

Міністерство освіти і науки України  
Донбаська державна машинобудівна академія

**ЖИЛЬЦОВА АННА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 621.9.23

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ НА ВАЖКИХ  
ВЕРСТАТАХ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ**

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

**Автореферат**  
магістерської роботи

Краматорськ– 2017

Магістерська робота виконана на кафедрі «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник                      доктор технічних наук, професор,  
**Клименко Галина Петрівна**  
Донбаська державна машинобудівна академія,  
м. Краматорськ,  
зав.каф. Автоматизації виробничих процесів

Захист відбудеться 4 січня 2018 року о 9<sup>00</sup> годині на засіданні ДЕК кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: м. Краматорськ, ДДМА, корпус №3, ауд. №3308.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Виробництво важкого металургійного, енергетичного, транспортного обладнання є основою машинобудування України та важливою складовою частиною її експорту. Можливість виготовлення важких машин, конкурентоспроможних на світовому ринку, забезпечується оснащенням машинобудівних підприємств сучасним верстатним обладнанням. З розвитком промисловості посилюються вимоги до машин, підвищується точність їх виготовлення, застосовуються нові марки матеріалів, які дають можливість досягнення нового рівня експлуатаційних характеристик. Технологічні процеси автоматизованих виробництв повинні бути забезпечені обладнанням високого класу точності з високою стабільністю характеристик функціонування.

Технологічне обладнання з позиції теорії управління є багатоконтурною системою з нелінійними елементами та нестационарними властивостями. В процесі експлуатації обладнання змінюється його динамічний стан не тільки при переході від однієї операції до іншої, але й при типових операціях технологічного процесу. Априорно врахувати всі зміни практично неможливо. Таким чином, при призначенні оптимальних режимів різання необхідно враховувати безліч факторів, які пов'язані з фактичним станом заготовки, інструменту та всієї технологічної системи в цілому. Цим і визначається актуальність оптимізації режимів механічної обробки виробів важкого машинобудування з врахуванням фактичного стану процесу в режимі реального часу

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана у відповідності з науковою тематикою «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» Донбаської державної машинобудівної академії Дк-01-2014 «Підвищення надійності та продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатів інструментальних систем важкого машинобудування» (0114U002757).

**Мета та задачі досліджень.** Мета роботи: підвищення продуктивності та точності обробки на важких верстатах за шляхом розробки інформаційних технологій для інтегрального комплексу оптимального управління технологічною системою.

### **Завдання дослідження.**

1 На основі аналізу сучасних методів оптимізації складних технічних систем та досвіду в механообробці обґрунтувати критерії та принципи інформаційної технології моделювання в реальному часі функціонування важких верстатів.

2 Сформулювати програмно-математичний комплекс для моделювання інформативних з позиції оптимізації процесів обробки на важких верстатах в реальному часі.

3 Розробити стратегію та критерії оперативної оптимізації процесу різання для систем адаптивного управління важкими верстатами.

4 Дослідити процеси, які протікають в умовах змінення параметрів процесу обробки на важких верстатах.

5 Запропонувати критерії, моделі та правила прийняття рішень при параметричній оптимізації управління важким верстатом в режимі реального часу.

*Об'єкт дослідження* – технологічна система важкого металообробного верстату.

*Предмет дослідження* – важкий верстат з ЧПК.

**Методи досліджень.** При виконанні роботи використані методи обчислювальної математики та аналітичної геометрії, інформатики, математичного моделювання та програмування, матричного аналізу, інтерполяції та апроксимації, математичної обробки результатів експериментів, технології машинобудування, теорії різання.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

Розроблено інформаційна технологія моделювання в реальному часі функціонування важких верстатів.

Сформовано програмно-математичний комплекс для моделювання інформативних з позиції оптимізації процесів обробки на важких верстатах в реальному часі.

Розроблено нові схеми та конструкції адаптивних верстатних вузлів, вимірювальних та діагностичних засобів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці експериментально-теоретичного і програмно-апаратного комплексів, а також установок і пристроїв для підвищення ефективності процесів обробки на верстатах з ЧПУ, в основу яких покладені:

- Створення конкурентоспроможних систем адаптивних управління технологічних систем важких верстатів.
- Розробка нових засобів вимірювання та діагностики для адаптивного управління

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку»- 2017р.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано тези доповідей в збірнику матеріалів конференції.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел – 72 найменування. Містить 125 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито суть і стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукові положення, які виносяться на захист, наведено дані щодо наукової новизни, обґрунтовано достовірність і показано практичну цінність отриманих наукових результатів, наведено дані про публікації й апробацію роботи.

**У першому розділі** здійснено аналіз технологічної ефективності обробки на верстатах з програмним управлінням і працездатності різального інструменту при виробленні експлуатаційного ресурсу і зносу верстатів з ЧПУ. Виявлено значимі

параметри і розроблено математичні моделі для реалізації системи адаптивного оптимального управління процесом механічної обробки на важких верстатах.

Систему параметрів, що впливають на процес різання, наведено на рис. 1.1. Вихідні параметри процесу різання можуть бути критеріями оптимізації керуючих параметрів. Розглядаючи різальний інструмент як невід’ємну частину процесу різання, можна вважати, що умовами його експлуатації, пов’язаними із процесом обробки деталей, є як керовані, так і збуджуючі параметри, що істотно впливають на працездатність.

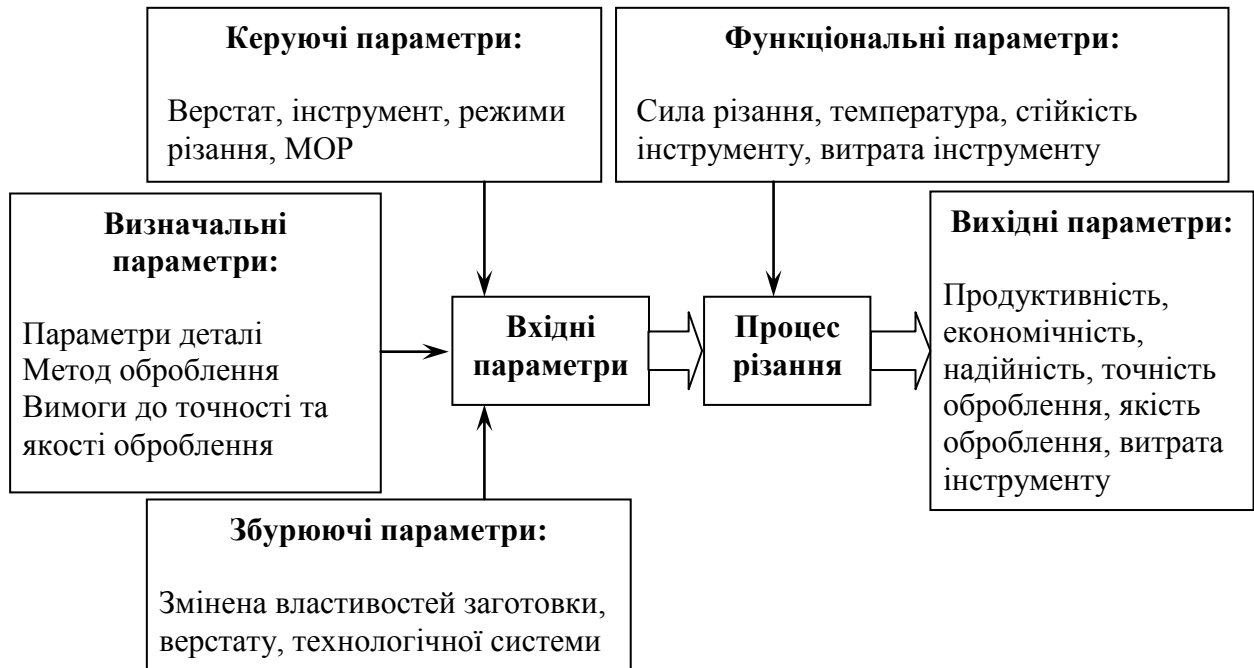


Рисунок 1.1 – Параметри процесу різання збірними різцями [35]

У табл. 1.1 наведено найчастіше використовувані критерії визначення граничного стану різального інструменту й методи визначення аналізованих параметрів цих критеріїв.

Значення критеріїв граничного стану інструменту визначалось на основі емпіричних методів дослідження. У сучасних умовах важкого машинобудування та обмеженості ресурсів немає можливості здійснювати велику кількість стійкісних випробувань через значну їх вартість. Тому, зараз є важливим розроблення математичних моделей, які дозволяють обґрунтовувати значення критерію граничного стану з мінімальними витратами на проведення експерименту

Існуючі критерії визначення граничного стану інструменту  
(з погляду працездатності) та їх характеристика

Критерій	Параметр, що аналізується	Метод визначення параметру
Розмір фаски зношування на задній поверхні різального інструменту	Аналізуються геометричні розміри різальної частини інструменту	Експериментальний, теоретичний або теоретико-експериментальний
Розмір лунки зношування на передній поверхні різального інструменту	Аналізуються геометричні розміри різальної частини інструменту	Експериментальний, теоретичний або теоретико-експериментальний
Величина сил різання [43]	Аналізуються різні силові показники (самі сили, потужність, крутний момент, спектр змінної складової сили різання)	Експериментальний
Ступінь зміни форми частотного спектра ЕРС різання [44]	Аналізуються електричні явища, що супроводжують процес різання	Експериментальний
Ступінь зміни параметрів акустичної емісії [45]	Аналізуються хвилі напружень у тілі різального інструменту	Експериментальний
Зміна ентропії системи [46]	Аналізується співвідношення зміни термодинамічної температури й підведеної енергії	Теоретичний або теоретико-експериментальний

Під оптимальним зношуванням різця розуміється такий, при якому сумарний період стійкості інструменту досягає максимальної величини. Якщо існує фаза катастрофічного зношування, то граничне зношення та період стійкості визначається за наведеною на рис. 1.2 схемою.

В зв'язку з відносною простотою контролю величини фаски зношування на задній поверхні різця, цей параметр на теперішній час є загальноприйнятим критерієм затуплення різального інструменту.

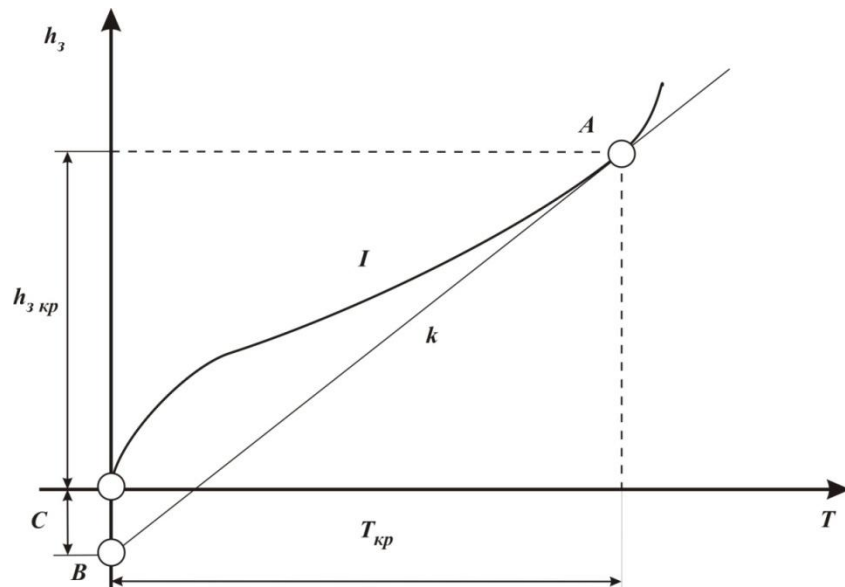


Рисунок 1.2 – Схема визначення критерію затуплення різця  $h_{зкр}$  і відповідного йому періоду стійкості  $T_{кр}$ .

$C$  – розрахунковий коефіцієнт,  $k$  – дотична до кривої зношування в точці  $A$ ,  
 $I$  – крива зношування (зміна фаски зношування із часом)

У другому розділі розроблена система прийняття рішень для реалізації оптимального адаптивного управління .

Наведено відомі процедури самонавчання стосовно процесу різання і запропонуємо нові процедури, що зважають на специфіку процесу різання на металорізальних верстатах.

Проведена оптимізація швидкості різання в режимі реального часу.

$$C^a = \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \quad (2.58)$$

$$a^{-1} = C^{-a} \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \ln T_i - \frac{1}{N} \sum_i T_i \quad (2.59)$$

$$\varphi_{7(c,m,a)} = C^a \frac{1}{N} \sum_i \ln V_i - \frac{1}{N} \sum_i (T_i V_i^m)^a \ln V_i = 0 \quad (2.60)$$

Прогнозування параметрів інструменту для адаптивних систем

Отримана система лінійних нерівностей і лінійної функції, що підлягає оптимізації, в сукупності являє собою формальний опис процесу різання металів на токарних верстатах.

$$W \left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 \rightarrow \max \\ -x_2 \leq C_1 \\ x_2 \leq C_2 \\ -x_1 \leq C_3 \\ x_1 \leq C_4 \\ x_1 + 0.35x_2 \leq C_5 \\ -x_1 \leq C_6 \\ -0.15x_1 + 0.75x_2 \leq C_7 \\ -0.15x_1 + 0.75x_2 \leq C_8 \\ -0.15x_1 + 0.75x_2 \leq C_9 \\ -0.3x_1 + 0.6x_2 \leq C_{10} \\ -x_1 - x_2 \leq C_{11} \\ x_2 \leq C_{12} \end{array} \right.$$

У третьому розділі проведено експериментальні дослідження адаптивних систем управління важкими токарними верстатами. Визначені параметри зношення різальних інструментів важких токарних верстатів з адаптивним управлінням.

Для визначення значення величини  $R_{eu}$  використано залежність, отриману шляхом статистичної обробки експериментальних даних:

$$R_{eu} = 1,1\sigma_T \left(\frac{\Theta_p}{\Theta}\right)^S \operatorname{arsh}\left(\frac{\dot{e}_e}{\dot{e}_0 \cdot e_0}\right), \Theta \geq \Theta_p,$$

де  $\dot{e}_0$ ,  $e_0$  – інтенсивності швидкостей деформацій і інтенсивності накопичених деформацій при механічних випробуваннях інструменту;  $R_T$  – границя плинності матеріалу інструменту при температурі навколишнього середовища;  $S$  – постійна, характерна для матеріалу інструменту. Якщо температура різання  $\Theta$  не перевищує температуру початку інтенсивного знеміцнення інструментального матеріалу  $\Theta_p$ , то приймається  $R_{eu} = R_T$ .

Прирівнюючи вирази ці вирази і зневажаючи величиною  $dh^2$ , як величиною другого порядку малості, після інтегрування отримано залежність зміни висоти площадки зношення від часу контакту:

$$h_{zn} = \sqrt{\frac{2\nu\tau\delta\eta P_u}{\operatorname{tg}\alpha}} \tau = \frac{l}{nS},$$

де  $\tau$  – час обробки однієї деталі,  $n$  – частота обертання шпинделя.

Після підстановки значень  $\eta$  і  $P_u$  одержано:

$$h_{zn} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2 \cdot q_{\max} \cdot \nu \cdot \tau \cdot \delta}{4,5 \cdot \operatorname{tg}\alpha(1-\mu)} \cdot \frac{R_e}{R_e^2 + R_{eu}^2}} & \text{при } \frac{q_{\max}}{7,5 \cdot R_e(1-\mu)} < 1 \\ \sqrt{\frac{2 \cdot \nu \cdot \tau \cdot \delta \cdot R_e^2}{\operatorname{tg}\alpha \cdot (R_e^2 + R_{eu}^2)}} & \text{при } \frac{q_{\max}}{7,5 \cdot R_e(1-\mu)} \geq 1 \end{cases}.$$

Тоді число деталей, обробка яких можлива до утворення гранично припустимої висоти площадки зношення по задній поверхні дорівнює:



$$N_{0.1} = \begin{cases} [h_{\text{зп}}] \cdot \sqrt{\frac{3,75 \cdot \text{tg} \alpha (1-\mu) (R_{\text{г}}^2 + R_{\text{гu}}^2)}{q_{\text{max}} \nu \tau \delta \sigma_s}} & \text{если } \frac{q_{\text{max}}}{4,5 R_{\text{г}} (1-\mu)} < 1 \\ [h_{\text{зп}}] \cdot \sqrt{\frac{\text{tg} \alpha (R_{\text{г}}^2 + R_{\text{гu}}^2)}{2 \nu \tau \delta R_{\text{г}}}} & \text{если } \frac{q_{\text{max}}}{4,5 R_{\text{г}} (1-\mu)} \geq 1 \end{cases}$$

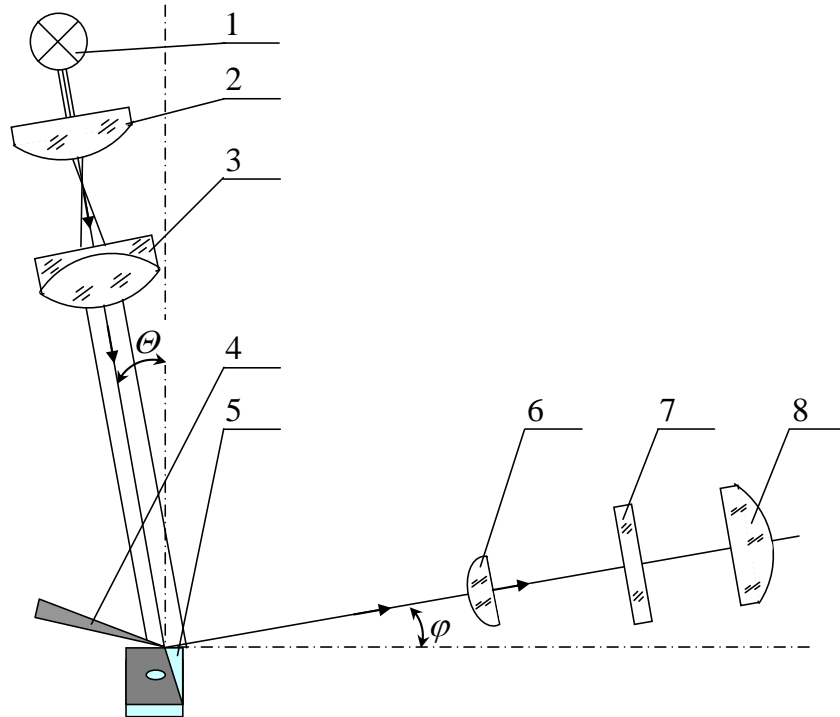


Рисунок – Оптична схема експериментальної установки

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень зношування різальних пластин середніх типорозмірів

$\tau$ , хв	$h_3$ , мкм	$h_{\text{л}}$ , мкм	$l$ , мкм
6	100	33	880
12	260	42	990
18	330	83	1160
24	375	100	1250
30	415	132	1290

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень зношування

$\tau$ , хв	$h_3$ , мкм	$h_{\text{л}}$ , мкм	$l$ , мкм
6	66	8	600
12	150	26	1000
18	166	33	1065
24	250	34	1100
30	250	50	1123

Аналіз результатів експериментів дозволяє зробити наступний висновок: теоретико-експериментальна модель процесу зношування забезпечує достатню для практичного застосування точність розрахунку геометричних характеристик зношування твердосплавного металорізального інструменту.

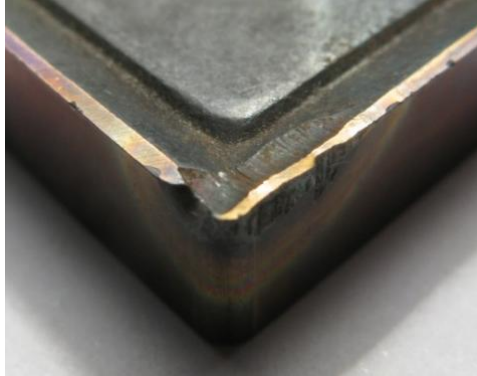


Рисунок 3 – Загальний вигляд зношеної різальної пластини

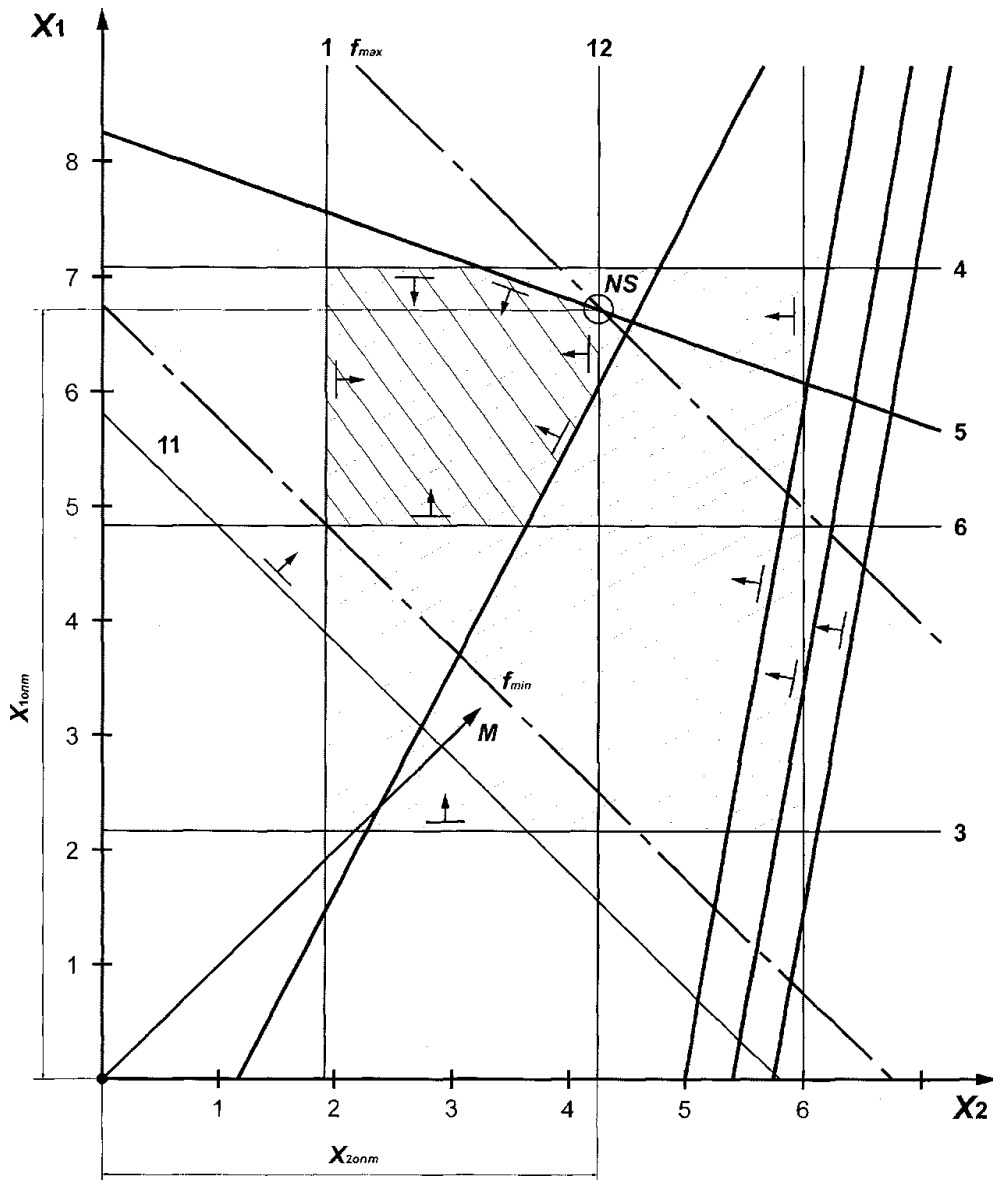


Рисунок 4 – Лунка зношення по передній поверхні різальної пластини

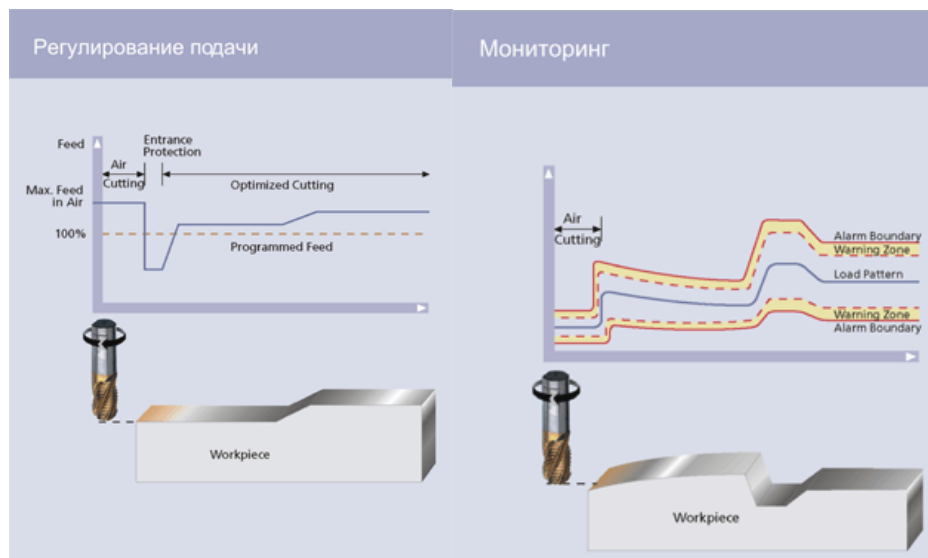


Рисунок 5 – Фаска зношування по задній поверхні різальної пластини

У четвертому розділі проведено моделювання і визначені критерії адаптивного управління процесами механообробки деталей на важких верстатах . Створено програмно-математичний комплекс для моделювання інформативних з позиції оптимізації процесів обробки деталей на важких верстатах.



Проаналізовані сучасні рішення в області застосування систем адаптивного управління



Модульна система контролю забезпечує надійний контроль інструменту для всіх процесів обробки різанням. Спеціально для обробних центрів і агрегатних

верстатів ця функціональність може бути досягнута без використання спеціальних датчиків, якщо СЧПУ оснащена цифровими приводами, наприклад, SIMODRIVE 611 digital.

Розроблено структуру системи адаптивного управління важкими верстатами і алгоритмів керування процесами різання

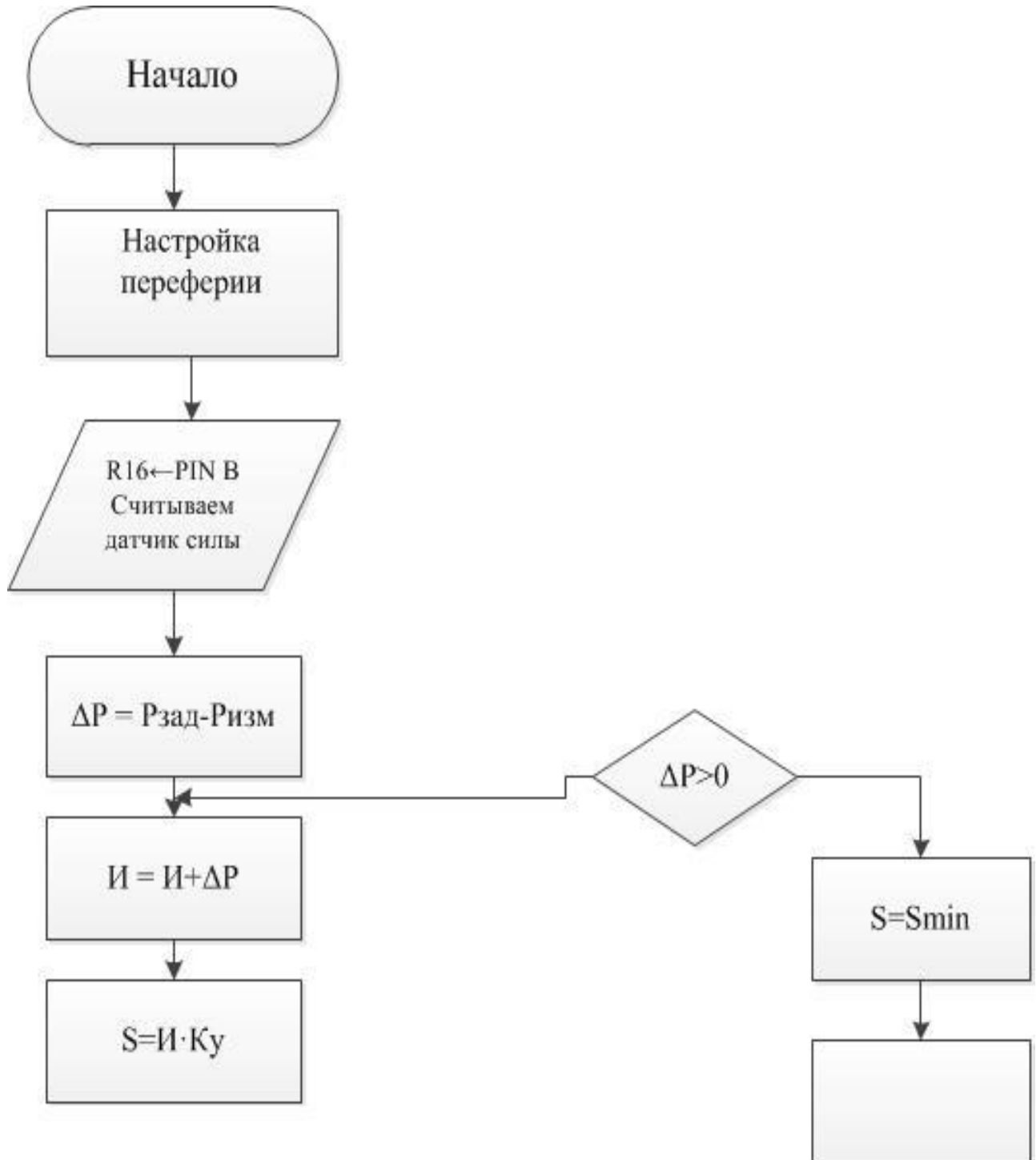


Рисунок 6 - Блок-схема системи автоматичного регулювання швидкості подачі важкого токарного верстату

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виявлено значимі параметри і розроблено математичні моделі для реалізації системи адаптивного оптимального управління процесом механічної обробки на важких верстатах.

2. Закони управління адаптивною системою отримані на основі оптимізації режимів різання. Критерієм оптимальності вибрано: показник продуктивності. Обмеженнями виступають: міцність і жорсткість різального інструменту; точність обробки; потужність електроприводу головного руху верстатах; задана продуктивність верстата на проектованій операції; найменша швидкість різання.

3. Проведено експериментальну перевірку оптимальних параметрів процесу різання. Встановлено взаємозв'язки між режимами різання і параметрами технологічної системи. Отримано стійкосні залежності, покладені в основу системи оптимального управління.

4. Розроблено блок-схеми адаптивного оптимального управління процесом обробки на важкому токарному верстаті. Як пристрій прийняття рішень, використовувалося спеціальне програмне забезпечення - стійка Heidenhain MANUALplus 620 з вбудованим PLC

5. Використання систем адаптивного оптимального управління дозволить скоротити витрати, підвищити точність, збільшити термін служби різального інструменту.

## АНОТАЦІЯ

**Жильцова А.В.** Підвищення ефективності токарної обробки на важких верстатах шляхом оптимізації режимів різання.

Магістерська робота за спеціальністю: 8.05050301.

Розроблено інтегральний комплекс оптимального управління технологічною системою, який включає важкий верстат, системи інструментів і інструментозабезпечення, систему адаптивного керування з комплектами вимірювальних і діагностичних засобів, математичні моделі функціонування технологічної системи. Алгоритми роботи оптимальної системи адаптивного керування формуються із включенням критеріїв: собівартість обробки, продуктивність, точність, якість, надійність системи й ін. Структура адаптивної технологічної системи має високий ступінь обхвату зворотними зв'язками: по відносному положенню й траєкторіям формотворних рухів елементів системи; їхньому фізичному стану й збурюючим факторам. Адаптивне керування процесами різання будується на базі багаторівневої системи прийняття рішень із елементами штучного інтелекту.

Ключові слова: ОПТИМІЗАЦІЯ, ЧПУ, ТОЧІННЯ, ОБРОБКА МЕТАЛУ РІЗАННЯМ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

## АННОТАЦИЯ

**Жильцова А.В.** Повышение эффективности токарной обработки на тяжелых станках путем оптимизации режимов резания.

Магистерская работа по специальности 8.05050301.

Разработан интегральный комплекс оптимального управления технологической системой, включающий тяжелый станок, системы инструментов и инструментообеспечения, систему адаптивного управления с комплектами измерительных и диагностических средств, математические модели функционирования технологической системы. Алгоритмы работы оптимальной системы адаптивного управления формируются с включением критериев: себестоимость обработки, производительность, точность, качество, надежность системы и др. Структура адаптивной технологической системы имеет высокую степень охвата обратными связями: по относительному положению и траекториям формообразующих движений элементов системы; их физическому состоянию и возмущающим факторам. Адаптивное управление процессами резания строится на базе многоуровневой системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта.

Ключевые слова: ОПТИМИЗАЦИЯ ЧПУ, ТОЧЕНИЕ, ДЕТАЛЬ, ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ.

## ABSTRACT

**Zhiltsova A.V.** Improving the efficiency of turning on heavy machine tools by optimizing cutting modes.

Master's work in the field: 8.05050301.

An integral complex of optimal control of the technological system is developed, which includes a heavy machine tool, tools and tools, an adaptive control system with sets of measuring and diagnostic tools, mathematical models of the functioning of the technological system. The algorithms of the optimal adaptive control system are formed with the inclusion of criteria: cost of processing, performance, accuracy, quality, reliability of the system, etc. The structure of the adaptive technological system has a high degree of coverage by feedback: in relative position and trajectories of form-forming motions of system elements; their physical condition and disturbing factors. Adaptive control of cutting processes is based on a multilevel decision-making system with elements of artificial intelligence.

Key words: OPTIMIZATION, CNC, PUTTING, DETAIL, MACHINE BUILDING, METAL PROCESSING, MATHEMATICAL MODEL.