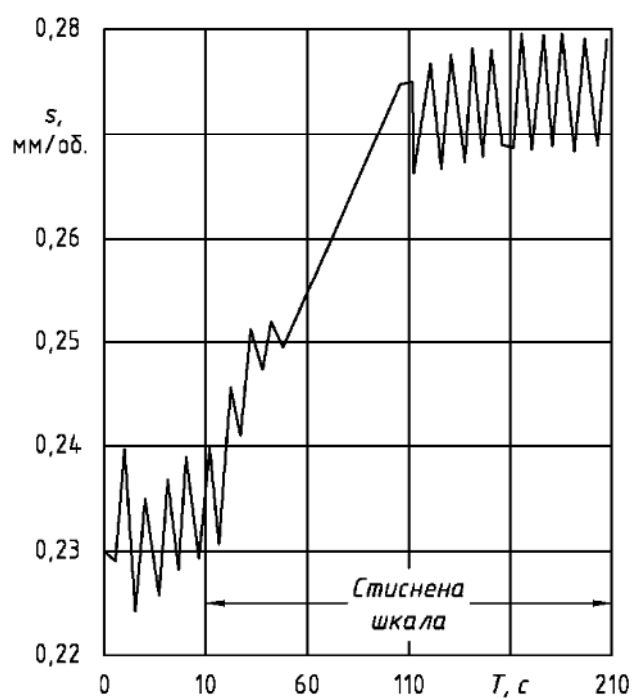


Рисунок 49

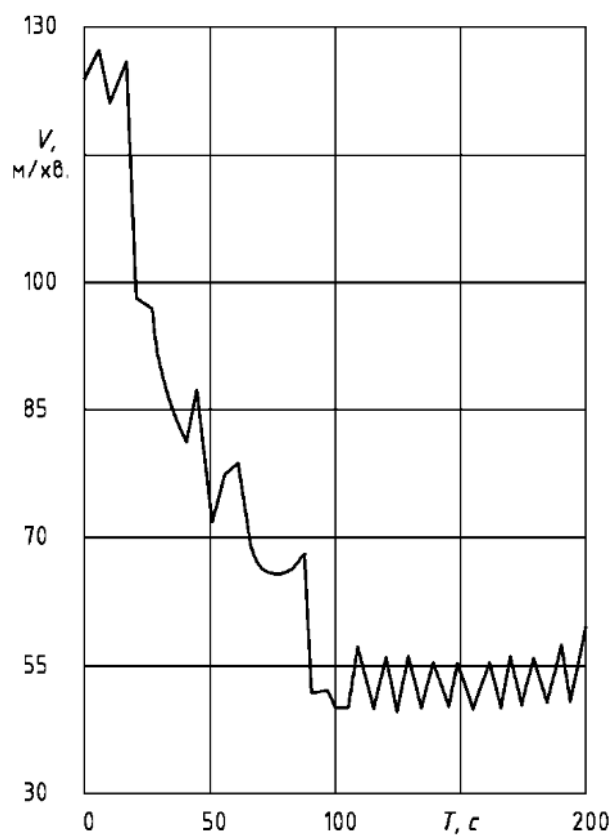


Рисунок 50

Знову швидкість зменшується, а швидкість подачі збільшується, однак швидкість перестає зменшуватися, коли вона досягає середнього значення 50 м/хв. і демонструє невелике збільшення, коли час наближається до 200-секундної межі.  $H$  коливається близько середнього значення +1,8.

Модель – Графік на рис. 51.

Початкові умови:  $V_s = 200$  м/хв,  $f = 0,5$  мм/об.

Швидкість подачі постійно зростає, але через 100 секунд швидкість починає коливатися дедалі більше. Зміни добротності є більш екстремальними, ніж при попередніх умовах, і коливаються навколо середнього значення +3. Очевидно, підсилення коливань пов'язане з поєднанням екстремальних (високих) умов різання та великого розміру кроку, прийнятого під час процедури оптимізації.

Перш ніж аналізувати результати моделі II, слід зробити такі загальні коментарі. Збільшення швидкості ближче до кінця часу різання, яке спостерігається в моделі I для умов (3) і (4), може бути наслідком великого кроку. Ці збільшення можуть бути початковими етапами вирівнювання швидкості (або, принаймні, зниженням її швидкості), чого можна очікувати, оскільки після 100-150 с часу роботи температура починає вирівнюватися. Також дуже важливо відзначити, що зношення інструменту є лінійною функцією температури.

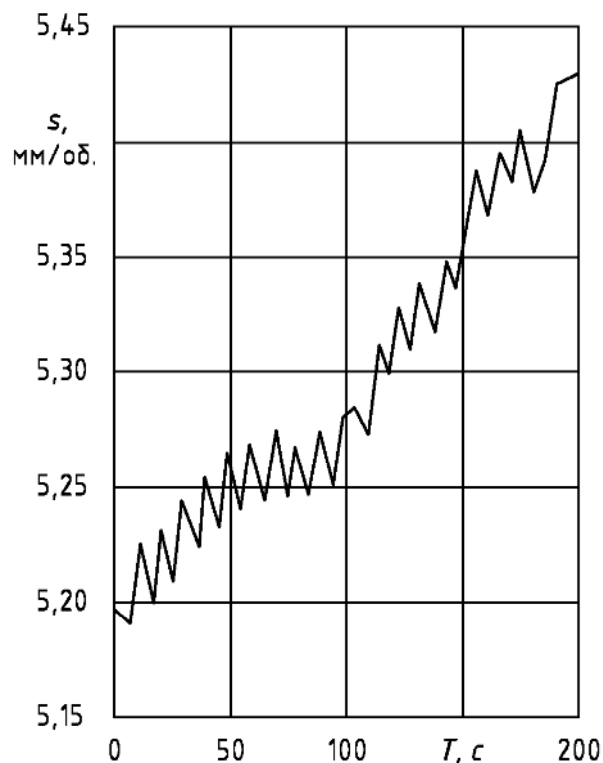




Рисунок 51

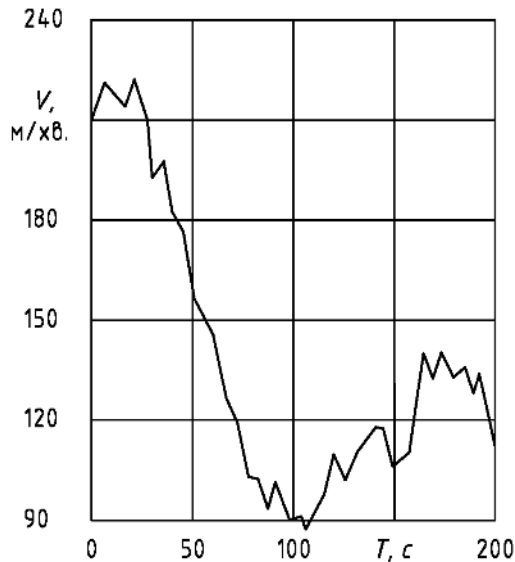


Рисунок 51 (продовження)

В моделі II швидкість зношення інструменту є степеневою функцією. Таким чином, підвищення температури має набагато більший вплив на TWR в моделі II, ніж в моделі I. Таким чином, логіка керування для підтримки TWR, незалежного чи знижувального, при оптимізації продуктивності, не обов'язково буде однаковою для обох моделей.

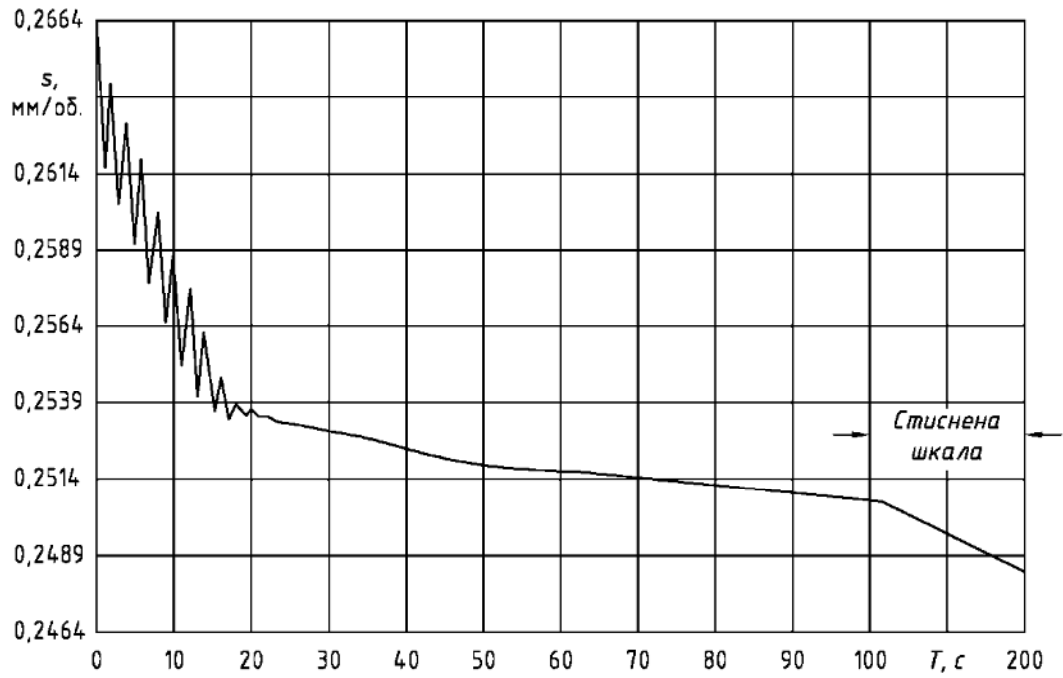
Модель II – Графіки на рис. 52, 53.

Початкові умови:  $V_s = 120$  м/хв,  $f = 0,25$  мм/об.

Швидкість у цій моделі демонструє більше коливань (амплітуду яких можна було б зменшити шляхом зменшення кроку), ніж у моделі I. Схоже, що відгук спочатку падає, а потім коливається близько середнього значення 90 м/хв, на відміну від реакції моделі I, яка постійно зменшується. Тим часом швидкість подачі зменшується, а не збільшується, як у моделі I. Ці контрастні результати пов'язані з тим, що TWR є енергетичною функцією добутку швидкості, подачі та температури в моделі II. Для низьких початкових умов різання, алгоритм управління стикається з TWR, який зростає з набагато більшою швидкістю, ніж в моделі I. Щоб підтримувати TWR постійним без зниження продуктивності швидше, ніж це необхідно, алгоритм повинен утримувати швидкість на середньому постійному значенні, одночасно зменшуючи швидкість подачі.

Відповідь  $H$  в перші 20 с демонструє експоненціальне зниження та потім,

здається, лінійно зменшується до постійного значення +1,2, ближче до кінця циклу.



52

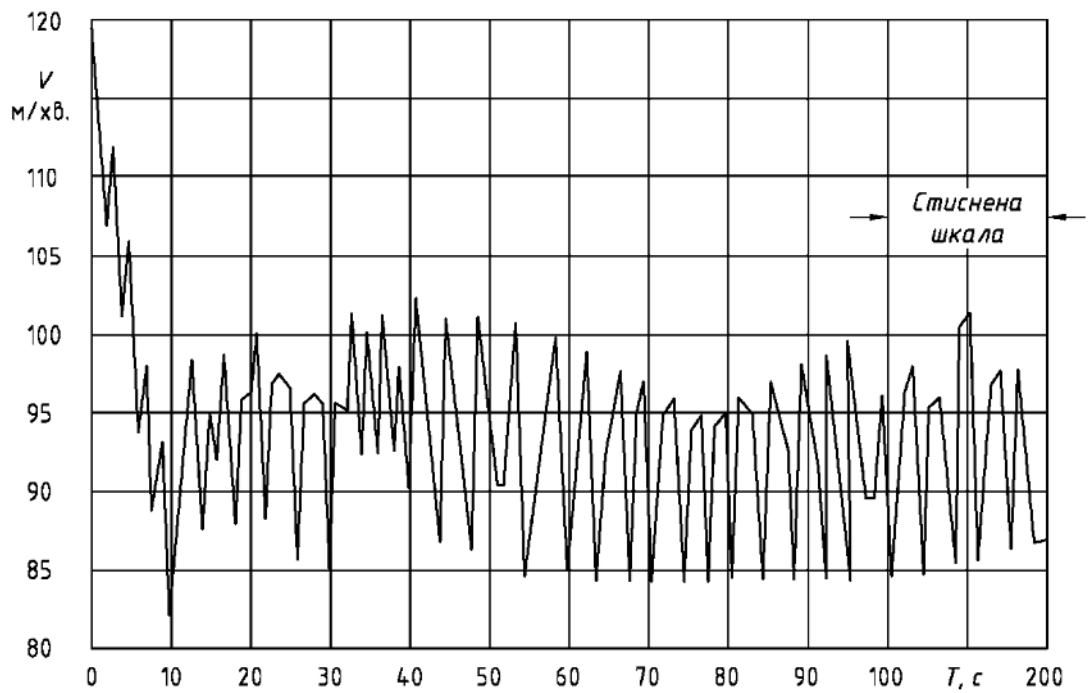


Рисунок 53

МОДЕЛЬ II УМОВА 1

Початкові умови:  $V_s = 120$  м/хв,  $f = 0,25$  мм/об.

Модель II - Графіки на рис. 54-56.

Початкові умови:  $V_s = 200$  м/хв,  $f = 0,25$  мм/об.

Коли використовуються ці вищі початкові умови різання, швидкість зменшилася приблизно на 120 с, а потім вирівнялася на середньому значенні 25 м/хв.

Швидкість подачі спочатку зменшилася, а потім збільшилася до максимального значення через 80 с. У цей момент швидкість опустилася нижче 60 м/хв., а швидкість подачі почала поступово зменшуватися, в той час як швидкість залишалася постійною, як це спостерігалось в умові (1), модель II. Відповідь  $H$  така ж, як і в попередньому випадку.

Модель II – Графіки на рис. 57, 58.

Початкові умови:  $V_s = 120$  в/хв.,  $f = 0,0090$  мм/об.

Відповіді швидкості, швидкості подачі та  $H$  по суті такі ж для цих умов, як і для моделі II, умови (1). Швидкість коливається в середньому 100 м/хв., при цьому швидкість подачі зменшується. Знову ж форма відповіді  $H$  така сама, з кінцевим досягнутим значенням +1,15.

## МОДЕЛЬ II УМОВА 2

Початкові дані:  $V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,25$  мм/об.

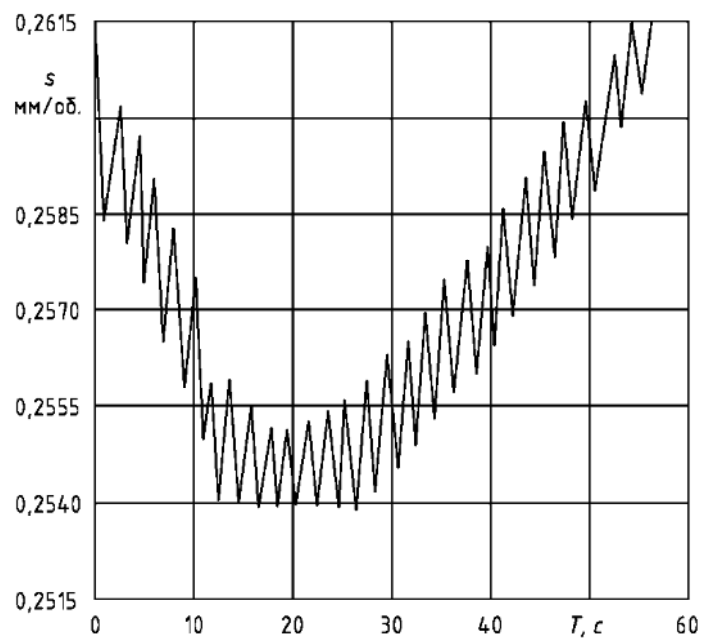


Рисунок 54

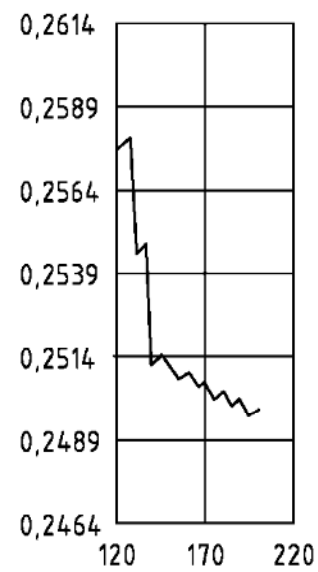
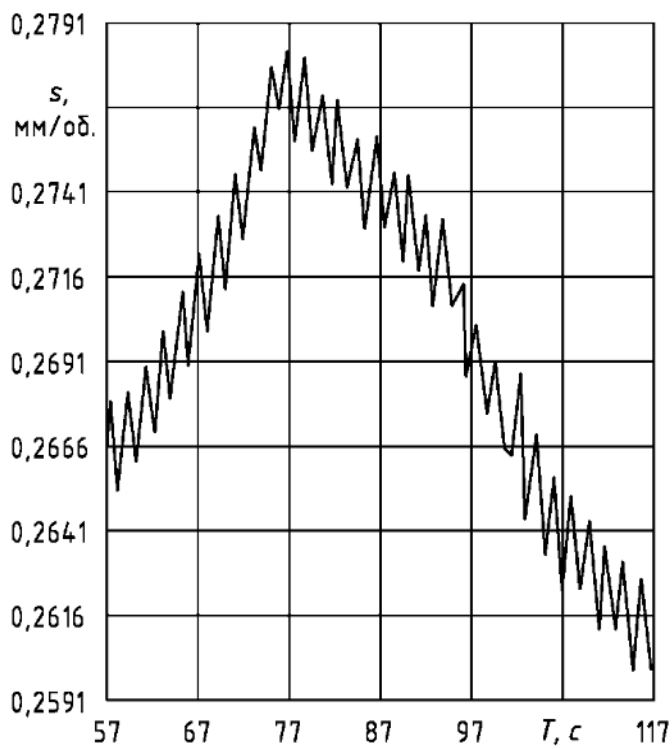


Рисунок 55

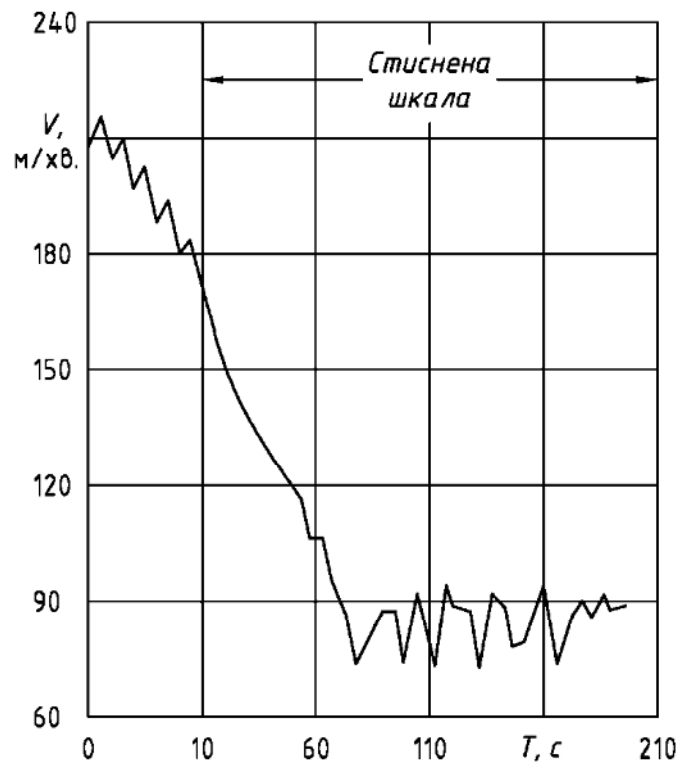


Рисунок 56

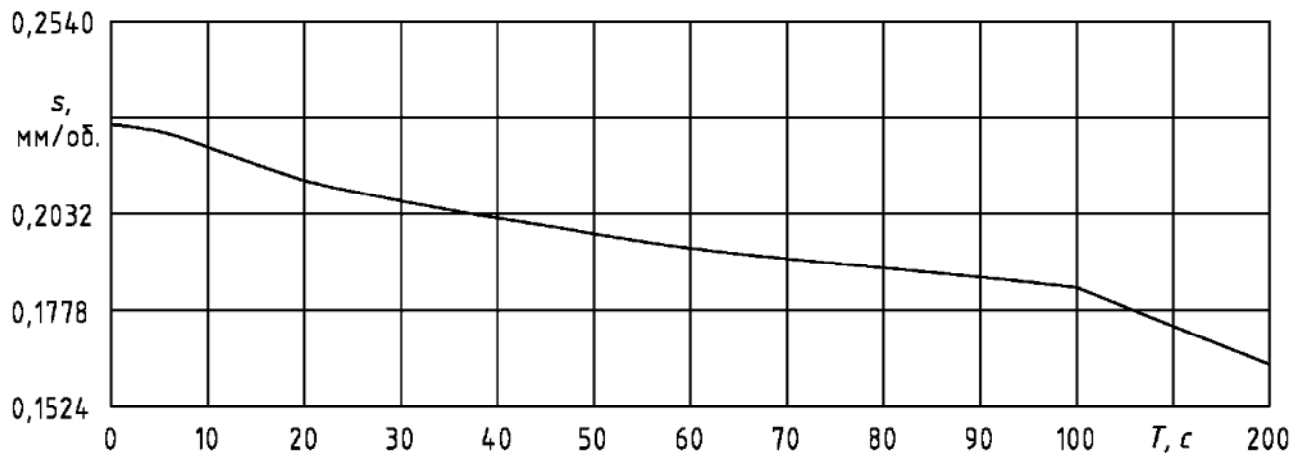


Рисунок 57

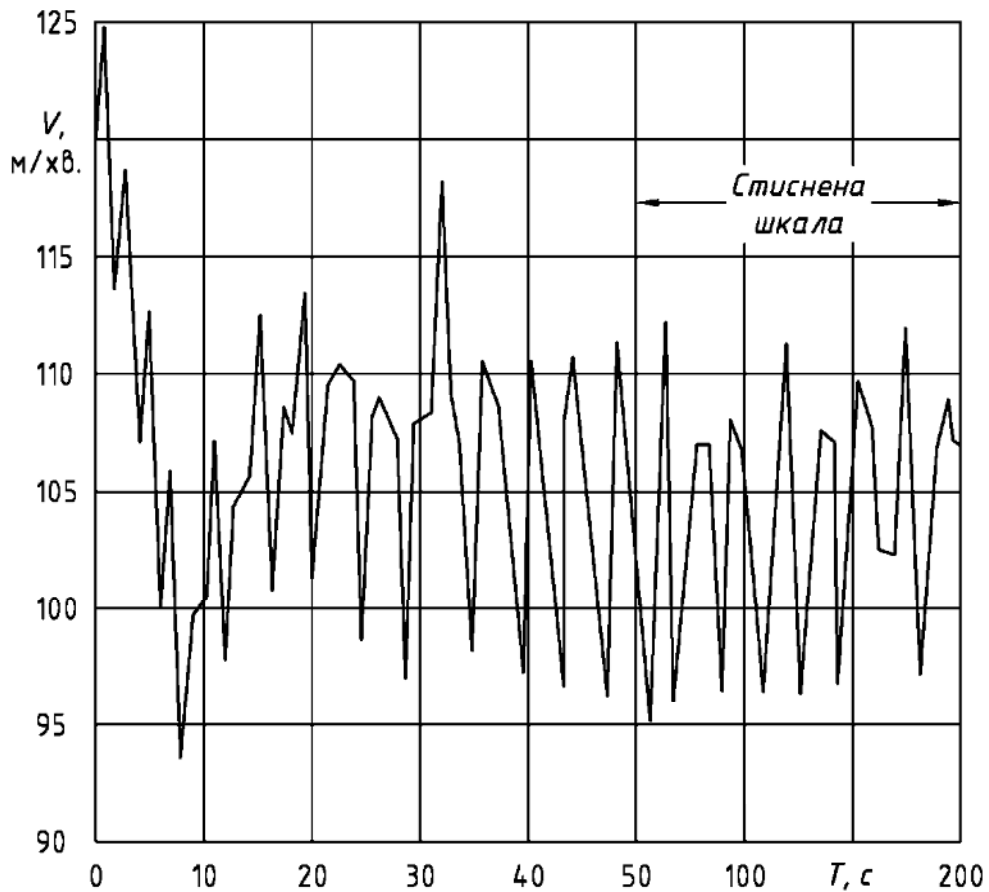


Рисунок 58

МОДЕЛЬ II. Умова 3.

$V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,22$  мм/об.

Модель II – Графіки на рис. 59-62.

Початкові умови:  $V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,5$  мм/об.

Форма відповідей швидкості, швидкості подачі та  $N$  у цьому випадку подібна до тих, що були знайдені для умови 2 моделі II. Швидкість зменшується та вирівнюється, а швидкість подачі зменшується, а потім збільшується до максимального значення, а далі зменшується.

Однак у цьому випадку швидкість подачі знову починає збільшуватися. Це пояснюється тим, що завдяки вищим початковим значенням продуктивності, цей член є більш домінуючим у рівнянні добротності, що дає системі більше часу, поки TWR не стане домінуючим і згодом спричинить зменшення швидкості подачі та стабільну середню швидкість, як це було в попередніх випадках.

МОДЕЛЬ II УМОВА 4

$V_s = 200$  м/хв.,  $f = 0,5$  мм/об.

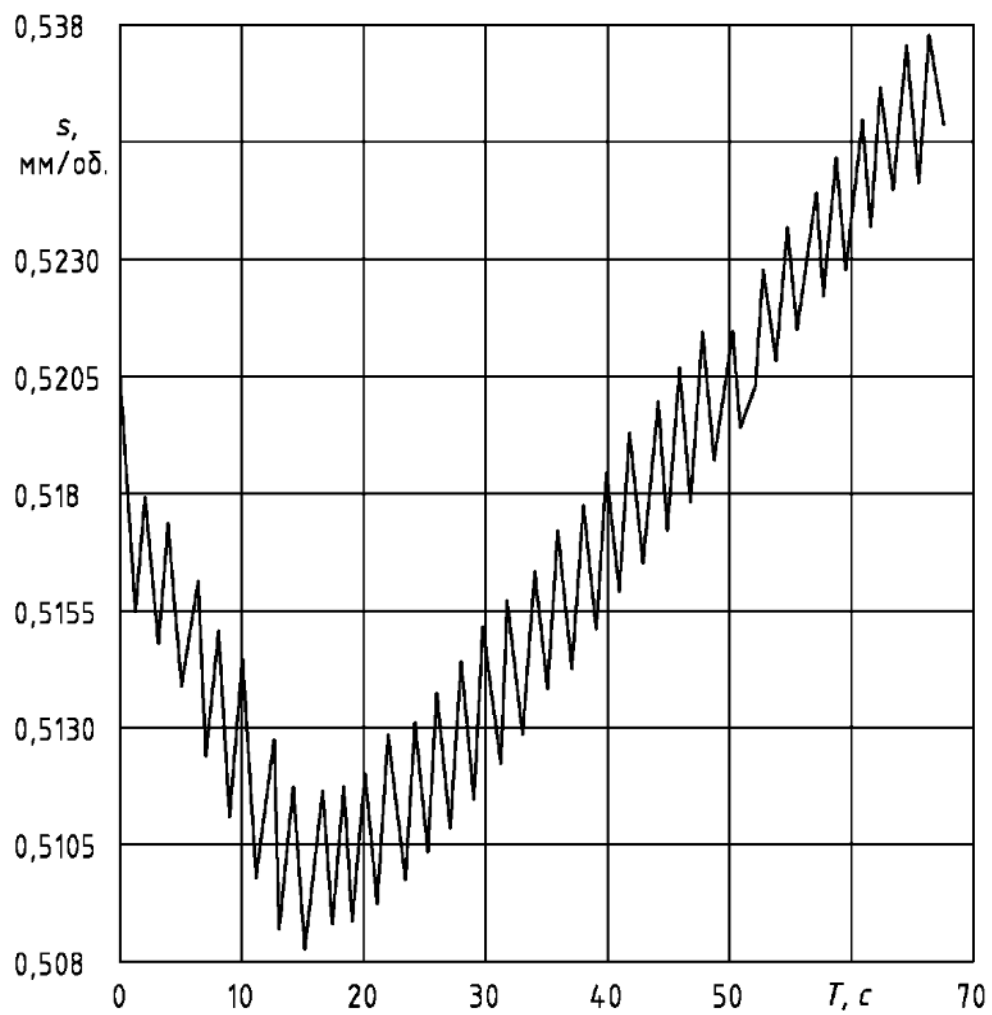


Рисунок 59

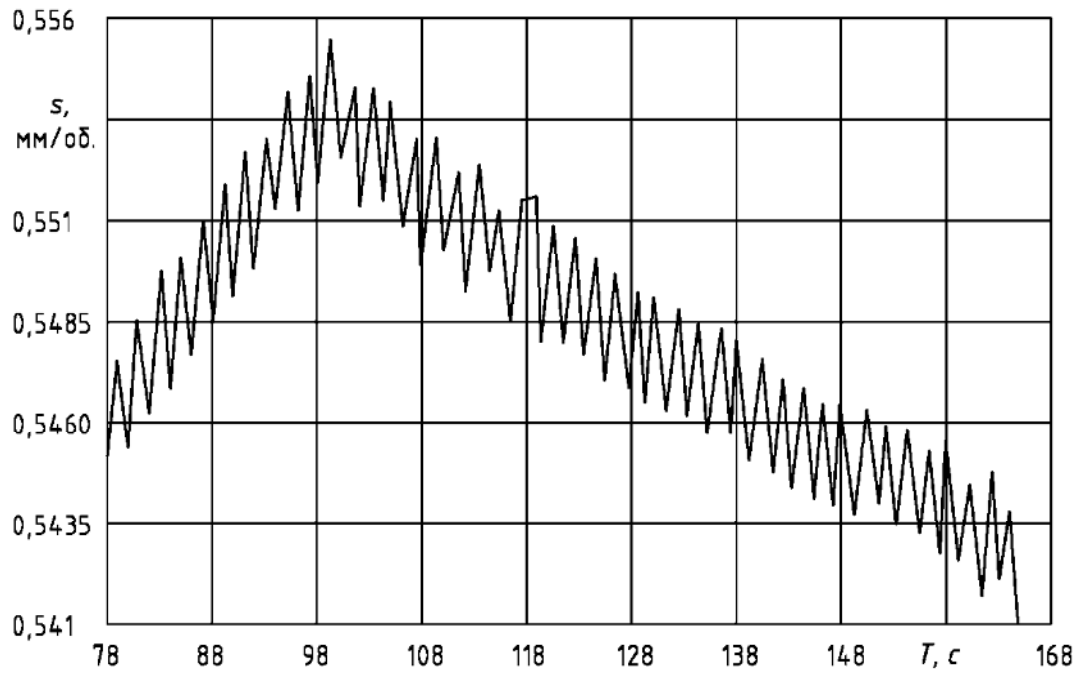


Рисунок 60

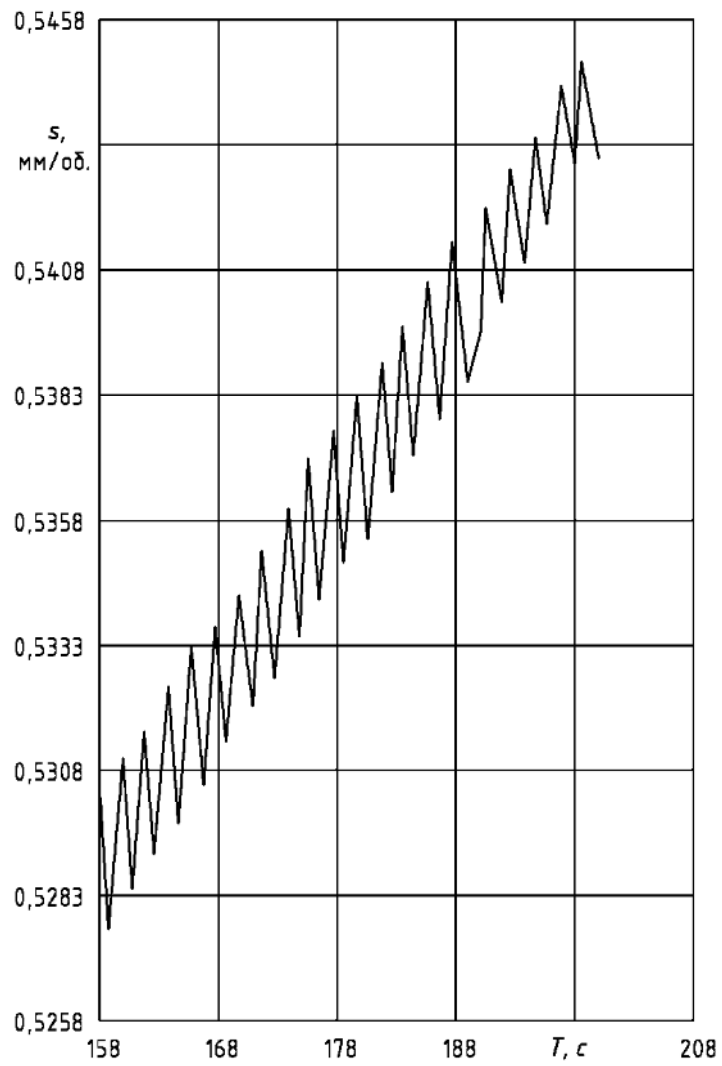


Рисунок 61



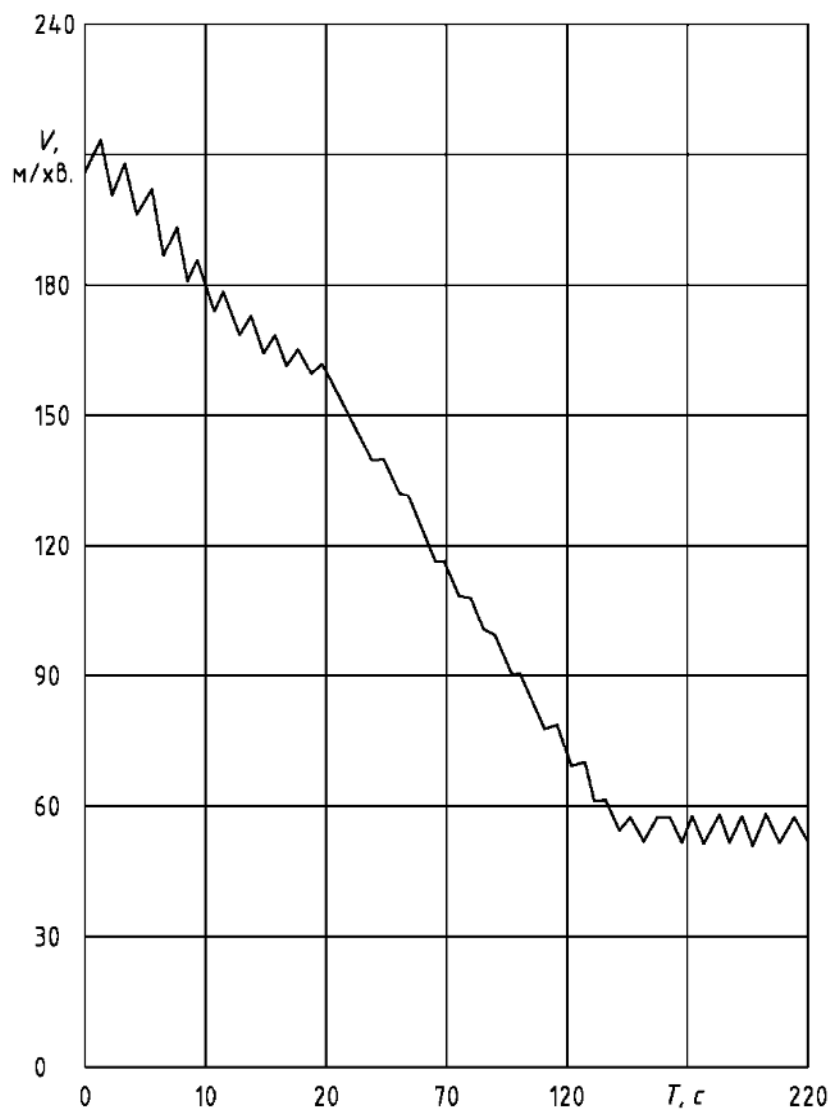


Рисунок 62

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.1 ОХОРОНА ПРАЦІ**

#### **6.1.1 Навчання з питань охорони праці**

Організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці працівників при підготовці, перепідготовці, підвищенні кваліфікації на підприємстві здійснюють працівники служби кадрів або інші спеціалісти, яким керівником підприємства доручена організація цієї роботи.

Підготовка працівників для виконання робіт з підвищеною небезпекою здійснюється лише в закладах освіти (ЗО), які одержали в установленому порядку ліцензію Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України та дозвіл Державного нагляду з охорони праці на проведення такого навчання. При підготовці працівників для робіт з підвищеною небезпекою дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 30 год., а специфічні питання з охорони праці, пов'язані з виконанням робіт з підвищеною небезпекою, вивчаються в курсах спеціальних дисциплін і органічно поєднуються з вивченням технології виробництва.

Для решти робіт підготовка, перепідготовка працівників за професіями можуть здійснюватися як в ЗО, так і на підприємстві. При цьому дисципліна загального курсу «Охорона праці» вивчається в обсязі не менше ніж 20 год. Робочі навчальні плани і програми підготовки, перепідготовки, підвищення кваліфікації працівників розробляють на підприємстві на основі типових навчальних планів і програм, затверджених Міністерством освіти і науки, молоді та спорту з погодженням з Держнаглядом охорони праці. Навчальні плани та програми підготовки та перепідготовки працівників повинні передбачати теоретичне і практичне (виробниче) навчання з курсу «Охорона праці».

Працівники, яких приймають на роботу, проходять на підприємстві попереднє спеціальне навчання і перевірку знань з питань охорони праці стосовно конкретних робіт, які вони виконуватимуть. Попереднє спеціальне навчання і перевірка знань працівників за його результатами проводиться одноразово до

початку самостійної роботи, а також у разі перерви в роботі понад 1 рік. Періодичні перевірки знань працівників проводяться в терміни, встановлені відповідними міжгалузевими і галузевими нормативними актами, але не рідше 1 разу на рік.

На підприємствах для перевірки знань працівників з питань охорони праці наказом керівника створюються постійно діючі комісії. Головами комісій призначаються заступники керівників підприємств, в обов'язки яких входить організація роботи з охорони праці, а в разі потреби створення комісій в окремих структурних підрозділах їх очолюють керівники відповідних підрозділів чи їх заступники.

Перед перевіркою знань працівників з питань охорони праці на підприємстві організуються заняття: лекції, семінари та консультації. Перелік питань для перевірки знань з охорони праці з урахуванням специфіки виробництва складають члени комісії з перевірки знань з питань охорони праці, погоджує служба охорони праці і затверджує керівник підприємства.

Посадові особи і спеціалісти зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці до початку виконання своїх обов'язків, а також періодично один раз на 3 роки, проходять навчання і перевірку знань з питань охорони праці.

Одним з розділів «Типового положення про навчання з питань охорони праці» є інструктажі з питань охорони праці.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Усі працівники, яких приймають на постійну чи тимчасову роботу і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

Вступний інструктаж проводиться спеціалістом служби охорони праці, а в разі відсутності на підприємстві такої служби – іншим фахівцем, на якого наказом по підприємству покладені ці обов'язки. Вступний інструктаж проводиться в

кабінеті охорони праці або в приміщенні, що спеціально для цього обладнане, з використанням сучасних технічних засобів навчання, навчальних та наочних посібників за програмою розробленою службою охорони праці з урахуванням особливостей виробництва. Запис про проведення вступного інструктажу робиться в журналі реєстрації вступного інструктажу, який зберігається в службі охорони праці або в працівника, що відповідає за проведення вступного інструктажу, а також у документі про прийняття працівника на роботу.

Первинний інструктаж проводиться індивідуально або з групою осіб одного фаху за діючими на підприємстві інструкціями з охорони праці відповідно до виконуваних робіт, а також з урахуванням вимог орієнтовного переліку питань первинного інструктажу.

Повторний інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників, які виконують однотипні роботи, за обсягом і змістом переліку питань первинного інструктажу, але не рідше: на роботах з підвищеною небезпекою – один раз на 3 місяці; для решти робіт – один раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників одного фаху. Обсяг і зміст позапланового інструктажу визначаються в кожному окремому випадку залежно від причин і обставин, що спричинили потребу його проведення. Наприклад, при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них; при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці; при порушеннях працівником вимог охорони праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо; при виявленні особами, які здійснюють нагляд за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником; при перерві в роботі більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників. Обсяг і зміст цільового інструктажу визначається залежно від виду робіт, що ними виконуватимуться.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктаж проводить безпосередній керівник робіт (начальник виробництва, цеху, дільниці, майстер). Ці види інструктажу завершуються перевіркою знань у вигляді усного опитування або за допомогою технічних засобів, а також перевіркою набутих навичок безпечних методів праці. Знання перевіряє особа, яка проводила інструктаж. При незадовільних результатах перевірки знань, умінь і навичок щодо безпечного виконання робіт після первинного, повторного чи позапланового інструктажів для працівника протягом 10 днів додатково проводяться інструктаж і повторна перевірка знань. При незадовільних результатах і повторної перевірки знань питання щодо працевлаштування працівника вирішується згідно з чинним законодавством. При незадовільних результатах перевірки знань після цільового інструктажу допуск до виконання робіт не надається. Повторна перевірка знань при цьому не дозволяється.

Про проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів особою, якою проводився інструктаж, вноситься запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці. При цьому обов'язкові підписи як того, кого інструктували, так і того, хто інструктував. Сторінки журналу реєстрації повинні бути пронумеровані, журнали прошнуровані і скріплені печаткою.

### **6.1.2 Характеристика небезпечних зон обладнання і розробка заходів безпеки**

Безпека технологічних процесів визначається безпекою виробничого обладнання, оснащення, сировини і матеріалів, що використовуються. Вона повинна забезпечуватися комплексом проектно-конструкторських та організаційно-технологічних рішень, які полягають в раціональному виборі як усього технологічного процесу, так і окремих технологічних операцій; підборі виробничого обладнання та приміщень; у виборі способів транспортування та умов зберігання матеріалів, напівфабрикатів, готової продукції та відходів

виробництва.

Для забезпечення вимог безпеки виробниче обладнання повинно бути безпечним при монтажі, експлуатації та ремонті як окремо, так і в складі комплексів і технологічних схем.

Небезпечна зона обладнання – це простір, у якому можливий вплив на працюючого небезпечного або шкідливого виробничого фактора. Небезпечна зона може бути локалізована навколо або поблизу рухомих елементів обладнання (зубчастих, пасових або ланцюгових передач, обертових частин, різального інструменту тощо), або зумовлюватися можливістю враження електричним струмом, дією електромагнітних, іонізуючих, лазерних, ультрафіолетових та інфрачервоних випромінювань, шуму, вібрації, ультразвуку, шкідливих газів, парів і пилу, а також можливістю травмування стружкою, що відлітає.

Розміри небезпечної зони в просторі і в часі можуть бути постійними (наприклад, зона між пуансоном і матрицею в пресах) і змінними (наприклад, радіус відльоту стружки може змінюватися в залежності від властивостей матеріалу, що обробляється і режимів різання).

Для забезпечення безпеки повинні передбачатися пристрої, які виключають або можливість попадання працюючих в небезпечну зону обладнання, або послаблюють чи виключають дію небезпечного фактора.

Конструктивні частини обладнання повинні виключати можливість їх випадкового пошкодження, яке може викликати небезпеку. Конструктивні матеріали не повинні бути небезпечними або шкідливими. Застосування нових матеріалів та речовин, які не пройшли відповідних перевірок, не допускається.

Рухомі частини обладнання, які становлять небезпеку для працюючих, повинні огорожуватися або оснащуватися іншими засобами захисту. Конструкція обладнання повинна виключати можливість випадкового дотику працюючих до гарячих чи переохолоджених частин, а також елементів, що мають гострі кромки і кути. Повинен бути передбачений захист від враження електричним струмом, в тому числі і у випадку помилкових дій персоналу, а також виключена можливість нагромадження зарядів статичної електрики в небезпечній кількості.

Конструкція обладнання повинна забезпечувати виключення або зниження до регламентованих рівнів шуму, вібрації, шкідливих випромінювань. Обладнання не повинно служити джерелом виділення в робочу зону виробничих приміщень шкідливих речовин вище гранично допустимих концентрацій, а також великих кількостей тепла і вологи, які погіршують метеорологічні умови.

Обладнання повинно оснащуватися засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках – засобами аварійного зупинки та відключення.

Для запобігання небезпеці при несподіваному відключенні енергії всі робочі, підйомні та захоплюючі органи і механізми повинні бути оснащені захисними пристроями, які виключають викид чи випадання виробів або інструменту. Також повинна бути виключена можливість самовільного включення приводів робочих органів при повторному включенні енергії після її випадкового відключення.

Органи управління повинні забезпечувати надійність запуску і швидкість зупинки, зручність застосування, зусилля для їх переміщення повинні бути невеликими. Вони повинні мати зручні для роботи і безпечні форму і розміри, а їх конструкція повинна виключати можливість мимовільного ввімкнення та вимкнення, а також здійснення неправильної послідовності операцій.

Органи управління повинні мати символічні позначенні або відповідні надписи. Органи аварійного управління повинні бути пофарбовані в червоний колір, оснащені відповідними надписами і розташовані в легкодоступних місцях.

Засоби захисту, яку є конструктивними елементами обладнання, повинні постійно виконувати свої захисні функції: спрацьовувати при проникненні людини в небезпечну зону обладнання, при появі небезпечного або шкідливого фактора. Їх дія повинна продовжуватися на протязі всього часу дії цього фактора.

При відключених, несправних або знятих засобах захисту обладнання не повинно функціонувати, тобто воно повинно автоматично відключатися і повинна бути виключена можливість його включення до відновлення засобів захисту. Засоби захисту повинні здійснювати самоконтроль або бути легкодоступними для контролю та обслуговування.





## **6.2 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.2.1 Правові основи забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Територія України, її населення, як і території та населення інших країн світу, на жаль, не убезпечені від ризику надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру, які можуть зумовити людські втрати і заподіяти значної матеріальної шкоди.

В законодавстві України надзвичайною ситуацією (НС) вважають порушення нормальних умов життя й діяльності людей на об'єкті або території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат.

Відповідно до причин походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайної ситуації на території України, розрізняють надзвичайні ситуації:

- техногенного характеру – транспортні аварії (катастрофи), пожежі, неспровоковані вибухи чи їх загроза, аварії з викидом (загрозою викиду) небезпечних хімічних, радіоактивних, біологічних речовин, раптове руйнування споруд і будівель, аварії на інженерних мережах і спорудах життєзабезпечення, гідродинамічні аварії на греблях, дамбах тощо;
- природного характеру – небезпечні геологічні, метеорологічні, гідрологічні, морські та прісноводні явища, деградація ґрунтів чи надр, природні пожежі, зміна стану повітряного басейну, інфекційна захворюваність людей, сільськогосподарських тварин, масове ураження сільськогосподарських рослин хворобами чи шкідниками, зміна стану водних ресурсів і біосфери тощо;
- соціально-політичного характеру – пов'язані з протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування: здійснення або реальна загроза терористичного акту (збройний напад, захоплення та утримання важливих об'єктів, ядерних матеріалів, систем зв'язку і телекомунікацій, напад чи замах на екіпаж повітряного або морського

- судна), викрадення (спроба викрадення) чи знищення суден, захоплення заручників, встановлення вибухових пристроїв у громадських місцях, викрадення або захоплення зброї, виявлення застарілих боєприпасів тощо;
- військового характеру – пов'язані з наслідками застосування зброї масового ураження, під час яких виникають вторинні фактори ураження населення внаслідок зруйнування атомних і гідроелектростанцій, складів і сховищ радіоактивних та токсичних речовин і відходів, нафтопродуктів, вибухівки, транспортних та інженерних комунікацій тощо.

Відповідно до територіального поширення обсягів заподіяних або очікуваних економічних збитків, кількості людей, які загинули, за кваліфікаційними ознаками визначають чотири рівні надзвичайних ситуацій – загальнодержавний, регіональний, місцевий та об'єктовий.

Правове регулювання забезпечення безпеки в надзвичайних ситуаціях має комплексний характер і поєднує норми різних галузей права. Але відносини, які виникають під час здійснення виконавчо-розпорядчої та іншої діяльності щодо забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій здебільшого регулюються адміністративно-правовими нормами.

Правову основу забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій складають різні нормативно-правові акти, які регулюють процедури та відповідальність у разі виникнення надзвичайних ситуацій. До таких актів належать:

- Конституція України: вона містить основні положення щодо захисту життя, здоров'я та майна громадян у разі надзвичайних ситуацій;
- закони про цивільний захист та захист населення від надзвичайних ситуацій: ці закони визначають порядок організації та забезпечення захисту населення від надзвичайних ситуацій, а також встановлюють правові норми для управління ними;
- постанови відповідних органів управління: державні органи можуть ухвалювати постанови та накази, які містять конкретні вимоги щодо підготовки до надзвичайних ситуацій та реагування на них;
- міжнародні угоди та конвенції: угоди, укладені Україною з іншими країнами або міжнародними організаціями, також можуть містити

положення щодо забезпечення безпеки за надзвичайних ситуацій.

Ці нормативно-правові акти встановлюють правила та процедури для забезпечення безпеки в разі надзвичайних ситуацій і визначають відповідальність за їх виконання.

### **6.2.2 Оцінка інженерної і пожежної обстановки у надзвичайних ситуаціях**

Під інженерною обстановкою розуміють сукупність наслідків дій стихійних лих, аварій (катастроф), а також первинних і вторинних вражаючих факторів ядерної зброї, інших сучасних засобів ураження, в результаті яких має місце руйнування будинків, обладнання, комунально-енергетичних об'єктів, засобів зв'язку і транспорту, мостів, гребель, аеродромів та ін.

Під пожежною обстановкою розуміють сукупність наслідків стихійних лих, аварій (катастроф), а також первинних і вторинних вражаючих факторів ядерної зброї, інших сучасних засобів ураження і перш за все запалювальних засобів, в результаті яких виникають пожежі, які впливають на стійкість роботи об'єктів народного господарства і життєдіяльності населення.

Що таке оцінка інженерної обстановки?

Оцінка інженерної обстановки перебачає:

- 1) визначення масштабів і ступені руйнувань елементів об'єкту в цілому, ступені руйнувань будинків, об'єктів та ін., в тому числі захисних споруд для укриття працюючих і службовців, розміри зон завалів, об'єму інженерних робіт, можливості об'єктових і приданих формувань по проведенню (РіНР) рятувальних робіт та інших невідкладних робіт;
- 2) аналіз їх впливу на стійкість роботи окремих елементів і об'єкта в цілому, а також життєдіяльність населення;
- 3) висновки про стійкість окремих елементів і об'єкту в цілому до дії уражаючих факторів і рекомендацій по її підвищенню, пропозиції по здійсненню РіНР.

Вихідними даними для оцінки інженерної обстановки є дані про найбільш вірогідні стихійні лиха, аварії (катастрофи), про противника, його намірах і можливостях використання ЗМУ та інших сучасних засобів ураження, їх характеристик, а також характеристик захисних споруд для укриття особового складу.

Оцінка пожежної обстановки включає:

- 1) визначення масштабу і характеру (виду) пожежі, швидкості і напрямку пожежі, площі зон задимлення і час зберігання диму;
- 2) аналіз їх впливу на стійкість роботи окремих елементів і об'єкту в цілому, а також життєдіяльність населення;
- 3) висновки про на стійкість окремих елементів і об'єкту в цілому до загорання і рекомендації по її підвищенню, пропозиції по вибору найбільш доцільних дій пожежних підрозділів і формувань ЦО по локалізації її і припиненню пожежі, евакуації при необхідності людей із зони пожежі.

Вихідними даними для прогнозування пожежної обстановки є відомості про найбільш можливі стихійні лиха, аварії (катастрофи), дані про пожежо- і вибухонебезпечність об'єкту і його елементів, навколишнього середовища, особливо лісів, населених пунктів, метеоумови, рельєф місцевості, наявність різних перешкод, вододжерел тощо.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки.

1. Розроблено динамічну модель процесу різання.
2. Розроблено модель теплопередачі інструменту.
3. Аналітично виведено рівняння ефективності системи.
4. Проведено дослідження системних параметрів, що впливають на термін служби інструменту і продуктивність системи в цілому, визначено індекс ефективності.
5. Проведено оптимізацію продуктивності системи.
6. За допомогою відповідного програмного забезпечення виконано дослідження інтенсивності зношення інструменту, проведено аналіз отриманих результатів та розглянуто можливість їх застосування для функціонування адаптивної системи керування.
7. Підтверджено, що рівень зношення інструменту безпосередньо впливає на якість обробки, повинен враховуватися при призначенні частоти обертання і величини подачі і є одним з ключових факторів, які визначають рівень адаптації системи до умов обробки.
8. Доведено, що коливання зміни частоти обертання та швидкості подачі можна зменшити шляхом зменшення розмірів та кроку переміщення датчика. Це, в свою чергу, призведе до того, що системі знадобиться більше часу, щоб знайти оптимальні параметри керування і таким чином стабілізуватися. Тому необхідно провести додаткові дослідження з визначення оптимальних значень кроку та розмірів датчика.
9. Встановлено, що застосування методу дистанційної термометрії і відповідного алгоритму оптимізації дає прийнятні результати з адаптації процесу токарної обробки до умов, які змінюються і підвищення продуктивності процесу і якості обробки в цілому.
10. Розглянуто питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Загалом ще потрібно провести значну кількість дослідів з використанням розробленої моделі обробки для визначення оптимальних параметрів системи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Антоненко Я. С. Підвищення точності важких токарних верстатів шляхом управління параметрами несучої системи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01. Краматорськ : ДДМА, 2019. 27 с.
2. Антонюк В.С., Клименко С.А., Клименко С.Ан. Теплові явища при обробці матеріалів різанням. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 156 с.
3. Бурштинський М.В., Хай М.В., Харчишин Б.М. Давачі: навчальний посібник 2-ге видання доповнене. Львів ТзОВ «Простір М», 2014. 202 с.
4. Виговський Г.М., Балицька Н.О., Глембоцька Л.Є, Мельник О.Л. Теорія різання: Навчальний посібник. 2-ге вид., доп. / Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. 148 с.
5. Гайченко В.А., Коваль Г.М. Основи безпеки життєдіяльності людини: Навчальний посібник. К.: МАУП, 2002. 226 с.
6. Джигирей В.С. Екологія та охорона навколишнього середовища: Навчальний посібник. К.: Знання, 2002. 203 с.
7. Капаціла Ю. Б., Бабій Т. Ю., Іванюк О. В. Дослідження та аналіз адаптивних методів керування процесами механічної обробки. Тези доповіді на XII міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль, 6-7 грудня 2023 р. С. 48, 49.
8. Паливода Ю.Є. Розроблення системи адаптивного контролю процесу токарної обробки. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», Тернопіль, 2018. С. 144.
9. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.
10. Патент України на корисну модель № 13846, МПК G 01 L 5/16, G 01 N3/58

- (2006.01). Стенд реєстрації зусиль різання / Л.Е. Пелевін, М.О. Пристайло, Т.Ю. Пристайло (Україна); заявник і патентовласник Науково-дослідний інститут будівельно-дорожньої і інженерної техніки, № у 2005 10393; заявл. 03.11.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.
- 11.Ткачук І.Є., Божко Т.Є., Рудь В.Д. Експериментальне дослідження температури в зоні різання при механічній обробці спечених матеріалів. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 2011. Випуск №32. С. 424-430.
  - 12.Шевченко В.В., Капінос І.В., Грабовський Д.О. Система контролю процесу обробки деталей в умовах «безлюдної технології» // Прогресивні технології та прилади. м. Луцьк. 2011. №1. С. 223-231.
  - 13.Шевченко В. В., Богачов Є. В., Коробцов Є. І. Метод підвищення достовірності діагностики стану різального інструменту при автоматизованій обробці деталей. Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія приладобудування, Вип. 55(1), с. 78-80, 2018.
  - 14.Groover, M. P., «Adaptive Control Machining: Current Problems and Future Solutions», Society of Manufacturing Engineers, Paper No. MS72-131, 1972.
  - 15.Heisel, U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances /
  - 16.U. Heisel, D. V. Krivoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak // Proc. of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. Calabria, 2007. P. 141-148.
  - 17.Kennedy, Peter J. Experimental Analysis of the Relationship Between Wear and Temperature, Filial Report for I.E. 321 Experimental Industrial Engineering, 1992.
  - 18.Stanislao, J., James Jr., C. F., Richman, M. H., «A Method for Temperature Measurement in a Single-Point Cutting Tool». AIE Trans., Vol. II, No. 1, Mar. 1990, pp 55-58.
  - 19.Tool wear monitoring and selection of optimum cutting conditions with progressive tool wear effect and input uncertainties / S. Heyns [etal.] //Journal of

- Intelligent Manufacturing. 2011. Vol. 22(4). P. 491-504.
- 20.Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник/  
І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо.–  
Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022.–324с.
- 21.Я.І. Проць, В.Б. Савків,О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Автоматизація  
виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей  
вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
- 22.Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник /  
укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль :  
ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.». <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/40843>.
- 23.Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних  
документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г.,  
Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.  
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.
- 24.Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх  
спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в  
надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А.,  
–156 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.
- 25.Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина  
«Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок – Тернопіль: ФОП  
Паляниця В. А., – 156 с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424/>
- 26.Платформа .NET та мова програмування С# 8.0: навчальний посібник /  
Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 –  
320 с. /Рекомендовано до друку Вченою радою Тернопільського  
національного технічного університету імені Івана Пулюя. Протокол № 10  
від 20 жовтня 2020 року
- 27.Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І., Савків В.Б., Методичні вказівки до  
виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151  
«Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.:  
Видавництво ТНТУ. 2021. 40 с.
- 28.Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до



виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151  
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.:  
Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>