

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет

Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 621.914.1

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 В.В.Шевченко
«14» 12 2018 р.

Магістерська дисертація

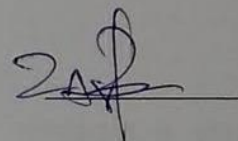
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

на тему: «Система підвищення якості процесу точіння в умовах
автоматизованого виробництва»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПБ-71мп
Завадський Андрій Васильович



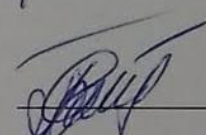
Керівник:

Доцент, к.т.н., доцент,
Шевченко В.В.



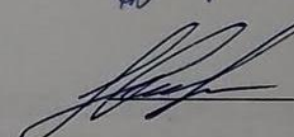
Консультант з Стартап-проект:

Доцент, к.е.н., доцент,
Бояринова К.О.



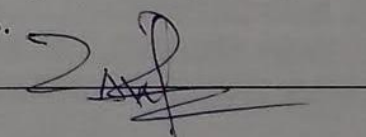
Рецензент:

проф. каф. ПБ Д.т.н. Киричук Ю.В.



Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент



Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

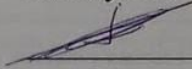
Кафедра виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-
професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології» («Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва
приладів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 В.В. Шевченко
«05» 11 2018 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

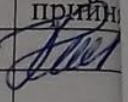
Завадському Андрію Васильовичу

1. Тема дисертації «Система підвищення якості процесу точіння в умовах автоматизованого виробництва», науковий керівник дисертації Шевченко В.В., к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 р. № 4078-с
2. Термін подання студентом дисертації 10 грудня 2018 р
3. Об'єкт дослідження: Якість процесу механообробки
4. Вихідні дані: Технологія токарної обробки
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз існуючих методів забезпечення якості та постановка задачі. 1.1. Класифікація існуючих методів і систем забезпечення якості. 1.2. Системи управління якістю по точності. 1.3. Системи управління якістю по силі і потужності різання. 1.4. Системи стабілізації динаміки технологічного обладнання. 2. Дослідження динаміки процесу різання при точінні. 2.1. Причини виникнення динамічних явищ в ТОС. 2.2. Аналіз динаміки процесу механічної обробки. 2.3. Аналіз впливу динаміки ТОС на точність деталі. 3. Експериментальні дослідження динаміки процесу різання. 4. По-будова системи стабілізації динаміки верстата в процесі різання. 5. Стартап-проект реалізації системи підвищення якості процесу точіння в умовах автоматизованого виробництва.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Стан питання підвищення якості процесу точіння. Мета роботи, об'єкт та предмет дослідження. Наукова новизна та практична корисність. Аналіз автоматизованих систем підвищення якості процесу точіння. Інформаційна та функціонально-параметрична модель процесу точіння.

Структурна та функціональна схеми автоматизованої системи. Методика проведення досліджень. Обладнання та засоби контролю. Алгоритм проведення дослідження. Результати дослідження процесу точіння.

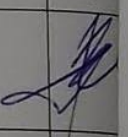
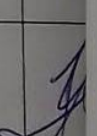
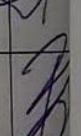
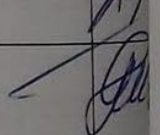
7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Бояринова К.О., к.е.н., доцент		

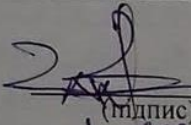
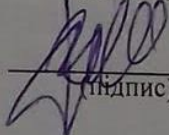
9. Дата видачі завдання 3.09.2018 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Підпис
1	Виконати аналіз стану контролю параметрів якості процесу точіння та постановка задач дисертаційних досліджень.	17.09.2018 р.	
2	Створити інформаційну та функціонально-параметричну модель процесу точіння.	08.10.2018 р.	
3	Розробити структурну та функціональну схеми контролю параметрів якості процесу токарного оброблення	15.10.2018 р.	
4	Розробити методику дослідження процесу токарного оброблення сталей засобами автоматизованої системи контролю параметрів.	12.11.2018 р.	
5	Виконати практичну апробацію результатів роботи автоматизованої системи контролю.	22.11.2018 р.	
6	Розробка стартап-проекту реалізації системи підвищення якості процесу точіння в умовах автоматизованого виробництва	03.12.2018 р.	

Студент

Науковий керівник дисертації


(підпис)

(підпис)

А.В. Завадський
(ініціали, прізвище)

В.В. Шевченко
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

МЕХАНООБРОБКА, ПРОЦЕС МЕХАНООБРОБКИ, ТЕХНОЛОГІЧНА ОБРОБЛЮЮЧА СИСТЕМА, ПРОЦЕС РІЗАННЯ, ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ, СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІКИ ВЕРСТАТА.

Атестаційна магістерська робота складається з чотирьох розділів та п'яти додатків, розташована на 80 сторінках, містить 24 ілюстрації та 3 таблиці.

Задачею атестаційної роботи є розробка методики управління стійкістю і якістю процесу точіння на верстаті з числовим програмним управлінням шляхом моніторингу динамічного стану обробляючої системи та розробка схеми контролю і управління динамікою технологічної обробляючої системи та якості процесу механообробки.

В даній атестаційній роботі проведено аналіз динаміки процесу механічної обробки та впливу динаміки технологічної обробляючої системи на точність деталі; було виявлено основні закономірності динамічних режимів та визначена залежність між ними.

В результаті роботи розроблена нова методика стабілізації обробляючої системи при точінні на основі принципу динамічного гасіння автоколивань в пружньо-дисипативній системі верстата і уведення її завжди існуючих вібрацій із резонансних зон за рахунок ціленаправленої зміни швидкості різання. Також розроблена нова ефективна пошукова система стабілізації обробляючої системи і підвищення якості механообробки точінням за рахунок моніторингу динамічного стану верстата.

ABSTRACT

MACHINING, MACHINING PROCESS, TECHNOLOGICAL PROCESSING SYSTEM, PROCESS OF CUTTING, MAINTENANCE OF QUALITY, STABILIZATION SYSTEM OF MACHINE TOOL DYNAMICS.

Attestative master work consists of four sections and five additions, located on 80 pages, contains 24 illustrations, 3 table.

The task of attestative work is development of a technique of management by stability and quality of turning process on the machine tool with DPM by monitoring a dynamic status of processing system and development of the circuit of the control and management of dynamics of technological processing system and quality of process machining.

In the given attestative work the analysis of dynamics of process of machining and influence of dynamics of technological processing system on accuracy of a detail is lead; the basic laws of dynamic modes and the certain dependence between them have been revealed.

As a result of work the developed new technique of stabilization of processing system at turning on the basis of a principle of dynamic clearing self-oscillations in it elastic to system of the machine tool and introduction of it always existing vibrations from resonant zones at the expense of purposeful change of speed of cutting. Also the developed new effective search engine of stabilization of processing system and improvement of quality turning machining at the expense of monitoring a dynamic status of the machine tool.

СКОРОЧЕННЯ

АФЧХ – амплітудні фазово-частотні характеристики

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

МО – механічна обробка

ПМО – процес механічної обробки

ПР – процес різання

ТОС – технологічна обробляюча система

ЧПУ – числове програмне управління

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
СКОРОЧЕННЯ	6
ЗМІСТ	7
ВСТУП	9
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ	11
1.1 Класифікація існуючих методів і систем забезпечення якості	11
1.2 Системи управління якістю по точності	14
1.3. Системи управління якості по силі і потужності різання	18
1.4. Системи стабілізації динаміки технологічного обладнання	21
Висновки по розділу.	28
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ	29
2.1. Причини виникнення динамічних явищ в ТОС	29
2.2. Аналіз динаміки процесу механічної обробки	32
2.3. Аналіз впливу динаміки ТОС на точність деталі	37
Висновки по розділу	42
3. ПОБУДОВА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІКИ ВЕРСТАТА В ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ	44
3.1. Розробка методики контролю	44
3.2. Розробка схеми контролю та управління динамікою ТОС та якості ПМО 50	
3.3. Апробація результатів	59
Висновки по розділу.	62
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ	63
4.1. Опис обладнання та вимірювальних засобів, що застосовуються	63

4.2. Дослідження динаміки стружкоутворення	64
4.3. Експериментальне дослідження нелінійно-гістерезисної природи сили різання	68
Висновки по розділу.	70
Висновки по роботі	71
Література.....	72
Додаток А.....	76
Додаток Б.....	78
Додаток В.....	80
Додаток Г.....	83
Додаток Д.....	85

ВСТУП

Одним з найважливіших напрямків розвитку сучасного приладобудування є комплексна автоматизація металообробного виробництва, його перехід на безлюдні технології, що вимагає використання сучасного обладнання: верстатів з числовим програмним керуванням, багатоцільових оброблюючих центрів, роботизованих технологічних комплексів. Таке технологічне обладнання дозволяє значно підвищити продуктивність виробництва та забезпечити високу якість і точність деталей в автоматичному режимі. А економічна доцільність широкого використання такого автоматизованого обладнання визначається скороченням чисельності верстатників, підвищенням технологічної гнучкості та можливостей кожного робочого місця через розширену багатофункціональність таких верстатів, економією виробничих площ, покращенням умов праці.

Створення на базі цього обладнання автоматизованих виробництв, а в перспективі заводів-автоматів з управлінням від електро-обчислювальних машин ставить завдання активного технологічного діагностування і моніторингу процесу обробки, так як без таких систем контролю якості процесу таке обладнання не буде ефективним, через відсутність інформації про технічний стан процесу механічної обробки. Тому використання такого автоматизованого обладнання на базі нових ЕОМ з впровадженням ефективних систем технічного діагностування та вдосконалених автоматичних систем керування технологічними процесами дозволить максимально автоматизувати виробництво без втрати продуктивності виробництва.

Однак широке використання такого перспективного багатофункціонального обладнання та його ефективна експлуатація стримується в даний час рядом суттєвих причин, як наприклад:

1. Відсутність високоякісного програмного забезпечення, яке б враховувало всі технологічні характеристики процесу різання, його

багатопараметричну функціональну взаємозалежність між ними.

2. Низька надійність самого процесу механообробки, який відноситься до ряду низькостійких динамічних процесів з малонадійним, швидкозношуємим ріжучим інструментом, а керуючу інформацію про їх технічний стан система ЧПК не має.

3. Відсутність на таких високоавтоматизованих багатофункціональних верстатах з ЧПК систем зворотного зв'язку, котрі на основі інформації про хід протікання процесу металообробки дозволили б підвищити надійність роботи таких технологічних обробляючих систем (ТОС).

Проблема підвищення рівня надійності роботи таких верстатів може бути вирішена на основі створення ефективних автоматичних систем контролю та діагностики, що розпізнають стан процесу різання в умовах обмеженої інформації та видають відповідну керуючу програму на систему числового програмного керування верстата. Тому проблема створення надійної системи підвищення якості процесу обробки на такому обладнанні є актуальною.

Об'єктом дослідження є процес токарної обробки деталей приладів.

Предметом дослідження є дослідження динамічних процесів при точінні.

Метою роботи є розробка системи підвищення якості процесу точіння в умовах автоматизованого виробництва на основі моніторингу динамічного стану обробляючої системи, що дозволить підвищити продуктивність та знизити собівартість.

Для досягнення мети були вирішені такі задачі:

- Досліджено основні причини виникнення вимушених коливань в процесі механічної обробки.
- Встановлено ступінь їх впливу на динамічний стан обробної системи.
- Розроблено математичні моделі взаємозв'язку динамічних процесів на якість обробки.
- Провести експериментальні дослідження.

- Розроблено систему підвищення якості процесу точіння в умовах автоматизованого виробництва.

Наукова новизна - розроблено математичну модель процесу точіння, на основі дослідження динамічних процесів при точінні.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ

Виробництво машин та приладів будується на базі незалежного виготовлення окремих взаємозамінних деталей, вузлів та агрегатів.

Взаємозамінним називають виробництво, при якому проектування, виготовлення і контроль виконують таким чином, що при складанні або ремонті будь-яка з незалежно виготовлених деталей може бути змонтована у вузол без якого-небудь доопрацювання, а вузол і агрегат в цілому відповідатимуть вимогам, що пред'являються.

Ідеального виробництва, в якому відсутні будь-які похибки виготовлення, обумовлені законами фізики, не існує. Отже, для досягнення взаємозамінності деталі повинні бути виготовлені за граничними розмірами відповідно до прийнятої в техніці системи допусків і посадок. Відповідність, при виготовленні деталі вказаним допускам і є необхідною точністю, що забезпечує взаємозамінність деталей і вузлів. Це дає можливість використати в будь-якій ланці техніки такий стандарт по точності виготовлення, що значно знижує собівартість виробництва.

1.1 Класифікація існуючих методів і систем забезпечення якості

Забезпечення заданої точності деталі є головна вимога до технологічного процесу. Під точністю обробки розуміють ступінь відповідності виготовленій деталі вимогам креслення та технічним умовам. Точність деталі складається з точності виконання розмірів, форми, відносного положення поверхонь деталі і шорсткості поверхонь. Під точністю форми поверхні розуміють ступінь відповідності її розмірів в

осьовому і поперечному перетинах геометричній формі. При розробці технологічного процесу виготовлення деталі, для забезпечення необхідної точності обробки, доводиться враховувати наступні причини, що викликають похибки обробки:

- Методичні похибки.
 - Похибки схеми обробки.
 - Похибки базування деталі для обробки.
 - Похибки методу обробки.
- Похибки неточної установки заготовки.
 - Похибки зсуву осі заготовки від похибки форми базової поверхні.
 - Похибки від зсуву із-за наявності посадочних зазорів.
 - Похибки від зсуву силами закріплення.
- Похибки настройки верстата на розмір.
 - Похибки від неточності вимірювальних засобів при контролі деталей.
 - Похибки від наявності регулювальних зазорів в ТОС.
 - Похибки втрати базових нулів, як зсув осі настройки за часом.
- Похибки механічної обробки.
 - Похибки неточності роботи верстата.
 - Похибки пристосувань.
 - Похибки неточності виготовлення мірного ріжучого інструменту.
 - Похибки зносу ріжучого інструменту.
 - Похибки від пружних деформацій ТОС силами різання.
 - Похибки від температурних деформацій ТОС.
 - Похибки від вібрацій при механообробці.

Одна з найважливіших вимог, що пред'являються до токарної обробки (як і до інших видів обробки на металоріжучих верстатах), — досягнення заданої точності оброблюваних деталей, яка характеризується чотирма показниками [6]: 1) точністю розміру поверхонь; 2) розташуванням однієї поверхні щодо іншої; 3) геометричною формою; 4) шорсткістю поверхні.

При розгляді деталей типу тіл обертання розрізняють геометричну форму в подовжньому і поперечному перетинах. Відхилення від прямолінійної геометричної форми валу в подовжньому перетині є результатом відхилення утворюючих від прямолінійності (увігнутість, опуклість і зігнутість) і паралельності (конусність). У загальному випадку відхилення від правильної геометричної форми (Рисунок 1.1.) та (Рисунок 1.2.) деталі є сукупністю вказаних вище відхилень.

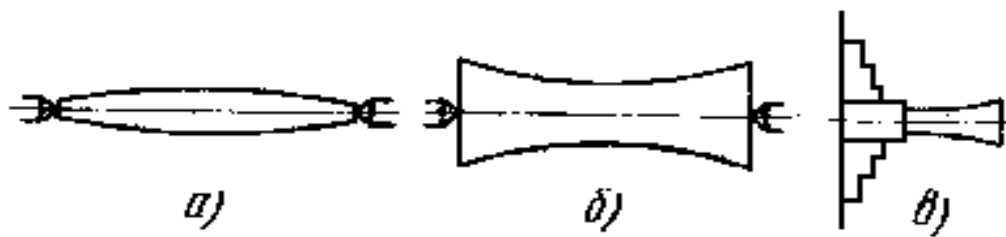


Рисунок 1.1. Відхилення геометричної форми: а) опуклість; б) увігнутість; в) зігнутість

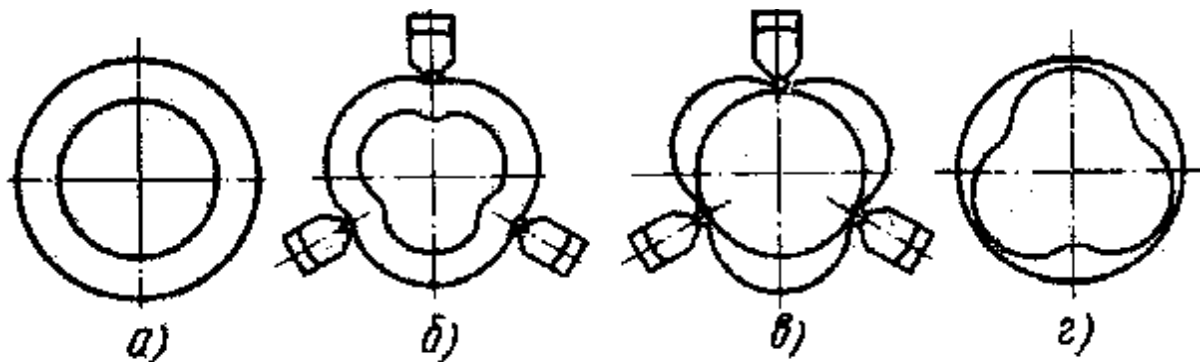


Рисунок 1.2: а) - заготівка до установки на верстаті; б) - після закріплення в трикулачковому патроні; в) - після обробки; г) - після

1.2 Системи управління якістю по точності

При виготовленні деталі на її точність і якість впливає багато параметрів. Наприклад точність самої деталі обмежена точністю використовуваних інструментів, пристосувань, пристроїв і вимірювальних інструментів зокрема. Кожна з цих складових може внести свою випадкову похибку. У зв'язку з цим розроблені системи управління точністю. Ці системи можна розділити на дві основні категорії:

I. Пасивні системи управління якістю.

II. Активні системи управління якістю.

I. Пасивні системи управління якістю, у свою чергу можна розбити на наступні складові:

1.1. Організаційні заходи щодо вибору найоптимальніших характеристик технологічного процесу (ТП) обробки.

1.1.1. Вибір оптимального методу обробки на вимоги заданої точності і шорсткості поверхонь;

1.1.2. Вибір оптимальної схеми обробки, тобто необхідної кількості операцій, переходів-проходів, додаткових чистових операцій;

1.1.3. Вибір якнайкращої схеми установки деталі і її кріплення, для забезпечення: найбільшої жорсткості деталі, усунення похибки установки (базування), за початкову базу необхідно брати найкращу поверхню (одну на всіх операціях обробки);

1.2. Вибір оптимальної схеми контролю.

1.2.1. операційний контроль – введення на останніх операціях самим робочим у вигляді останнього переходу, де вказують, що й як контролювати. Тоді вірогідність виходу якісної продукції:

$$P_{ki}=[(1-(1- P_i(\tau)))(1- P_{обнi})] \quad (1.1)$$

де P_i – вірогідність надійності даної операції; $P_{\text{обні}}$ – вірогідність виявлення дефекту на деталі даним операційним контролем.
 $P_{\text{обн}} = (0,75 \div 0,95) < 1$ (1.2)

Тоді по всьому ТП:

$$P_{\text{к тп}} = \prod_{i=1}^n [(1 - (1 - P_i(\tau)))(1 - P_{\text{обні}})]_i < 1. \quad (1.3)$$

1.2.2. Міжопераційний контроль якості – вводиться на відповідальних операціях і після завершення ТП.

Тоді:

$$P_{\text{к тп}} = \prod_{i=1}^n [(1 - (1 - P_i(\tau))) \prod_{j=1}^m (1 - P_{\text{боні}})]_i < \sim 1. \quad (1.4)$$

Де m – число операцій між операційного контролю, які проводяться контролером, майстром і контролером-майстром.

1.3. Вибір найбільш раціональних режимів обробки, для забезпечення необхідної точності чистоти оброблюваної поверхні. При високоточних роботах технолог зобов'язаний вказати допустимі режими обробки: швидкість різання - V м/хв, глибину різання - t мм, подачу - S мм/об.

1.4. Управління точністю і продуктивністю процесу за допомогою періодичних допоміжних налаштувань. Це необхідно для компенсації похибки розмірного зносу інструменту при обробці валів для компенсацій впливу спрацьовування різця внаслідок його затуплення і збільшення пружного відштовхування. В технологічній системі здійснюють переміщення різця на величину, рівну половині зсуву вершини кривої розсіювання ($A = A_1/2$) [2], викликаного впливом змінних похибок (Рисунок 1.3.). В результаті цього поле розсіювання розмірів заготовок повертається з положення “б” у положення “а” і небезпека появи браку усувається.

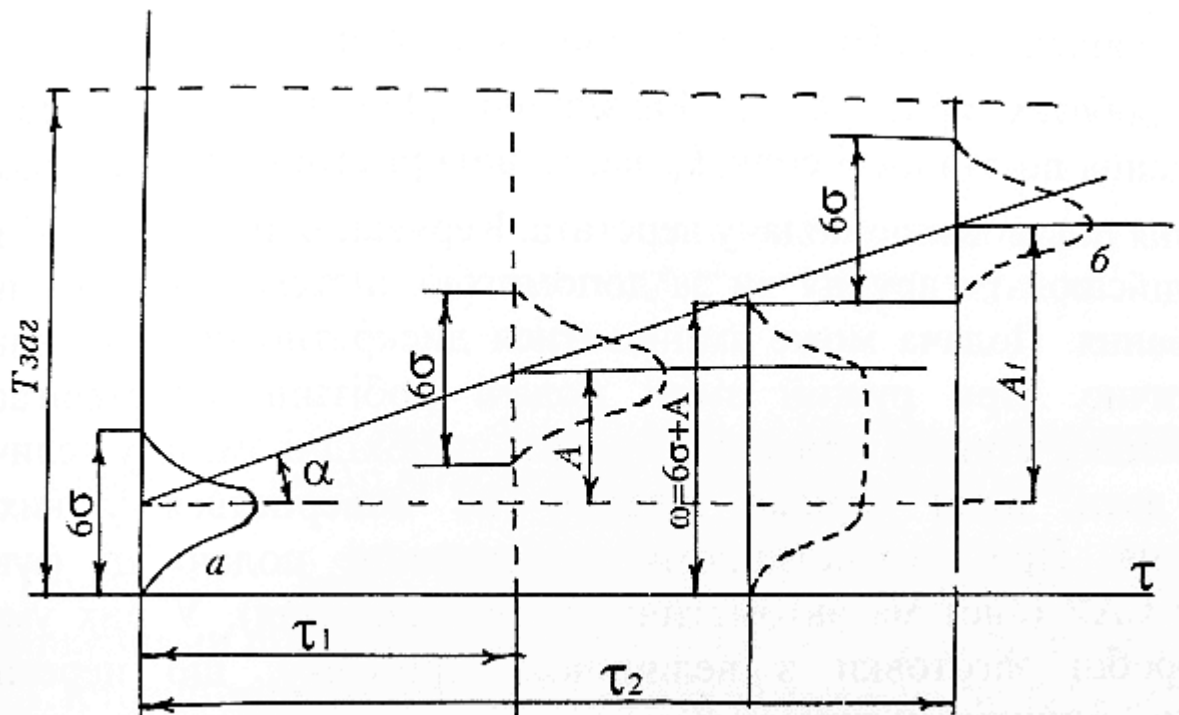


Рисунок 1.3. Управління точністю і продуктивністю процесу за допомогою періодичних допоміжних настройок.

Таке втручання в організацію ТП є активним елементом. Проте, оскільки ці розрахунки засновані на апіорних даних – то цей метод відноситься до пасивного управління.

2. Активні системи управління якістю.

Системи автоматичного позиціювання інструменту, роботів і т.п. Сучасні високоавтоматизовані системи з ЧПУ (числовим програмним управлінням), що володіють першокласними системами автоматичного управління, мають головний недолік у відсутності системи контролю за ходом ТП і його якістю. Такі системи працюють за жорсткою програмою високоточних переміщень робочих органів устаткування з точністю до 1мкм, з чіткою реєстрацією цих переміщень. Але є неминучі виробничі причини порушення точності переміщень, які обумовлені наступними чинниками:

- Старіння і знос устаткування що призводить до порушення траєкторій переміщень ТОС за рахунок появи зазорів, хоча система реєстрації точних переміщень залишається в робочому стані.

- Вплив температурних деформацій системи під час роботи ТОС від дії зовнішньої температури або тепла, що виділяється гідравлікою, яка управляє в перебігу робочого дня і що деформує робочі органи, змінюючи розташування головних точок схеми обробки.
- В процесі механічної обробки зношується ріжучий інструмент, можливий скол ріжучої кромки – це також змінює координати розташування ріжучої кромки або вершини інструменту щодо осі настройки.

Все це призводить до порушення точності роботи системи, яка не втрачає своїх характеристик точного переміщення елементів. Переміщення реєструють такими методами:

- 1 Безконтактні системи, які використовують для позиціювання робочих органів інструменту.
 - 1.1. Плоскі індуктосини – точність реєстрації системою 1 мкм;
 - 1.2. Система з реєстрацією точних переміщень (оптична), типу фокусин, що має дві точні мікрометричні шкали своїми рисками утворюючі квадрати. Одна з шкал повернена на 45°, а лазерно-оптична система веде облік ступеня перекриття 50 кліток; результат фіксується фотоелектричною матрицею.
 - 1.3. Система на основі штрих-кодів (за рахунок електромагнітного запису таких штрихів), точність складає 1 мкм.
- 2 Системи дотику – також використовують для позиціювання робочих органів, ТОС і інструменту, їх періодичної корекції.
 - 2.1. Корекція положення вершини ріжучого інструменту;
 - 2.2. Для точних вимірювальних систем;
 - 2.3. Для корекції точного позиціювання робота.

На підставі вищевикладеного і розглядаючи метало ріжучий верстат як єдину технологічну оброблювальну систему (ТОС), активну систему управління якістю можна представити у вигляді схеми 1 (Додаток А).

1.3. Системи управління якістю по силі і потужності різання

При обробці деталей на метало ріжучих верстатах, особливо на попередніх операціях, завжди мають місце пружні переміщення в системі ТОС, величина яких залежить від жорсткості системи ТОС, напряду сили різання та інших. Наприклад, під дією сил різання, передній центр може зміститися що до осі ОО не навантаженого верстата на величину h_1 (Рисунок 1.4.), а задній - на величину h_2 . Деталь при цьому прогнеться на величину h_3 , а супорт з різцем зміститься на величину h_4 . Ці деформації на практиці можуть виявлятися як спільно, так і окремо, що в сукупності призводить до відхилення геометричної форми деталі.

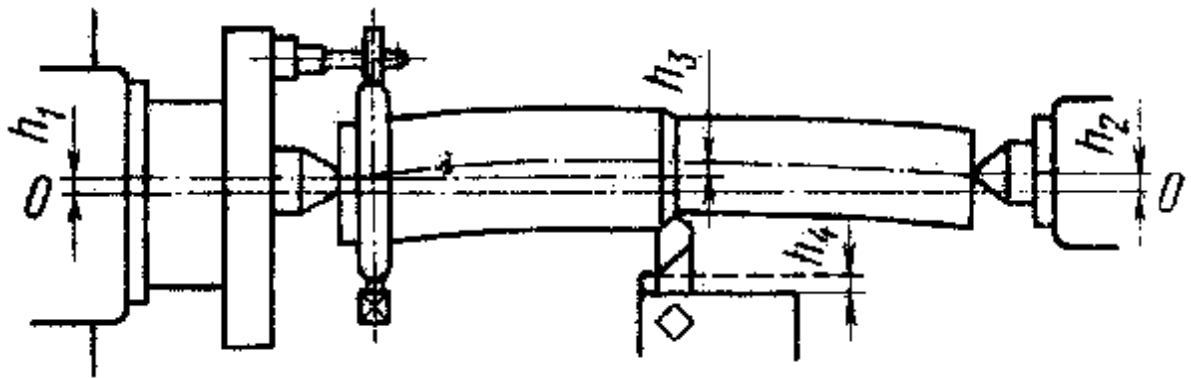


Рисунок 1.4.

Вимірювання пружного переміщення системи ТОС здійснюються двома засобами, запропонованими Б. С. Балакшиним [7]. Перший спосіб полягає у вимірюванні відносних переміщень двох ланок системи, другий — у визначенні пружного переміщення ланки, спеціально вбудованої в систему ТОС. Вже в перших дослідженнях пружних переміщень [8] було виявлено перевагу другого засобу — можливість вибирати ланку з необхідною пружною характеристикою.

При включенні динамічного вузла в систему ТОС найбільш важливе значення має вибір місця включення, від якого залежить точність вимірювання сили, що діє на цю ланку. Вибір в якості регульованої сили різання або її складової величини P_y , що пояснюється її домінуючим впливом на величину пружного переміщення.

Управління точністю обробки шляхом зміни сили різання можна здійснювати різними засобами. Розглянемо їх на прикладі токарної обробки. Як відомо, сила різання — векторна величина, що є функцією декількох аргументів, тобто:

$$P=f(C_P; t; S; v; K_i)$$

де C_P — коефіцієнт, що характеризує матеріал заготовки; t — глибина різання, мм; K_i — коефіцієнт, що враховує умови обробки і геометрію ріжучого інструменту; S — подовжня подача, мм/об; v — швидкість різання, м/хв.

Величина і напрям вектора сили різання визначаються трьома її складовими, рівняння яких приведені нижче:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= C_{Pz} t^{x_{pz}} S^{y_{pz}} V^{n_{pz}} HB^{z_{pz}}, \\ P_y &= C_{py} t^{x_{py}} S^{y_{py}} V^{n_{py}} HB^{z_{py}} \\ P_x &= C_{px} t^{x_{px}} S^{y_{px}} V^{n_{px}} HB^{z_{px}} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

де HB — твердість матеріалу по Брінеллю.

З формул (1.5) видно, що коливання величини сили різання обумовлені зміною як твердості, так і глибини різання, що змінюється унаслідок коливань припусків на обробку p . Коливання сили різання викликають, у свою чергу, зміни величини пружних переміщень в розмірних та кінематичних ланцюгах системи ТОС, що породжують похибки розмірів оброблюваних деталей.

При управлінні величиною сили різання за допомогою зміни подовжньої подачі S розмір статичної настройки стабільний. Застосування цього засобу на практиці не викликає особливих ускладнень; у переважній більшості досліджень управління пружними переміщеннями впливаючи на силу різання здійснювалася через подачу S .

На цей час вирішений ряд завдань, пов'язаних з управлінням пружними переміщеннями системи ТОС.

Завдання управління процесом металообробки вирішувалося в два етапи: спочатку розроблялися пристрої для ручного управління силою

різання або її складовими (у систему ТОС вбудовувались динамометричний вузол з приладом візуального спостереження і механізм безступінчатої зміни подовжньої подачі), а потім створювалися системи автоматичного регулювання. Ручне управління пружними переміщеннями описане в [9].

Пізніше стабілізація пружних переміщень була досягнута за допомогою систем регулювання сили різання або її складової. Перша така система автоматичного регулювання радіальної сили була розроблена [10] стосовно круглошліфувального верстата (модель 3151). Вона дозволяла проводити обробку при постійній величині P_r , що підвищувало продуктивність шліфування.

Чжен-хуа-ан [11] при токарній обробці здійснював управління пружними переміщеннями системи ТОС з метою скорочення похибки форми подовжнього перетину. При цьому різко підвищилася точність обробки.

М. М. Тверської [12], вирішуючи питання стабілізації пружного переміщення системи ТОС, прийняв до уваги неможливість обліку затуплення різця.

Б. М. Базрову [13] вдалося підвищити точність форми подовжнього перетину шляхом програмної зміни сили P_y і жорсткості j системи ТОС на токарно-гвинторізному верстаті моделі 1А62. В цих дослідях похибка форми деталі, обумовлена дією систематичних чинників, а також коливанням припуску заготовки (припуск змінювався впродовж проходу на 50%), скоротилася в 3 рази і не перевищувала 0,045 мм; при цьому основний технологічний час обробки однієї деталі зменшився на 30 %.

1.4. Системи стабілізації динаміки технологічного обладнання

При обробці деталей на токарних верстатах, виникають динамічні коливання, викликані неврівноваженістю закріпленої заготовки в патроні, недостатньою жорсткістю і точністю вставного заднього центру.

Згідно В. Ю. Котелевському [23], що проводив дослідження по автоматичному врівноваженню системи шпиндель — деталь токарних верстатів, значна частка неврівноваженості цієї системи доводиться на патрон, в якому закріплюється деталь.

У [23] приведені дані по неврівноваженості нових трикулачкових патронів, зведені авторами цієї роботи в таблицю 1.1. Для врівноваження сили P , що з'являється від неврівноваженості заготовок, між передньою опорою шпинделя і заготовкою слід застосувати силу Q , прикладену проти P (Рисунок 1.5.).

Таблиця 1.1. Залежність неврівноваженості патронів від їх діаметрів і маси

Діаметр патрона Мм	Маса патрона Кг	Неврівноваженість, г/см		
		Допустима ГОСТом	заміряна	Рекомендована ЭНИМСом
110	2,5	77,0	38,0	34,0
135	4,0	94,5	68,5	54,5
165	6,0	132,0	78,0	82,0
130	11,3	152,0	131,0	153,0
240	20,0	235,0	201,0	273,0
270	22,2	252,0	423,0	303,0
325	40,0	325,0	651,0	545,0
380	49,0	418,0	2132,0	607,0

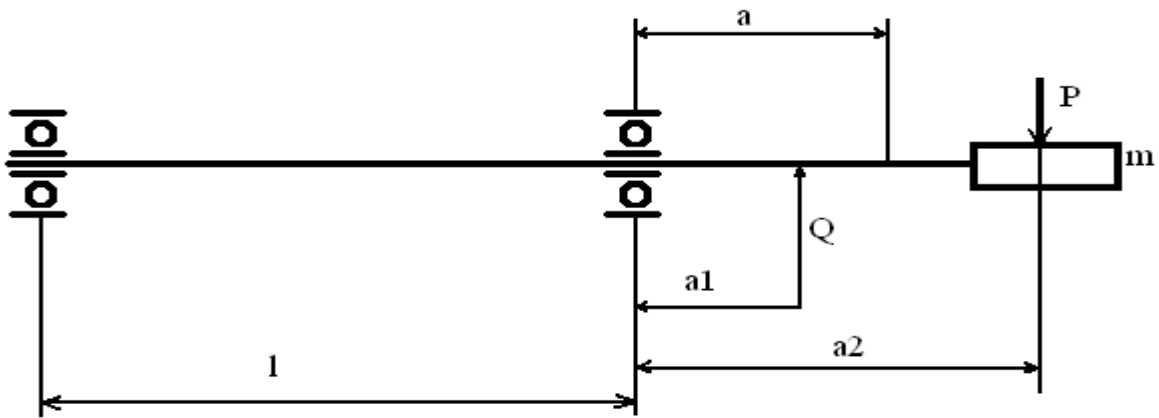


Рисунок 1.5. Схема автоматичного врівноваження групи шпиндель— деталь

В. Ю. Котелевский розглядав також вплив вигинаючого моменту M_{PQ} на вимушені коливання пружного шпинделя, оскільки цей момент невірноважений в консольній частині шпинделя (Рисунок 1.5.). Він прийшов до висновку, що врівноваження вузла шпинделя за допомогою сили Q у разі патронних робіт виправдане для достатньо жорстких шпинделів, коли амплітуда змінних y_0 та β_0 допустимо мала, а сумарний поперечний зсув шпинделя в даному перетині дорівнює

$$y_c = y_0 + \beta_n L \quad (1.6)$$

При цьому дія моменту M_{PQ} виявляється головним чином в деформаціях передньої і задньої опор шпинделя і при створенні врівноважуючої сили Q в осьовій площині; реакції R_1 та R_2 значно ослаблюють дію P і M_d на передню і частково на задню опори (або навпаки), внаслідок чого практично усуваються коливання шпинделя, що визначається змінною β_n . При дослідженні динаміки врівноваження системи шпиндель — деталь автор не враховував вплив так званого гіроскопічного ефекту, який, як відомо, виявляється при дії сил обертання на тіло, що швидко обертається. У загальному випадку невірноваженості заготовки, що обробляється на верстаті, наявність сили P_n і моменту M_d створює умови для виникнення гіроскопічного моменту, який сприяє зменшенню відхилення головної центральної осі інерції вузла від осі обертання. При патронній обробці на токарному верстаті, коли момент M_d не може мати значної величини,

впливом гіроскопічного ефекту краще нехтувати, оскільки його враховування потребує розгляду руху вузла в двох координатних площинах — UOX та ZOX , що сильно ускладнює обчислення.

На думку В. Ю. Котелевського, інтенсивність коливання заготовки разом зі шпинделем визначає точність обробки на верстаті.

Ще одним важливим напрямком управління якістю механообробки є стабілізація динамічних явищ, що виникають в ТОС під дією динамічно змінної сили різання $\Delta P_{\text{дин}}(\tau)$. Виникаючий з цієї причини автоколивальний процес в пружній системі верстата призводить до появи динамічних погрешностей обробки у вигляді хвилястості, огранності та тін одержаної поверхні деталі. Стабілізація таких шкідливих явищ проводиться деякими методами.

Так ряд дослідників розробили метод стабілізації шляхом навішування на шпиндель верстата або різцетримач балансуючих динаміку вільно підвішених з малим зазором кілець. При коливаннях елементів верстата ці кільця із-за зазору запізнюються з ударом по цих елементах вносячи свої зрушені по фазі і часу удари, гасять коливання в системі. Головним і великим недоліком такого методу є трудність підбору ваги і розміру таких кілець і зазору їх посадки, які придатні тільки для певних режимів різання і жорсткості самої деталі. Тому такі гасителі коливань не знайшли широкого застосування.

Іншим ефективнішим напрямом стабілізації динаміки різання, а отже і ТОС, є метод гасіння низькочастотних коливань в нормальному до осі обертання напрямі, як найбільш впливовішим на точність обробки деталі, за рахунок відбору енергії у цих коливань при накладенні на них високочастотних, поперечних до них коливань. Цей метод розробили вчені Ростова-на-Дону на чолі з професором Заковоротним В.Л.

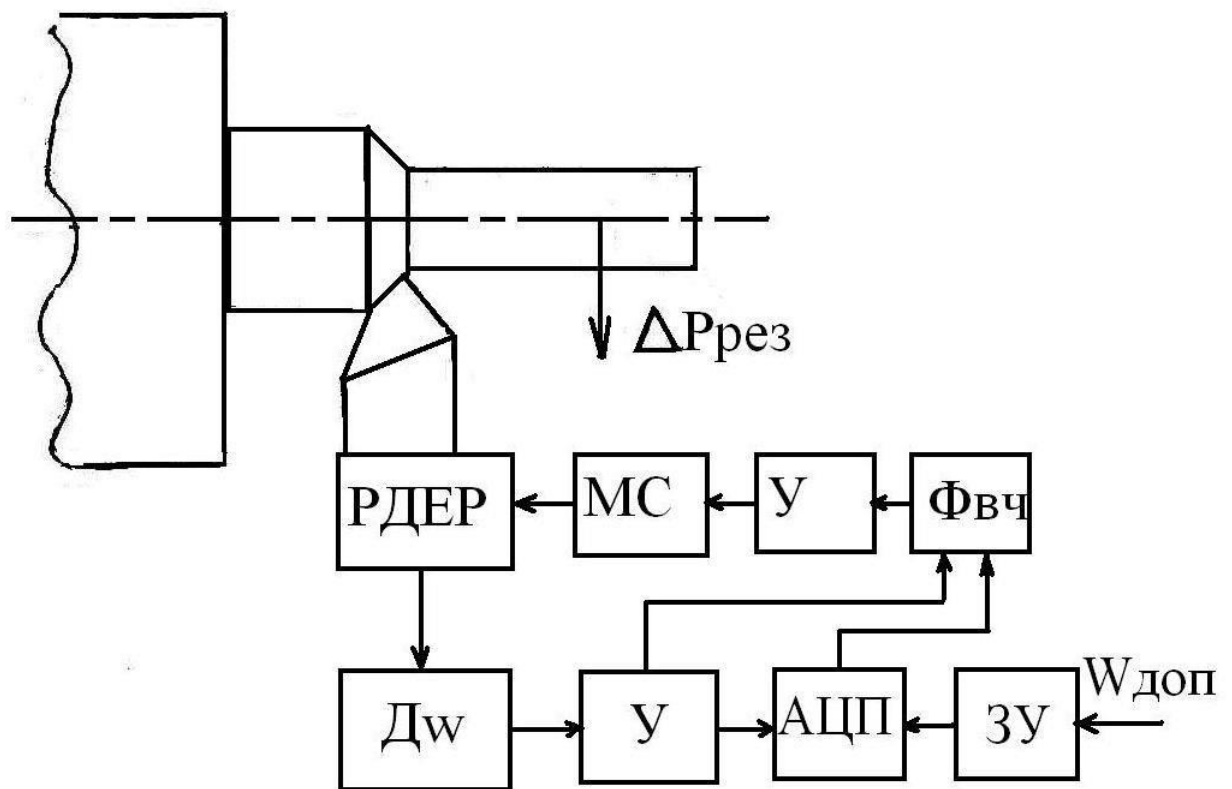


Рисунок 1.6. Система стабілізації точіння шляхом накладення подовжніх високочастотних коливань за принципом відбору енергії.

На рисунку 1.6. представлена блок-схема такої системи стабілізації, де вібродатчик Δw заміряє коливання різцетримача РДЕР в нормальному напрямі по всьому спектру частот процесу різання, тобто дія $\Delta P_{рез}$, як динамічною змінною. Після посилення сигналу U_1 він подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) де порівнюється із задаючим допустимим сигналом $W_{доп}$, задаючим пристроєм (ЗУ) що настраюється. При розузгодженні цих сигналів у бік збільшення АЦП включає в роботу фільтр $\Phi_{вч}$, який відбирає із загального частотного спектру $\Delta P_{рез}$ саму високочастотну вібрацію і через підсилювач U живить магнітостриктор (МС). Він передає ВЧ - коливання в подовжньому напрямі на РДЕР, руйнуючи тим самим поперечні коливання різця за рахунок відбору енергії у таких коливань, стабілізуючи тим самим процес механообробки.

Іншим варіантом управління якістю механообробки важко оброблюваних металів і сплавів з великою міцністю і твердістю є введення в процесі різання подовжніх високочастотних коливань ріжучого інструменту

для значного зменшення великої для даної обробки сили різання. Це значно зменшує похибку від пружних деформацій всієї системи ТОС і покращує чистоту обробленої поверхні. Така система у вигляді блок-схеми представлена на рисунку.1.7.[30].

Величину сили різання $\Delta P_{рез}$ заміряє силовий датчик D_p . Після посилення сигналу підсилювачем $У$ сигнал порівнюється в АЦП із заданою при допомозі ЗУ допустимою величиною $P_{доп}$. При перевищенні даної сили, АЦП включає в роботу другу паралельну систему управління по віброколиванням, що працює за вищеописаним принципом. Вона вибирає з $\Delta P_{рез}$ високочастотну частину спектру і включає в роботу магнітостриктор МС. За рахунок високочастотної вібрації на малу величину амплітуди (де $A \approx 0,02 \div 0,04 \text{ мм}$) в подовжньому напрямі ріжучого інструменту в області пружної деформації системи - деталь - інструмент, різко зменшується процес тертя, поліпшується стружка утворення і падає величина сили різання, підвищується точність.

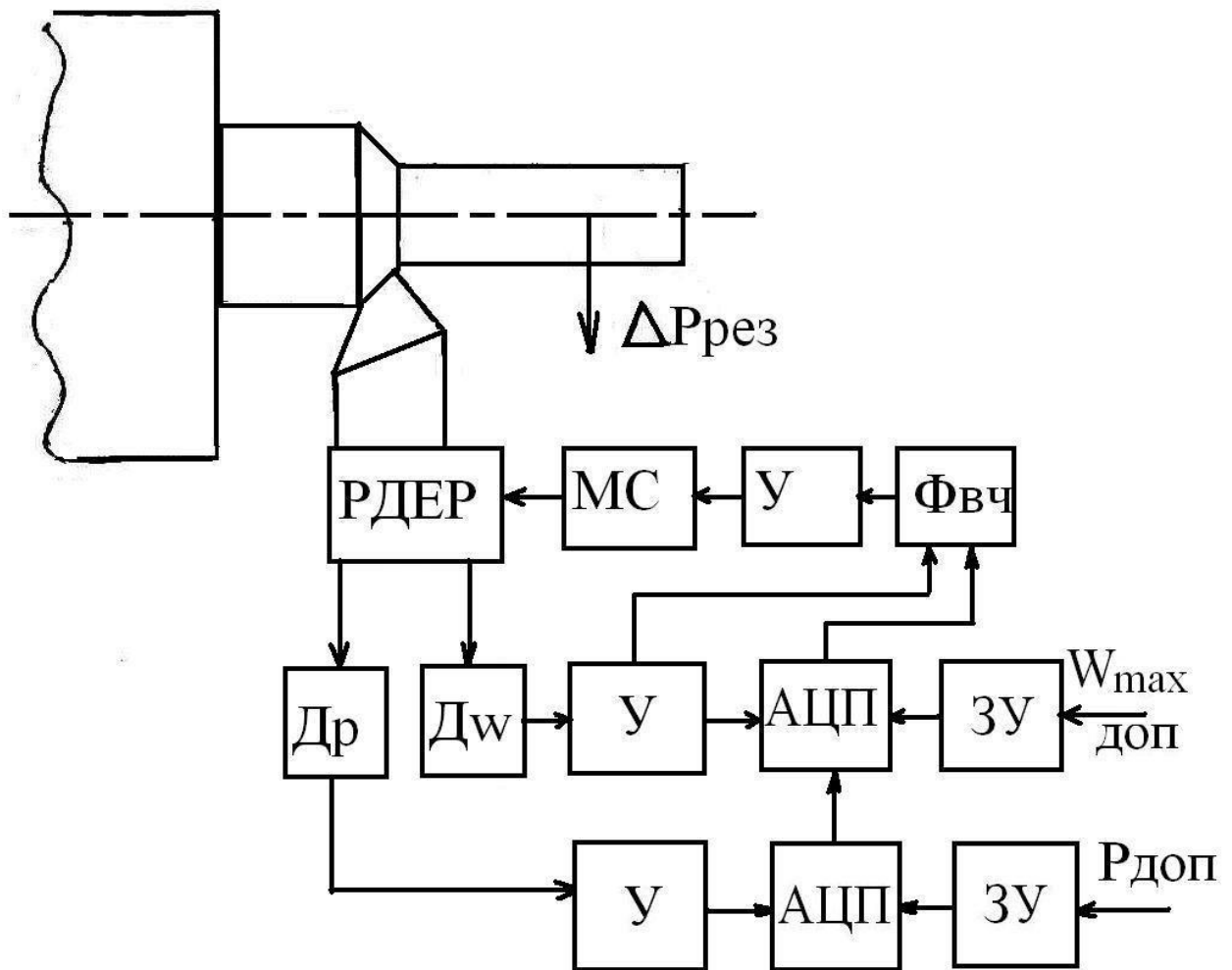


Рисунок 1.7. Управління якістю механообробки шляхом накладення на процес високочастотних коливань.

Одночасно така система, при значній величині коливань ріжучого інструменту і РДЕР, може зменшувати такі коливання за раніше описаним принципом відбору енергії в поперечних коливаннях системи, покращуючи також якість процесу обробки деталі.

Таким чином, виявлена нова можливість зменшення похибки форми деталі в поперечному перетині.

Для виконання вимоги збалансованості оброблюваної деталі в загальному випадку необхідно сумістити головну центральну вісь інерції заготовки з віссю обертання за допомогою спеціального пристрою, вбудованого в затискний патрон плаваючого типу. Іншими словами, в процесі врівноваження слід переміщати оброблювану деталь разом з кулачками відносно патрона і шпинделя, не порушуючи при цьому їх врівноваженості.

Це дуже складне завдання частково було вирішене Б. Ю. Котелевським за допомогою системи автоматичного врівноваження вузла шпинделя в процесі роботи токарного верстата.

Висновки по розділу.

1. В процесі механообробки існують неминучі похибки, які впливають на точність обробки і повинні бути усунені.
2. Наявність багатьох неминучих похибок не фіксується сучасними верстатами з ЧПУ, тому необхідно розробити систему управління якістю.
3. Для сучасних приладобудівних виробництв необхідна розробка автоматичних активних систем управління якістю з метою значного підвищення якості процесу.
4. Одним із факторів, значно впливаючих на точність механообробки, є динамічні процеси в ТОС під час обробки, де головним джерелом динаміки є процес різання.
5. Для підвищення якості обробки на верстаті з ЧПУ необхідно розробити стабілізуючу систему, що усуває динамічні похибки.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

2.1. Причини виникнення динамічних явищ в ТОС

У багатьох наукових роботах, зокрема [1-4], встановлено, що виникнення динамічних явищ в ТОС при механообробці є наслідком енергетичної нестійкості самого процесу різання і пружної податливості оброблювальної системи.

У роботі [5] детально досліджені причини нестійкості характеристик процесу механообробки при точінні. Встановлено, що першопричиною виникнення динамічних явищ у вигляді віброколивань в ТОС є нестабільність величини сили різання, її динамічна складова, яка квазіперіодично міняє сумарну величину сили різання $P_{p\Sigma}(\tau)$ у вигляді:

$$P_{p\Sigma}(\tau) = P_{cm} + \Delta P_{\partial}(\tau), \quad (1.7)$$

де P_{cm} - головна стабільна величина сили різання, τ - поточний час обробки, $\Delta P_{\partial}(\tau)$ - динамічна складова сили різання.

Виникнення динамічної змінної складової обумовлене зміною величин ряду параметрів процесу різання металів, а саме:

1. Коливанням товщини припуску Δt , що зрізається, в наслідок похибки форми заготовки і її зсуву при установці і закріпленні на верстаті.
2. Зміною міцності поверхні заготовки ΔHB в її різних місцях від попередніх операцій.
3. Фрикційними коливаннями сили тертя $\Delta f'_{mp}$ між заготовкою і поверхнями ріжучого інструменту.
4. Періодичним сколом при стружкоутворенні - T_p .

5. Впливом наростаючого зносу вершини інструменту і виникненням в наслідок цього додаткового наростаючого переривчастого тертя зносу $\Delta f_{mp}''$ по задній поверхні ріжучого інструменту.

Таким чином, виникає перший динамічний фронт у вигляді динаміки різання, як функція ряду факторів Φ :

$$\Delta P_o(\tau) = \varphi(\Delta t; \Delta HB; \Delta f_{mp}'; \Delta f_{mp}''; T_p) = \varphi(\Delta \Phi_{\Sigma}) \quad (1.8)$$

Динамічна складова сили різання через інструмент і деталь, що знаходяться між собою у вільному пружно-в'язкому зв'язку процесу різання, розгойдує робочі елементи нежорсткої упруго-дисипативної системи верстата, порушуючи в ній вторинний динамічний фронт у вигляді автоколивального процесу. Це формує динамічний, сумарний вектор сил пружних коливань, який функціонально визначається своїм колом чинників у вигляді:

$$F_{o\Sigma}(\tau) = \varphi(P_{P\Sigma}(\tau); M; C; H) \quad (1.9)$$

де M , C , H – маса, пружна жорсткість та демпфіруючи дисипативні властивості механічної системи верстата.

Автоколивальний процес ТОС викликає коливання інструменту щодо деталі. Ці періодичні взаємні зсуви в нормальному напрямі величиною Y [2] впливають на формоутворення геометрії оброблюваної поверхні деталі і викликають динамічні геометричні похибки обробки у вигляді змін величини радіусу вектора поверхні деталі.

Таким чином, під час механообробки в ТОС виникають два динамічні фронти: від динаміки процесу різання (як вимушені коливання) і автоколивального процесу пружної системи верстата. Кожний з них формується своїми обурюючими чинниками (1.8) та (1.9), що мають різні частотно-тимчасові характеристики і енергетичні рівні прояву. Всі ці чинники обурення динаміки при обробці, накладаючись один на одного, підсумовуються в зоні контакту ріжучого інструменту і деталі, утворюючи

широкий спектр коливальних процесів з своїми амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ) від самих низькочастотних, рівних числу оборотів шпинделя верстата в секунду, до високочастотних, таких, що досягають, 10-20 кГц і вище, де вже грають роль віброакустичні явища в елементах ТОС [4].

Як показали науково-дослідні роботи, що проводились на верстаті ТПК125 з ЧПУ на кафедрі виробництва приладів НТУУ “КПІ”, на формування геометрії оброблюваної поверхні деталі, що визначає її якість, різні по величині і частоті коливання елементів ТОС впливають по різному [7-9].

Так низькочастотні квазіперіодичні коливання головних елементів ТОС – супорта з ріжучим інструментом і вузла шпинделя з деталлю - в нормальному напрямі по осі $Y-Y$ до оброблюваної поверхні деталі унаслідок зміни припуску Δt і міцності деталі ΔHB , та автоколивань цих робочих органів верстата, мають найбільшу амплітуду і енергію і приводять до взаємного зсуву інструменту і деталі і утворення геометричних погрешностей обробки $\Delta r(\tau)$, що визначають її точність.

В той же час високочастотні коливання ТОС від зміни $\Delta P_d(\tau)$ унаслідок періодичності стружкоутворення T_p і фрикційних явищ $\Delta f'_{mp}$ і $\Delta f''_{mp}$ релаксаційного характеру (1.8), а також високочастотних автоколивань дрібних елементів верстата, що формують в сукупності весь високочастотний спектр віброколивань і віброакустичних явищ в системі, утворюють на оброблюваній поверхні деталі всю мікро геометрію, тобто шорсткість ΔRa .

В зв'язку з цим розробка ефективних універсальних методів стабілізації динаміки ТОС при обробці, дозволить певною мірою зменшити вплив всіх вищеописаних динамічних процесів і тим самим підвищити якість механічної обробки деталей.

2.2. Аналіз динаміки процесу механічної обробки

В працях [10; 13] було встановлено, що головною причиною виникнення змінної складової сили різання $\Delta P(\tau)$ становить змінна величина зрізаного припуску Δt , із-за погрішностей форми заготовки та її неточної установки на верстаті. На Рисунку.2.1. представлена модель ПМО, з її допомогою і розглянемо вплив динамічних явищ на процес різання. Збуджуюча змінна сила різання $(P + \Delta P(\tau))$ представлена на схемі складовою сили P_Y , від загальної сумарної сили. Змінна складова ΔP представлена як функція $\Delta P(\tau) = \varphi(\Delta t)$. Під час точіння з подачею S по осі X сила різання пружно деформує підсистему ПСІ масою “ m ” у напрямі Y пропорційно жорсткості цього вузла “ c ” і величині тертя в стиках підсистеми h , як демпфіруючого чинника.

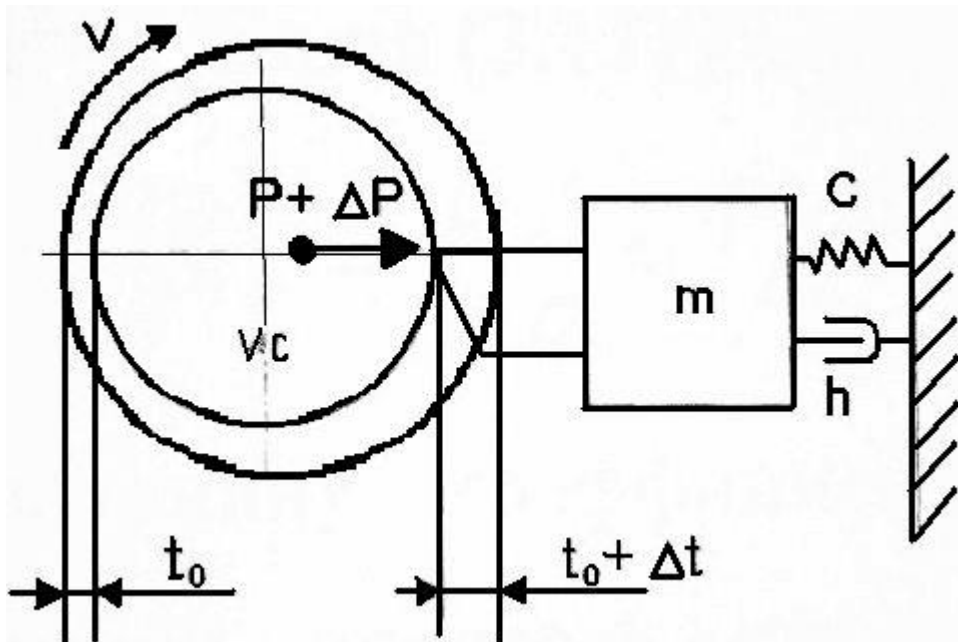


Рисунок 2.1. - Схема підсистеми супорт - інструмент для аналізу динаміки різання при точінні.

Величина постійної складової сили різання P_Y по осі Y визначається по формулі

$$P_Y = C_{PY} t^\alpha S^\beta V^{-\gamma} (HB)^\lambda \quad (2.1)$$

де **(HB)** – складова враховуюча твердість та міцність оброблюваного матеріалу; λ - показник ступеня;

Ця постійна складова сили різання, як статична сила, буде пружно демпфірувати дану підсистему ПСІ на величину статичного прогину y_0 . Оскільки розглядається тільки залежність $P_0 = \varphi(\Delta t)$, то силу різання можна представити у вигляді

$$P = K_P t \quad (2.2)$$

де K_P – коефіцієнт лінеаризованої залежності $P=f(t)$, як передавальна функція між цими параметрами, яка дорівнює:

$$K_P = \frac{dP}{dt} = C_{PY} t^{\alpha-1} S^\beta V^{-\gamma} (HB)^\lambda \quad (2.3)$$

Багато дослідників, спрощуючи цю залежність, просто знаходили значення K_P з виразу (2.2) як:

$$K_P = \frac{P}{a} \approx \frac{P}{t} \quad (2.4)$$

що є коефіцієнтом жорсткості різання або статичною характеристикою процесу різання, оскільки мають схожу розмірність – Н/мм.

В процесі обробки, при обертанні деталі із швидкістю V (Рисунок 2.1.), величина припуску Δt періодично змінюється. Це викликає появу змінної складової сили різання ΔP , збуджуючи динамічні режими в пружній ПСІ. Величину ΔP можна визначити аналітично на підставі виразу (2.2) як:

$$\Delta P = \frac{dP}{dt} \Delta t = K_P(\Delta t) \quad (2.5)$$

Приймемо умову, що обертання деталі відбувається з постійною швидкістю ($V=const$). Тоді, замінивши швидкість обертання V на кутову

частоту обертання ω рад/с і ввівши середнє значення сили різання, можна сказати, що ΔP матиме гармонійний закон зміни.

$$\Delta P = K_p(\Delta t) \sin \omega \tau \quad (2.6)$$

де $\omega \tau$ – тимчасова фаза.

При цьому величина ΔP коливатиметься відносно умовно прийнятої середньої сили різання P_{CP} . Тоді змінна сила різання P_Y по осі Y :

$$P_Y = P_{CP} + \Delta P \sin \omega \tau \quad (2.7)$$

де τ - час в секундах; $\omega \tau$ - фаза вектора обертання у будь-який момент.

На практиці вимушені гармонійні коливання сили різання змінюються іншими, менш енергетично вагомими, збуджуючими причинами: хвилястістю поверхні оброблюваної заготовки, її різної мікро міцністю в різних зонах, періодичністю процесу стружкоутворення та її скола, переривчастим характером тертя в зоні контакту деталі і інструменту і т.п. Тому, в загальному вигляді, змінну силу різання можна представити у вигляді залежності за часом τ :

$$P_Y(\tau) = P_{CP} + \Delta P(\tau) \sin \omega \tau + \sum_i^n C_{Pi} \cos(\omega \tau + \varphi_i) \quad (2.8)$$

де C_{Pi} – силові коефіцієнти складових змінних сил різання від дії менших по енергетиці причин, кількість яких n ; φ_i - фазові зрушення кожної такої малої збуджуючої сили щодо її основної гармоніки.

Періодична збуджуюча сила $P_Y(\tau)$ викличе вимушені коливання пружної підсистеми ПСІ, які описуються рівнянням руху пружної системи з класичної механіки у вигляді:

$$m \frac{d^2 y}{d\tau^2} + h \frac{dy}{d\tau} + y = P_Y(\tau) \quad (2.9)$$

Це є математичною моделлю вимушених коливань пружної замкнутої підсистеми з однією мірою свободи від періодичної збудливої сили процесу різання залежно від динамічних властивостей даної пружної системи.

Оскільки переважний вплив на виникнення вимушених коливань надає змінна товщини зрізу стружки, то підставивши у вираз (2.9) значення коефіцієнта жорсткості різання (2.4), одержимо залежність коливань в пружній ПСІ від зміни глибини зрізу за часом:

$$m \frac{d^2 y}{d\tau^2} + h \frac{dy}{d\tau} + y = K_p t(\tau) \quad (2.10)$$

Отже, величина припуску, що зрізається, мінятиметься під дією автоколивального процесу пружної системи верстата у напрямі Y , із-за динаміки різання Рисунок 2.2., що і обумовлює змінну складову сили різання ΔP_y .

Виведемо динамічну жорсткість пружної системи верстата, аналогічно [6] автора Петракова Ю.В. Позначимо через Y величину пружної динамічної деформації УСС за рахунок автоколивань системи, і представимо динамічну передавальну функцію між величиною змінної сили $P_y(\tau)$ і величиною пружних деформацій Y в операторній формі в зображенні по Лапласу у вигляді:

$$W_{УСС}(D) = \frac{P_y(\tau)}{Y(\tau)} = \frac{1/c}{mD^2/c + hD/c + 1} \quad (2.11)$$

І так ми одержали математичну модель динамічної жорсткості верстата. З її допомогою можна сформулювати структурну і функціональну динамічні моделі – схеми процесу механічної обробки з урахуванням динаміки верстата Рисунок 2.2. і Рисунок 2.3. На них, величина t_d – є дійсною глибиною різання у будь-який момент часу, $t_d = t_0 \pm Y$ де t_0 - встановлена при настройці верстата глибина різання.

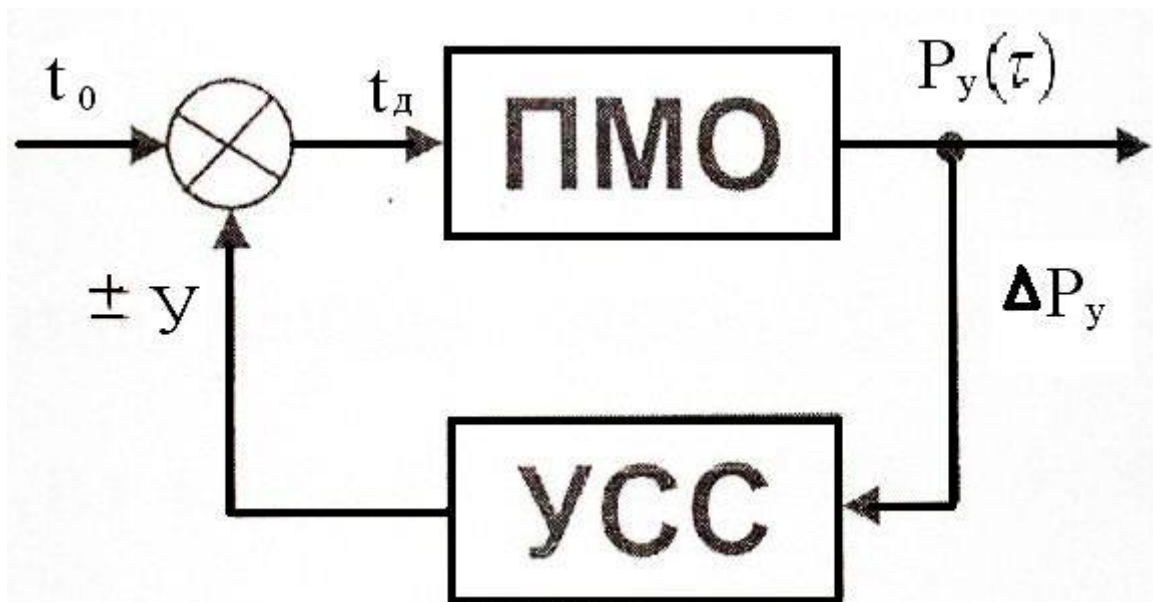


Рисунок 2.2. - Структурна схема ПМО з урахуванням впливу динаміки верстата.

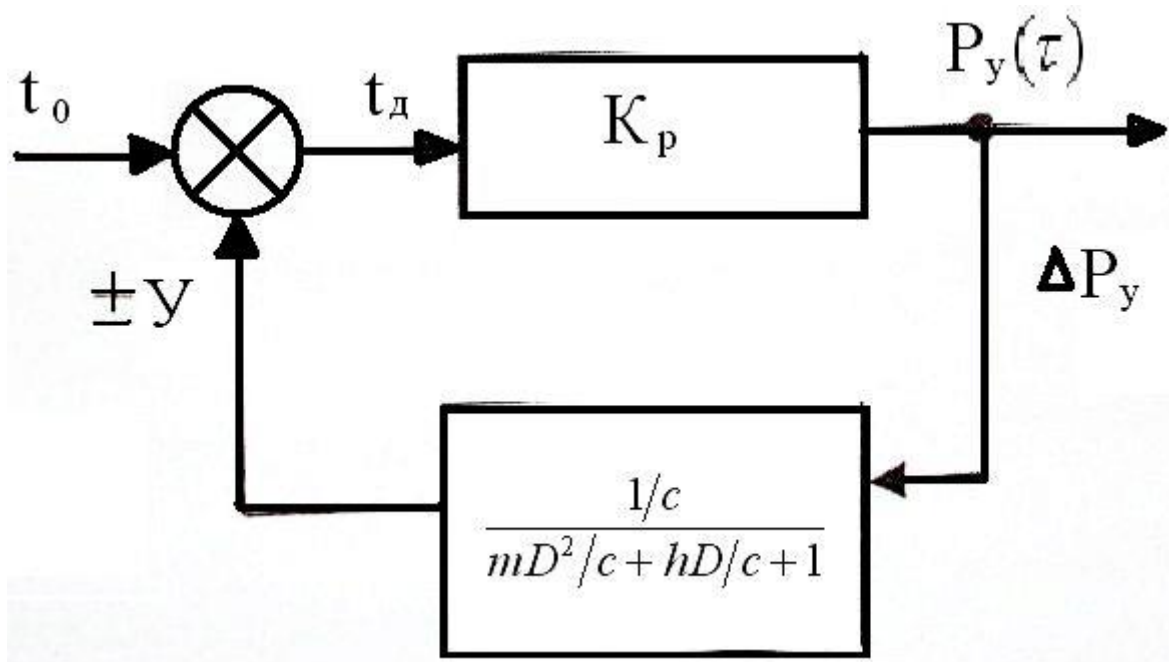


Рисунок. 2.3. - Функціонально динамічна модель ПМО з урахуванням впливу динаміки верстата.

2.3. Аналіз впливу динаміки ТОС на точність деталі

Крім описаних вище внутрішніх причин, тих що впливають на динаміку ТОС, свою дію надають і зовнішні чинники, такі як:

- зовнішні імпульсні дії сусіднього устаткування;
- вібрація головного електродвигуна верстата;
- кінематична не плавність ходу зубчатих передач верстата;
- фрикційні похибки лінійного переміщення головних робочих органів верстата та ін.

У сукупності з раніше розглянутими причинами, вони є джерелами автоколивального процесу що має пряму залежність з динамічними і кінематичними параметрами ПМО

Оскільки ТОС є легко збудливою системою, то будь-яка силова кінетична дія викличе динамічні коливання, які приведуть до зсуву інструменту і як наслідок геометричної похибки оброблюваної поверхні, що можна назвати динамічною погрішністю. А сполучною ланкою в ТОС є неврівноважений процес різання у вигляді динамічного оператора $\mathbf{W}_P(\mathbf{D})$, як передавальної функції, і змінної за часом сили різання, як кінетичного вектора $\vec{P}(\tau)$.

Математично динамічна модель процесу різання Рисунок 2.4. описується через рух вершини ріжучого інструменту щодо деталі, як зв'язок між основними вузлами верстата, шпинделем і супортом:

$$\begin{cases} \vec{Y}(\tau) - [W_{ycc}(D)] \cdot \vec{P}_y(\tau) = [W_{ycc}(D)] \cdot \vec{U}(\tau) + \vec{G}(\tau) \\ \vec{P}_y(\tau) = \vec{F}_\Sigma(\tau) - [W_P(D)] \cdot \vec{Y}(\tau) \\ \vec{r}(\tau) = [W_\phi(D)] \cdot \vec{Y}(\tau) \end{cases} \quad (2.12)$$

де: $\vec{Y}(\tau)$ - вектор коливальних зсувів інструменту щодо деталі у напрямі нормалі;

$\vec{U}(\tau)$ - вектор силових дій, що управляють;

$\vec{G}(\tau)$ - вектор не силових внутрішніх і зовнішніх обурень;

$\vec{r}(\tau)$ - поточний змінний радіус-вектор функції профілю поверхні обробки на деталі;

$\vec{P}_y(\tau)$ - головний вектор сили різання;

$\vec{F}_\Sigma(\tau)$ - вектор загального шуму сили різання в оброблювальній системі у вигляді сумарного вектора всіх сил, що діють в ТОС під час механообробки, як векторна сума сил різання, а також викликаних нею інерційних сил коливальних мас елементів ТОС, сил їх пружності і тертя, та інших менш значущих сил, як зусиль в кінематичних ланцюгах передачі руху і т.п.;

$[W_{ycc}(D)]$ - динамічний оператор пружної системи верстата, що описує динамічні характеристики основних робочих вузлів, – шпинделя і супорта та їх коливання;

$[W_p(D)]$ - динамічний оператор характеристики процесу різання як динамічного зв'язку;

$[W_\phi(D)]$ - динамічний оператор процесу формування поверхні деталі при точінні;

$(D) = d/d\tau$ - диференціальний оператор за часом.

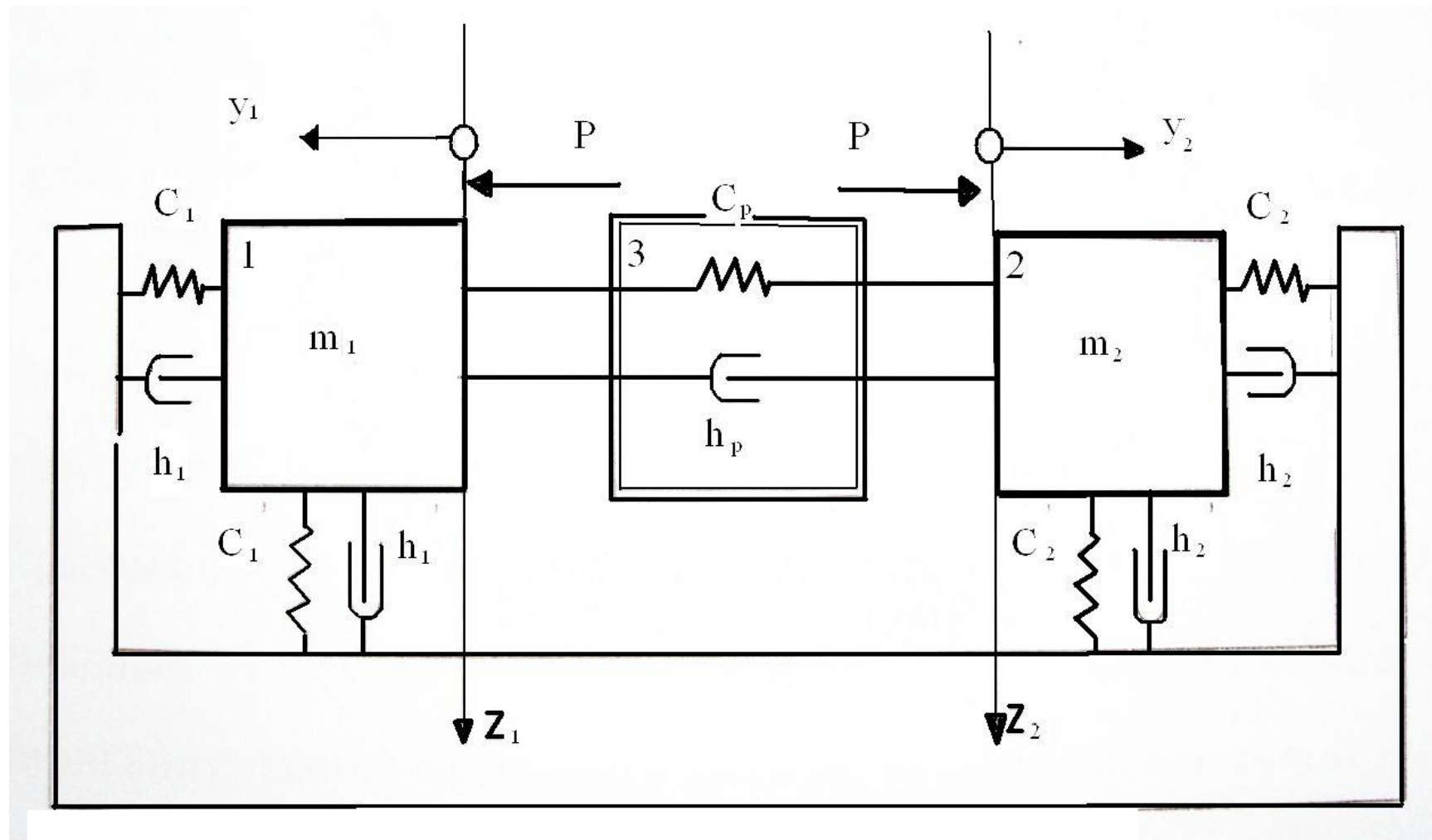


Рисунок 2.4 - структурна модель пружної технологічної оброблювальної системи (вузол 1-шпіндель з деталлю; m_1 - його маса; його коефіцієнти жорсткості - C_1 і демпфірування - h_1 ; 2 - супортний вузол з інструментом m_2 - його маса; його коефіцієнти жорсткості - C_2 і демпфірування - h_2 ; 3 - процес різання; C_p - його пружні, h_p - його демпфіруючі властивості; P - змінна сила різання).

Складовими вектора $\vec{G}(\tau)$ є такі параметри ПМО, як розмірний знос інструменту, температура різання і навколишнього середовища, коефіцієнт тертя інструменту об деталь та ін.

Складовими вектора $\vec{U}(\tau)$ - є режими різання, рухи інструменту по поверхні деталі, схеми кріплення і обробки деталі, геометрія ріжучого інструменту, системи автоматичної піднастройки і т.п.

З системи рівнянь (2.12) найбільш значущим, з погляду вихідної точності обробки, є динамічний оператор формоутворення і результуюча цього процесу – радіус-вектор функції профілю $\vec{r}(\tau)$. На підставі вищевикладеного, сформуємо модель формоутворення динамічної якості механообробки у вигляді функціонально-структурної схеми Рисунок 2.5.

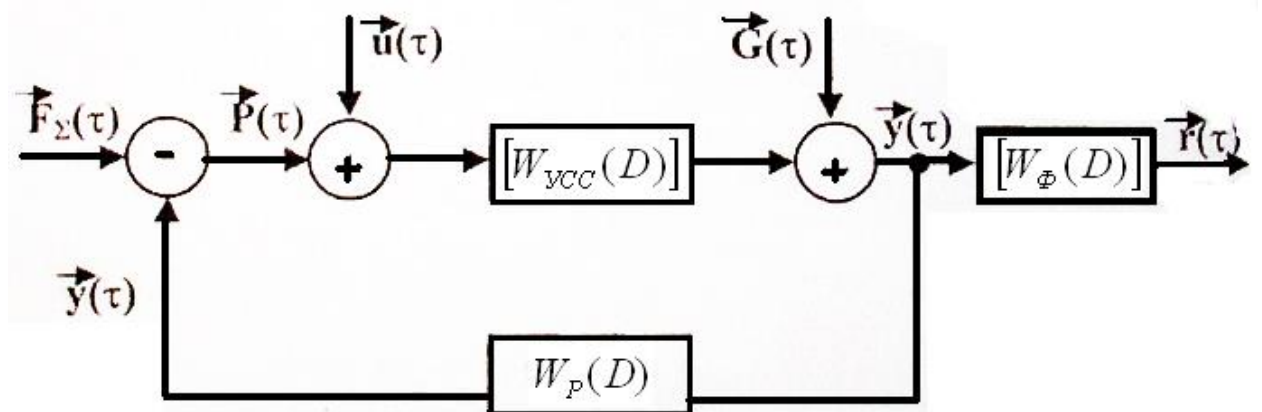


Рисунок 2.5 - Функціонально - структурна схема формування динамічної якості процесу механообробки.

Математичний опис динамічної моделі процесу точіння з погляду геометричної якості обробки (2.12) і функціонально-структурна схема формування динамічної якості механообробки (Рисунок 2.5) складаються з ряду динамічних операторів, що є певними передавальними функціями, а саме:

- Динамічний оператор пружної системи верстата $[W_{ycc}(D)]$ одержаний раніше (2.10) (2.11) з урахуванням динамічних характеристик верстата і описаний у вигляді передавальної функції:

$$W_{ycc}(D) = \frac{dP(\tau)}{dY(\tau)} = \frac{1/C}{\frac{m}{C}D^2 + \frac{h}{C}D + 1}$$

- Динамічний оператор, що характеризує динаміку процесу різання, як передавальна функція зміни сили різання від змінних параметрів процесу:

$$W_p(D) = \frac{dP(\tau)}{d[t; T_p; h_p](\tau)} = \frac{K_p}{T_p D + 1} + h_p D \quad (2.13)$$

де t ; T_p ; h_p – змінні величини за часом глибини різання, часу стружкоутворення і розмірного зносу інструменту відповідно. Залежно від співвідношення величини часу стружкоутворення T_p і розмірного зносу h_p ріжучого інструменту, що поступово зростає, змінюється дія інерційної та дисипативної складових. У свою чергу при збільшенні h_p розмірного зносу ріжучого інструменту відбувається поступовий зсув основного спектру коливань сили різання у бік низьких частот.

Висновки по розділу

1. Під час обробки деталі на метало ріжучих верстатах, зокрема токарному верстаті, при певних режимах виникають резонансні коливання. Їх основним джерелом є динамічний процес різання. Амплітудно-частотні характеристики, якого залежать від зносу ріжучого інструменту. Що в сукупності веде до втрати динамічної стійкості ПМО.
2. Пружно-дисипативну систему верстата при механообробці слід розглядати як фазово-частотний динамічний перетворювач, що активно впливає на динаміку процесу різання і якість обробки, що багато в чому визначає динамічну стійкість ПМО.
3. Форма рельєфу на оброблювальній поверхні, є частотно залежною від динаміки процесу різання і автоколивального процесу верстата. На геометрію профілю вплив роблять низькочастотні взаємні коливання деталі і інструменту ТОС, а мікро нерівності поверхні визначаються динамікою високих часто коливань процесу різання у вигляді стружкоутворення і тертя в зоні контакту деталі і задньої поверхні інструменту. Якщо цілеспрямовано міняти режими обробки - швидкість різання і подачу інструменту, то можна добитися підвищення геометричної точності деталі.
4. Підвищити якість механічної обробки і стійкість динамічної ТОС можна за допомогою систем проти резонансного захисту і моніторингу динамічного стану ТОС в процесі роботи із зміною, в необхідних випадках, частотних характеристик процесу різання шляхом зміни режимів обробки.

3. ПОБУДОВА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДИНАМІКИ ВЕРСТАТА В ПРОЦЕСІ РІЗАННЯ

3.1. Розробка методики контролю

Для досягнення заданої якості виготовлення необхідно контролювати і управляти динамічним станом всієї оброблювальної системи. Провівши аналіз технічної літератури і використовуючи описані вище дослідження, розробимо методику контролю динамічного стану всієї оброблювальної системи під час механічної обробки.

Динамічно нестійкий процес різання і порушуваний їм в пружній системі верстата автоколивальний процес знаходяться між собою в кореляційному зв'язку і впливають один на одного викликаючи певні дії. Наприклад, певні поєднання силових і частотних характеристик процесу різання і автоколивань верстата, можуть викликати сплеск динамічних режимів у вигляді збільшення потужності коливань, що призводить до перед резонансних і резонансних явищ. Як результат втрачається динамічна стійкість ПМО. Це пояснюється тим, що енергетичний рівень і величина амплітуди коливань автоколивального процесу УСС багато в чому визначається енергетичним рівнем динаміки ПМО і його амплітудно-частотно-фазовими характеристиками. Між амплітудно фазовими частотними характеристики (АФЧХ) ПМО і автоколивальним процесом УСС існують певні залежності. Зміна АФЧХ процесу різання може збільшувати або зменшувати динаміку оброблювальної системи. Таким чином, ми можемо добитися протидії і придушення значного рівня коливань оброблювальної системи за допомогою примусової зміни основних режимів різання, що впливають на частотний спектр ПМО – швидкість різання і подачу інструменту, тим самим змінюючи фазове зрушення між головним вектором сили різання і вектором сил від пружно-інерційних коливань

верстата. В результаті, покращуючи динамічну стійкість процесу механообробки і його якість.

У дослідженнях залежності динаміки ТОС від зміни швидкості різання і подачі, при механообробці було відмічено, що із збільшенням швидкості обробки зростає частота циклічності стружкоутворення. Зменшується постійна часу стружка утворення T_p (3.2), росте число зрушень сегментів стружки N на одиницю довжини оброблюваної поверхні (Рисунок 3.1 і 3.2). Росте частота зміни товщини припуску Δt із-за збільшення частоти коливань шпинделя верстата з деталлю і т.п. Всі ці чинники є збудниками динамічних режимів процесу різання і в сумі формують АЧХ ПМО.

В процесі дослідження гістерезисної природи сили різання встановлено, що саме така поведінка змінної складової сили різання $\Delta P(\tau)$ є основним джерелом живлячої енергії автоколивань ТОС. Також відомо, що при зміні періодичності $\Delta P(\tau)$ міняється фазове зрушення між головним вектором змінної сили різання і вектором пружно-інерційних коливань автоколивального процесу ТОС. Таким чином можна добитися їх протидії, а значить придушення значного рівня коливань оброблювальної системи, що підвищить динамічну стійкість ПМО і його якість.

Дослідження впливу величини зносу ріжучого інструменту на динаміку ПМО показали, що цей чинник з одного боку демпфірує високочастотні складові спектру коливань ПМО, зміщуючи частоту в низькочастотні зони, а з іншої – збільшуючи силу різання, її змінну складову $\Delta P(\tau)$, збільшує кінетичну енергію коливального процесу різання і всього коливального режиму оброблювальної системи. Це веде до втрати динамічної стійкості механообробки та якості.

Дослідження впливу величини подачі інструменту S_0 на динаміку процесу різання показали, що із збільшенням подачі з малих значень до деяких небезпечних меж відбувається певне демпфірування високочастотних динамічних чинників різання і стійкість ПМО зростає. Якщо порівняти впливаючу на динаміку процесу різання дію, збільшення подачі S_0 і

збільшення швидкості V обробки, можна відзначити їх взаємозв'язок в протилежній дії. На підставі такого взаємозв'язку був досліджений, уточнений і рекомендований до застосування ефективний показник вибору раціональних режимів обробки – (SV) , що дозволяє до певної міри управляти і забезпечувати задану якість обробки. При цьому головним параметром що впливає на якість обробки, як і раніше залишається подача інструменту S_0 . Це пояснюється тим, що саме подача S_0 задає необхідну чистоту обробленої поверхні і розділяє механообробку на чорнову, на пів чистову і чистову. У зв'язку з цим прийнято вважати, при виборі режимів обробки, параметр подачі S_0 – первинним, а швидкість різання V – вторинним. І так використовуючи параметр (SV) можна порівняно просто визначити можливу швидкість різання з формул:

$$V \leq \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{S_0} \left| \frac{м}{с} \right| ; S_0 \leq \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{V} \left| \frac{мм}{об} \right| \quad (4.1)$$

при заданій подачі, одержимо:

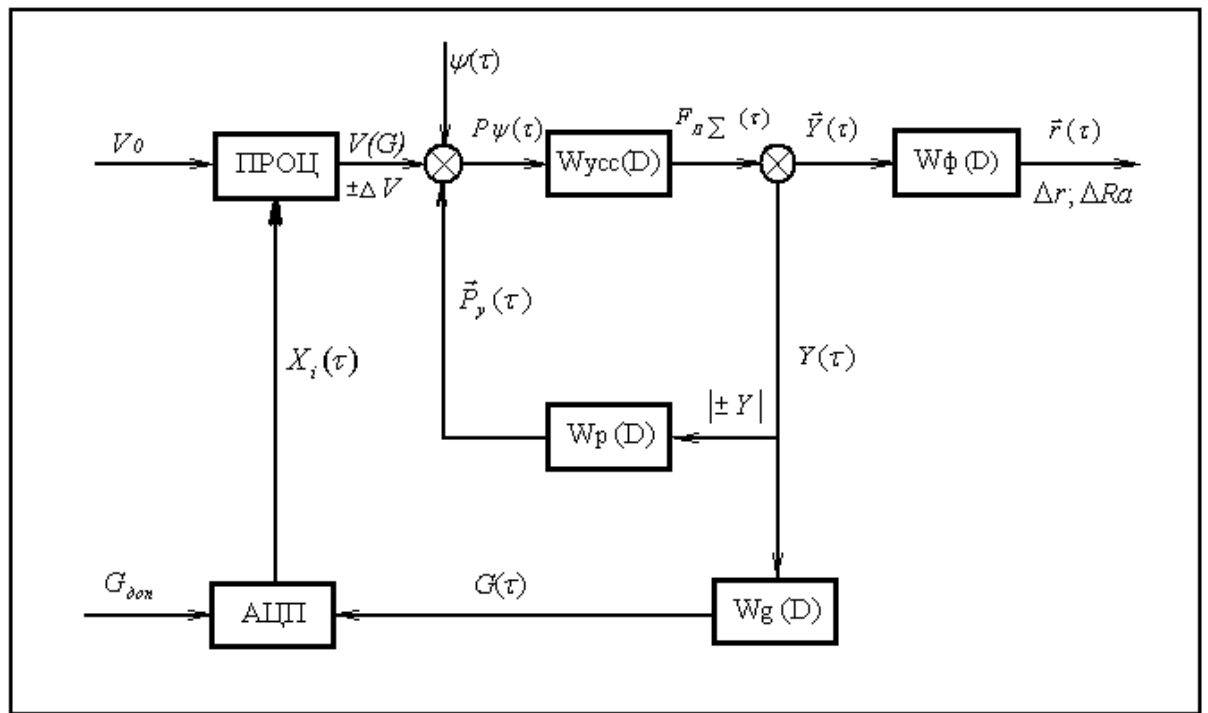
$$V \leq (0,3 \cdot 10^{-3}) / S_0 \text{ м/с} \quad (4.2)$$

Щоб врахувати можливість прояву випадкових погрешностей і відхилень характеристик процесу ПМО, варіацію його певних параметрів, рекомендується зменшити показник (SV) при виборі швидкості на $5 \div 10\%$, з тим щоб мати надійні якісні показники обробки, вважаючи що $0,3 \cdot 10^{-3}$ – це допустимий граничний рівень (SV) .

На підставі отриманих результатів сформулюємо методику, як одну з можливостей управління якістю ПМО при точінні. За допомогою підбору необхідної швидкості різання ми можемо подавити деякі динамічні режими в оброблювальній системі. Спрощений алгоритм такого управління ПМО можна схематично представити послідовністю керованих параметрів (Додаток Г).

У векторній формі ця схема запишеться наступним виразом:

$$|\vec{V} \pm \Delta \vec{V}| \rightarrow |\vec{P}_y(\tau)| \rightarrow |\sim \psi_P(\tau)| \rightarrow |\vec{F}_{д\tau}(\tau)| \rightarrow |\vec{Y}(\tau)| \rightarrow |\Delta \vec{r}(\tau)|$$



З цього виходить, що цілеспрямовано управляючи швидкістю різання $|\pm \Delta \vec{V}|$ можна міняти фазове зрушення у векторі змінної сили різання, до тих пір, поки не зміниться знак обходу гістерезисної петлі силою різання, що призведе до протидії векторів сили різання і пружно-інерційних сил $|\vec{F}_{д\tau}(\tau)|$ коливального процесу пружної системи верстата, дисипативному зростанню відбору кінетичної енергії від всіх коливальних елементів, та ін. В цьому випадку величина пружних зсувів $|\vec{Y}(\tau)|$ по нормалі інструменту і деталі зменшиться, а отже знизиться величина динамічної похибки $|\Delta \vec{r}(\tau)|$ механообробки в процесі точіння деталі.

Але для управління описаними параметрами необхідна інформація про процеси, що відбуваються, при механічній обробці. Одним з основних методів отримання даної інформації є віброакустична система вимірювання. Вона заснована на використанні найбільш інформативної низькочастотної частини спектру акустичних хвиль від 0,1 Гц до 100 кГц. Розташувавши електроакустичний п'єзоперетворювач на нерухомій частині супорта верстата, за допомогою детекторної системи і налаштованих на параметри системи АЦП можна одержувати достовірну інформацію про динамічний

стан процесу механообробки, його надійність і якість, а по рівню динаміки автоколивань – судити про стійкість всієї оброблювальної системи. Але при цьому немає точної інформації про амплітудні характеристики вібраційних процесів ні ПМО, ні ТОС. Це пояснюється їх різною фізичною природою, законами збудження і розповсюдження. І лише по енергетичному рівню зміни даних процесів можливо знайти їх адекватність. Таким чином можлива ідентифікація по однаковій закономірності зміни їх рівнів кінетичній енергії [21]. Якщо кінетичну енергію механічних коливань від дії динамічних складових процесу різання і автоколивань ТОС позначити через E_F , а таку ж енергію віброакустичної емісії через E_G , то можна одержати лінеаризовану залежність між ними за часом :

$$E_{Gi}(\tau) = A_{GF} E_{Fi}(\tau) \quad (4.3)$$

де A_{GF} - масштабний коефіцієнт співвідношення таких енергій описуваних процесів. При цьому $A_{GF} \ll 1$ (тобто набагато відрізняється рівень).

Віброакустична система вловлює сигнал у вигляді комплексного єдиного спектру від всіх динамічних джерел. Позначимо загальну сумарну динамічну систему сил в оброблювальній системі як $F_{\Sigma}(\tau)$, то вібрація елементів оброблювальної системи, що викликається нею, генеруватиме акустичну емісію у вигляді загального суматора ВАС, як $G_{\Sigma}(\tau)$, що дозволяє на підставі (4.3) одержати функціональну залежність між ними:

$$G_{\Sigma}(\tau) = \varphi(F_{\Sigma}(\tau)) \quad (4.4)$$

При зміні динамічної стійкості оброблювальної системи, викликаних дією розглянутих раніше чинників, відбудеться і адекватна зміна віброакустичної емісії у ВАС, що математично можна представити у вигляді моделі:

$$|G_{\Sigma}(\tau) + \Delta G_i(\tau)| = \varphi|F_{\Sigma}(\tau) + \Delta F_{\Sigma}(\tau)| \quad (4.5)$$

Таку залежність між динамікою ТОС і величиною акустичного сигналу можна ідентифікувати по енергетичній залежності (4.3), що дозволяє знайти передавальну функцію між ними у вигляді:

$$\frac{\partial G_{\Sigma}(\tau)}{\partial F_{\Sigma}(\tau)} = \frac{\partial E_G(\tau)}{\partial E_F(\tau)} = A_{FG} \quad (4.6)$$

де A_{FG} - масштабний коефіцієнт співвідношення енергій вібрації ТОС і вібросигналу що генерується цим.

Отже, на підставі лінійної залежності (4.5), будь-яка зміна динаміки ТОС як $\Delta F_{Di}(\tau)$, в процесі роботи викличе адекватну зміну акустичної емісії і ВАС на величину $\Delta G_i(\tau)$, його приріст можна визначити через передавальну функцію:

$$\Delta G_i(\tau) = \frac{\partial G_{\Sigma}(\tau)}{\partial F_{\Sigma}(\tau)} \Delta F_{Di}(\tau) \quad (4.7)$$

При попередньому знаходженні числового значення масштабного коефіцієнта співвідношення енергій A_{FG} можна точно визначити:

$$\Delta G_i(\tau) = A_{FG} \Delta F_{Di}(\tau) \quad (4.8)$$

Використовуючи (4.8) стає можливим визначити кількісне співвідношення між динамікою ПМО і динамічним станом ТОС при механообробці, і відповідному цьому стану величині ВАС контролюючої системи. Звичайно ж наявність стороннього шуму та інших випадкових перешкод в передавальному ланцюзі внесе певну похибку, в окремих випадках, але загалом в інтегральному значенні така ідентифікація цілком коректна.

3.2. Розробка схеми контролю та управління динамікою ТОС та якості ПМО

Грунтуючись на одержаній, в попередньому розділі, моделі методу управління динамікою ТОС і якістю ПМО (Рисунок 4.1) можна визначити принцип побудови системи контролю і управління динамічною стійкістю оброблювальної системи. Такий контроль можна реалізувати шляхом моніторингу динаміки автоколивальних в системі токарного верстата. Для реалізації поставленого завдання необхідно розробити автоматичну систему контролю величини коливань амплітуди автоколивального процесу ТОС при обробці, грунтуючись на моніторингу її динаміки на основі залежностей (4.4) і (4.7).

На початку розробки системи контролю і управління ПМО необхідно упорядкувати всі параметри, що беруть участь в процесі механообробки. З'ясувати які з них є головними і допоміжними, керованими та керуючими. Також виділимо основний вихідний параметр якості ПМО яким є одержувана в процесі обробки динамічна похибка $\Delta \vec{r}(\tau)$, що формується взаємними коливальними переміщеннями деталі і інструменту. Отже, це і буде головний керований параметр – $\Delta \vec{r}(\tau)$. Згідно одержаній схемі управління динамікою ПМО (Рисунок 4.1) $\Delta \vec{r}(\tau)$ визначається величиною зсуву інструменту щодо деталі $\vec{Y}(\tau)$, в наслідку протікання динамічних режимів в ТОС. При цьому основним негативним чинником є пружно-інерційні коливання автоколивального процесу ТОС – $\vec{F}_{\Delta\Sigma}(\tau)$. І отже такі параметри як $\vec{Y}(\tau)$ і $\vec{F}_{\Delta\Sigma}(\tau)$ є допоміжними керованими параметрами системи контролю і регулювання, зміна яких безпосередньо впливає на якість $\Delta \vec{r}(\tau)$.

Змінна сила різання $\vec{P}_y(\tau)$ через її фазове зрушення $\psi_p(\tau)$ робить прямий вплив на величину динамічних коливань ТОС $\vec{F}_{\Delta\Sigma}(\tau)$ (тобто потужності її автоколивального процесу) відносно головного вектора

$\vec{F}_{\text{дс}}(\tau)$. Таким чином $\psi_p(\tau)$ - фазове зрушення є головним керуючим параметром в розроблюваній системі контролю і управління ПМО (СКР ПМО). Отже необхідна величина фазового зрушення $\psi_p(\tau)$ обирається шляхом цілеспрямованого зсуву частотного спектру змінної складової сили різання $\Delta\vec{P}_y(\tau)$ до тих пір, поки величина $\vec{V}(\tau)$ не зменшиться, що свідчить про появу проти фази між головними векторами $\vec{P}_y(\tau)$ і $\vec{F}_{\text{дс}}(\tau)$ і їх взаємного погашення. Управління ж частотним спектром $\Delta\vec{P}_y(\tau)$ проводиться направленою зміною швидкості різання $(\mathbf{V}\pm\Delta\mathbf{V})$ в ту або іншу сторону. Отже, параметри $\mathbf{V}$ і $\mathbf{P}(\tau)$ є допоміжними керуючими параметрами, а необхідна величина $(\mathbf{V}\pm\Delta\mathbf{V})$ – основним пошуковим параметром СКР ПМО.

Аналіз характеру взаємозалежності параметрів оброблювальної системи при роботі показав, що в управлінні якістю ПМО центром взаємодії є дві функціонально залежні силові системи (3.6). В цьому виразі основною силою що породжує динамічний процес, є головний вектор всіх змінних сил процесу різання, а йому протистоїть вторинний динамічний фронт у вигляді вектора пружно-інерційних сил автоколивального процесу ТОС. Функціонально структурний взаємозв'язок між ними і формування динамічної якості ПМО добре представлений на рисунку.2.5. На підставі всього вище сказаного була розроблена функціонально-параметрична схема управління динамікою ТОС і якістю обробки, представлена в Додатку Г.

На ній функціонально взаємодіють три динамічні оператори, які передавальні функцією за часом:

$$W_P(D) = \frac{dP_y(\tau)}{d|t; T_p; h_p|(\tau)}; W_{\text{УСС}}(D) = \frac{dY(\tau)}{dP_y(\tau)}; W_\phi(D) = \frac{dr(\tau)}{dY(\tau)} \quad (4.9)$$

На схемі $W_\phi(D)$ – динамічний оператор формоутворення оброблюваної поверхні, що визначає динамічну похибка механообробки $\Delta\vec{r}(\tau)$, як зміну

поточного радіусу деталі $\vec{r}(\tau)$ від зміни зсуву інструменту по нормалі $\vec{Y}(\tau)$;

$W_G(D) = \frac{dG(\tau)}{dY(\tau)}$ – динамічний оператор-перетворювач, як передавальна функція зміни віброакустичного сигналу $G(\tau)$ від зміни вібросувів $Y(\tau)$ супортного вузла ТОС від його автоколивань, вловлюваних акустичним датчиком.

Поточне значення віброакустичного сигналу $G(\tau)$ з датчика передається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що є аналізатором рівня динаміки УСС, що видає керуючі команди $X_i(\tau)$ на процесор при досягненні $G(\tau)$ критично допустимих рівнів. При цьому процесор змінює швидкість різання залежно від $G(\tau)$, як пошук необхідного значення $V(G)$, що міняє фазові зрушення векторів $\vec{P}_y(\tau)$ і $\vec{F}_{\Sigma}(\tau)$ для зменшення $Y(\tau)$ и $G(\tau)$, а отже і динамічній похибки $\Delta r(\tau)$ механообробки при точінні деталі.

От же на підставі описаних методів контролю і управління динамікою оброблювальної системи, розробимо систему автоматичного управління динамікою і якістю процесу механообробки

Головним контрольованим параметром є динамічна геометрична похибка ТОС $\Delta r(\tau)$. Але безпосередній його контроль в умовах сучасного виробництва надзвичайно складний (зняття контрольованого показника з деталі під час обробки із зони різання) в наслідок труднощі прямого зняття контрольованого показника з деталі під час обробки із зони різання. Тому обираємо непрямий метод контролю $\Delta r(\tau)$ за допомогою супутнього параметра процесу формування динамічної похибки – динамічного стану ТОС при обробці, контролювати який для даних умов виробництва просто.

Як вже описувалося в пункті 4.1 динаміку верстата зручно контролювати віброакустичною системою. Вихідний сигнал з датчика D_G встановленого на малорухливому супорті видає енергетичний рівень акустичного сигналу

$G(\tau)$, який безпосередньо залежить від рівня динамічних коливань верстата (4.7) і (4.8). Звідси слідує прямий кореляційний зв'язок між $\Delta r(\tau)$ та $\Delta G(\tau)$ через зміну рівня автоколивального процесу верстата. На підставі (4.8) можна одержати дві логічні залежності:

$$\Delta G_i(\tau) = A_{FG} \cdot \Delta F_{Di}(\tau) \text{ і } \Delta r_i(\tau) = A_{Fr} \cdot \Delta F_{Di}(\tau) \quad (4.10)$$

Де A_{FG} і A_{Fr} – масштабні коефіцієнти співвідношення енергії динамічних параметрів, що мають між собою прямий і лінійний зв'язок. Вони дозволяють одержати надійну і точну залежність між параметром якості $\Delta r(\tau)$ і параметром контролю $\Delta G(\tau)$:

$$\Delta r(\tau) = A_{Gr} \cdot \Delta G(\tau) \quad (4.11)$$

де A_{Gr} – масштабний коефіцієнт відображення динамічної похибки і відповідний цьому приріст акустичного сигналу з верстата.

Згідно книзі Ю.В.Петракова [6] для нашого принципу управління якістю механообробки необхідна САК, яка може автоматично регулювати процес механообробки за допомогою пошуку оптимальних режимів різання (швидкості V і подачі S_0), що зводять до мінімуму динамічні коливальні режими в оброблювальній системі. Оскільки під час обробки всі вихідні якісні показники змінюються в часі, в пошукових САК інформація про керований параметр повинна зніматися постійно безпосередньо в процесі обробки. Система автоматично її аналізує і шляхом ітераційного сканування з одночасною зміною швидкості різання V у велику або меншу сторону як $\pm \Delta V$, знаходить необхідний напрям вектора регулювання, що знижує динаміку ТОС. Таким чином система змінює фазове зрушення $\psi(\tau)$ між $\vec{P}_y(\tau)$ та $\vec{F}_{\Sigma}(\tau)$, приводячи їх до протидії і певного погашення, що зменшує взаємні зсуви деталі і інструменту $\vec{Y}(\tau)$ по нормалі, і отже мінімізує $\Delta r(\tau)$. Параметром, що відображає цей процес, є потужність

віброакустичного сигналу $\mathbf{G}(\tau)$, що знімається з супорта верстата п'єзодатчиком.

Як видно з рисунку 4.1. при такому управлінні задіяні чотири динамічних складових одержаної системи, позначених динамічними операторами $\mathbf{W}(\mathbf{D})$ за часом зображенням по Лапласу, що є перетворюючими передавальними функціями між головними параметрами верстата:

$-W_P(D) = \frac{dP_y(\tau)}{d t; T_p; h_p (\tau)}$	Оператор динаміки сили різання, збудник коливань в системі;
$-W_{ycc}(D) = \frac{dY(\tau)}{dP_y(\tau)}$	Оператор динаміки автоколивань в пружній системі верстата з амплітудою зсуву – $\mathbf{Y}(\tau)$;
$-W_G(D) = \frac{dG(\tau)}{dY(\tau)}$	Оператор динаміки збудження вібродатчика D_G ;
$-W_\phi(D) = \frac{dr(\tau)}{dY(\tau)}$	Оператор динаміки формоутворення поверхні деталі із змінним радіусом $\mathbf{r}(\tau)$, що формує динамічну похибка $\Delta\mathbf{r}(\tau)$.

Одержана структурна блок-схема такої автоматичної системи управління динамікою і якістю ПМО показана на рисунку.4.2.

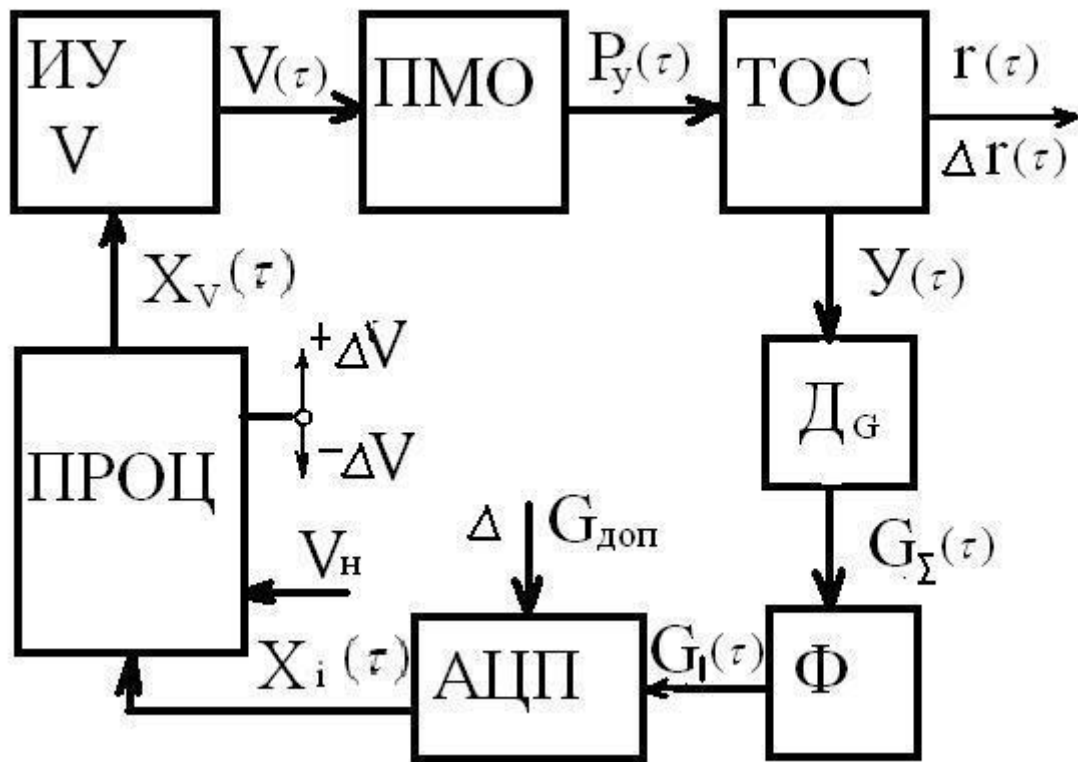


Рисунок. 4.2. - Структурна блок-схема САК динамікою і якістю ПМО коли з'являється умова (4.9), виконуючий пристрій ИУV змінює на необхідну величину швидкість різання V для зміни фазового зсуву $\psi(\tau)$ для різання $P_y(\tau)$

де процесор СЧПУ верстата проводить пошук необхідної величини і на пряму зміни сигналу управління швидкістю різання $X_v(\tau)$ при перевищенні сигналу з датчика D_G , тобто коли: $G_1(\tau) > G_{\text{доп}}$. Де $G_1(\tau)$ – віброакустичний сигнал першої (найнижчої) основної гармоніки частотного спектру коливань ТОС, що має найбільшу, а отже визначальну динаміку формоутворення поверхні деталі амплітуду коливань – $Y(\tau)$, відфільтрованого фільтром Φ для порівняння в АЦП з допустимою величиною $G_{\text{доп}}$. При виконанні умови (4.2), виконуючий пристрій ИУV змінює на необхідну величину швидкість різання V для зміни фазового зрушення $\psi(\tau)$ у сили різання $P_y(\tau)$. Графік функціонування такої САК показаний на рисунку.4.3.

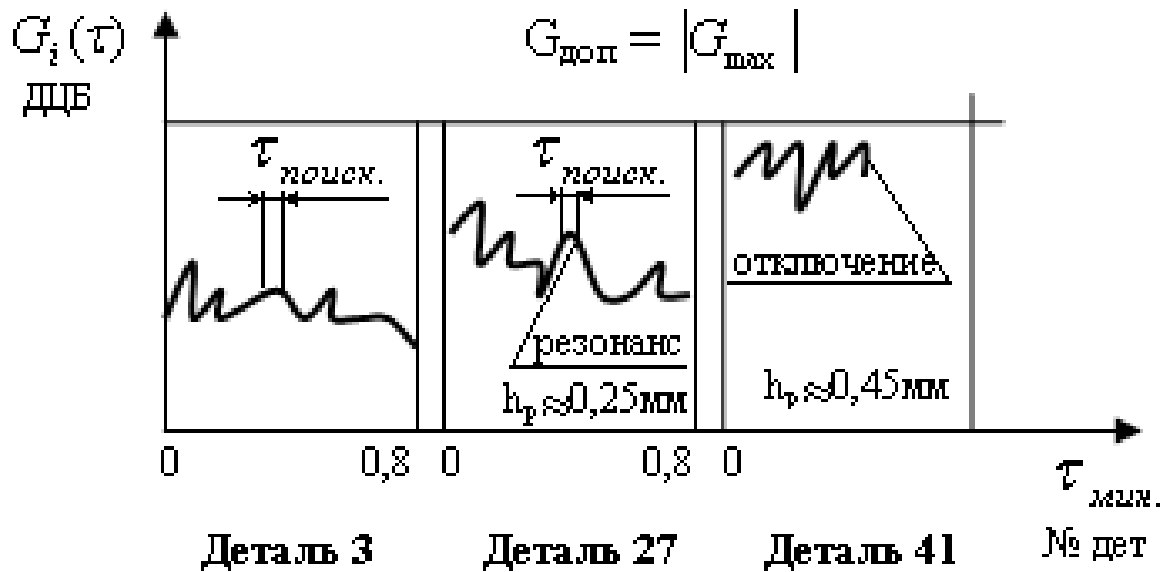


Рисунок 4.3 – Графік функціонування пошукової САУ динамікою і якістю ПМО

Проте при такому методі управління динамікою ТОС може відбутися небажане перевищення V вище за допустимий граничний рівень $0,3 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. У такому разі застосовують показник $|SV|$ який дозволяє витримувати ефективні режими обробки без порушення необхідної якості процесу механообробки. Тому до вище описаної САК (Рисунок 4.4) були прибудовані додаткові елементи реєстрації і аналізу регульованих режимів V і S_0 . У процесор СЧПУ верстата закладена програма постійної перевірки умови:

$$|S_0 V| < 0,3 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с} \quad (4.12)$$

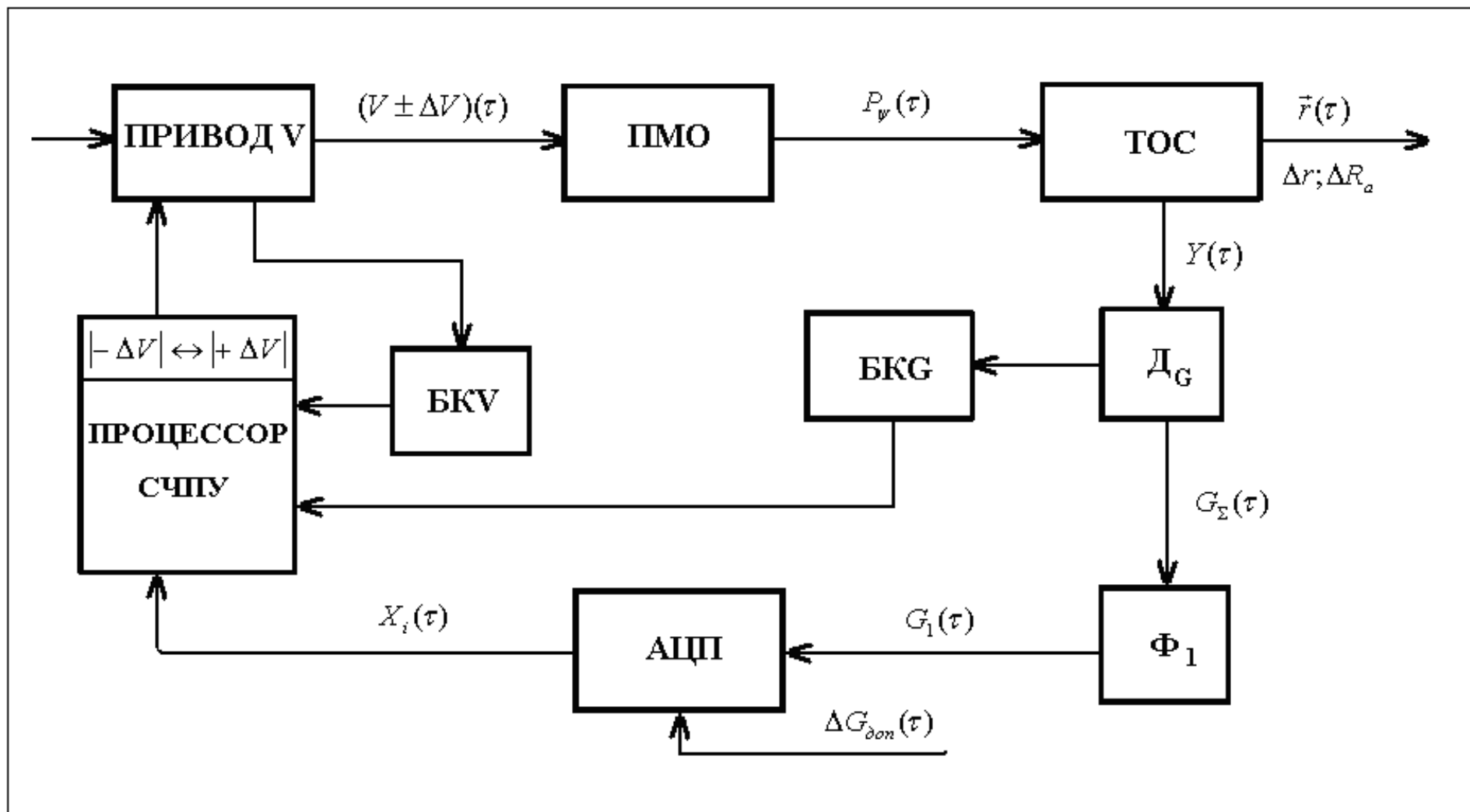


Рисунок 4.4. Структурна блок-схема САУ динамікою і якістю процесу механообробки.

Якщо при збільшенні швидкості різання ця умова не витримується, то система включає у вектор управління подачу S_0 , що дозволяє де-якийсь час оперувати при регулюванні процесу даним параметром. Структурна блок-схема САК динамічної механообробки з урахуванням показника $|S_0V|$ представлена на рисунку.4.4. Вона практично ідентична описаній вище схемі, оскільки принципи контролю і управління якістю, залишаються ті ж, але процесор виконує вже дві функції: підбору V і контролю умови $|S_0V|$ (4.12).

Для настройки і запуску даної системи необхідно аналітично або експериментально визначити допустимі небезпечні обмеження $F_{д\kappa}(\tau)$ у вигляді $|F_{д\kappa}|$, допустиме значення $|S_0V|$, необхідне значення за якістю поверхні S_0 . Експериментально це можна визначити за допомогою двох наявних різців, гострого і затупленого до певних значень. Таким чином визначаються допустимі рівні віброакустичного сигналу $G_{д\kappa}$, як основного показника придатності процесу механообробки, а також рівні допустимих приростів за часом сигналів $\Delta G_{д\kappa}$, що вказує на симптоми появи значних коливань в оброблювальній системі і необхідності проведення регулювання параметрів.

На підставі цих величин віброакустичних сигналів розробимо алгоритм роботи контролюючої системи моніторингу, представлений на рисунку 4.6.

У систему, що управляє, вводяться обмежувальні умови за якістю ПМО виходячи з динаміки ТОС при роботі. Через малі проміжки часу ведеться моніторинг отриманих з ТОС показників величини віброакустичного сигналу G_i , проводиться його постійний аналіз і порівняння подальших рівнів G_i з попередніми G_{i-1} . Вимірюється швидкість зміни цих сигналів і на цій підставі система постійно відстежує умови придатності:

$$|G_{\min} < G_i < G_{\max}|; |\Delta G_i \leq \Delta G_{д\kappa}| \quad (4.13)$$

На підставі цієї умови, ведеться цілеспрямоване регулювання динаміки оброблювальної системи за допомогою параметра $|\mathbf{SV}|$, дотримуючи умови (4.12).

3.3. Апробація результатів

Вимірювання геометричної похибки форми на циліндричність і хвилястість оброблених деталей, проводилося стандартним вимірювальним інструментом: мікрометром з ціною ділення шкали в 1 мкм у різних напрямках деталі і кругломер “ИНТАСТ” з ГДР із записом круглограм циліндричності деталі з точністю до 1 мкм в центральній вимірювальній лабораторії заводу “Автоматики ім. Г.И.Петровского” в м. Києві.

Виміри шорсткості поверхні, одержаної після обробки, проводилися на подвійному мікроскопі МИС-11 і профілографі ИЗП-17 по критерію R_a з вертикальним збільшенням в 2000 разів, з горизонтальним – в 80 разів.

Після проведення дослідів по чорновій і напівчистовій обробці заготовок точінням і проведених вимірів були складені протоколи вимірювань точності і шорсткості. Приклади одержаних круглограм хвилястості і ограності оброблених поверхонь показані на рисунках.

За наслідками аналізу точності обробки побудовані порівняльні графіки. На Рисунку 4.7 показаний порівняльний результат динамічних геометричних погрешностей при чорновій обробці, коли знос різця по задній поверхні склав до 0,5 мм. На рисунку.4.8 показаний графік порівняльного аналізу геометричної точності деталей по циліндричності при напівчистовій проточці тієї ж партії деталей, коли знос різця по задній поверхні склав $h_p \cong 0,35\text{мм}$.

Порівнюючи отримані результати бачимо, що при чорновій обробці без системи управління динамікою і точністю процесу динамічна похибка $\Delta\epsilon(\tau)$ (не циліндричність, хвилястість і овальність) на початку обробки дорівнює 6 мкм, а наприкінці обробки збільшується до 14 мкм. А при включенні системи управління ця ж похибка обробки склала $3\div 6$ мкм відповідно. Така ж

залежність спостерігається і при напівчистовому точінні зразків (Рисунок 4.8). Графіки показали, що динамічна похибка змінювалася з 3 до 8 мкм при обробці без АСК динамікою ТОС і з 1 до 3 мкм при обробці з системою АСК.

$$\Delta r(\tau)$$

мкм

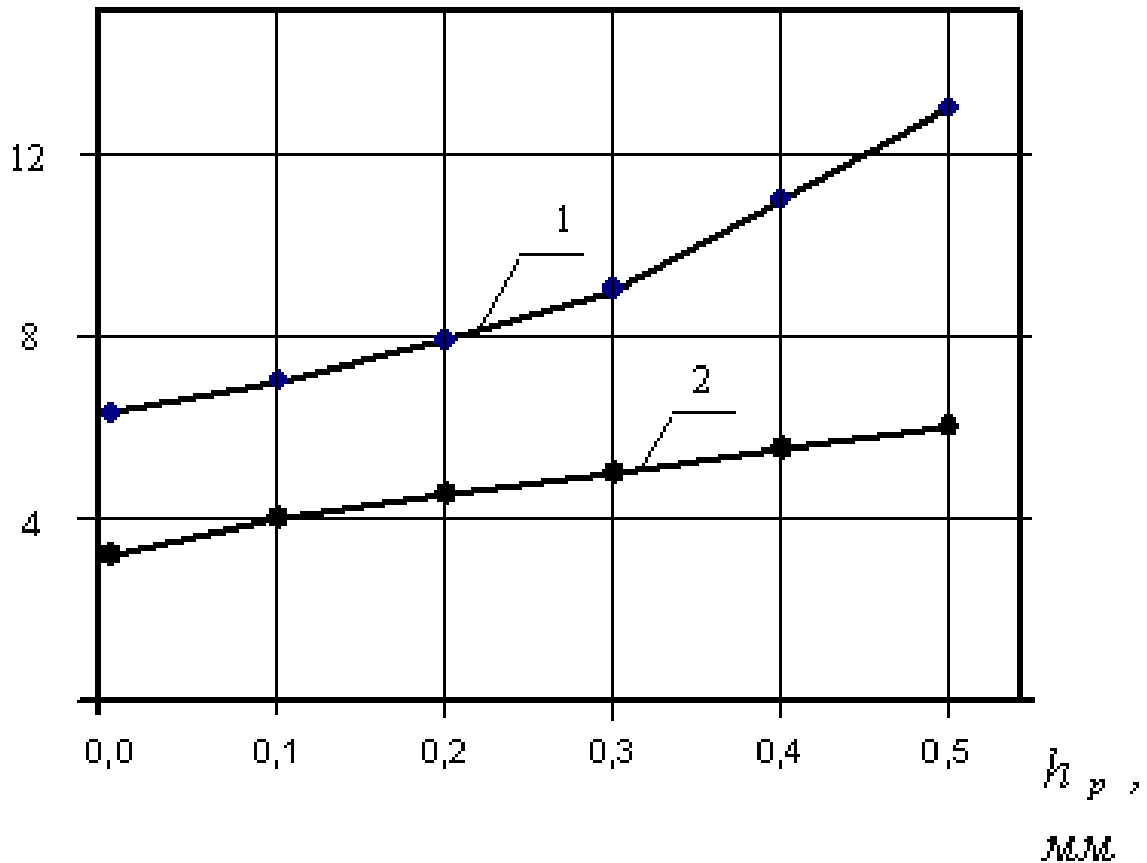


Рисунок 4.7. - Зміна динамічної похибки обробки при чорновому точінні стали в міру зношування інструмента:

- 1 – без системи стабілізації динаміки;
- 2 – із системою стабілізації.

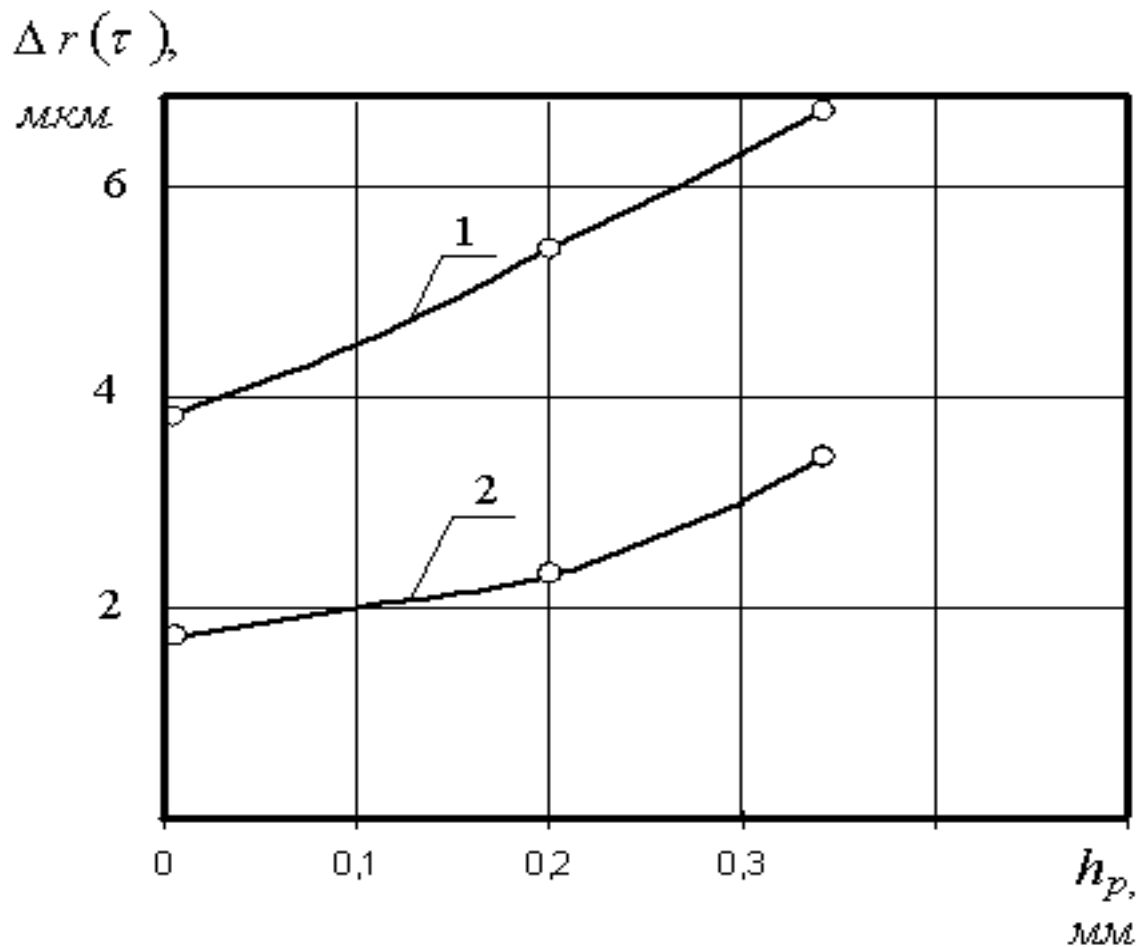


Рисунок 4.8. - Зміна динамічної похибки обробки при напівчистовому точінні сталі в міру зношування інструмента:

- 1 – без системи стабілізації динаміки;
- 2 – із системою стабілізації.

Шорсткість оброблених поверхонь при напівчистовому точінні була в наступних межах:

- без системи АСК $Ra \approx 2,8 \div 4,2$ мкм в кінці;
- з системою АСК Ra на початку – 0,8 мкм і 2,5 мкм – в кінці.

Дані результати показують, що розроблена нами система АСК ефективно працює. Вона дозволяє управляти динамічною стійкістю оброблювальної системи. В результаті знижується геометрична похибка і шорсткість оброблених деталей приблизно в 2 рази.

Висновки по розділу.

1. Існуює певна залежність між АФЧХ ПМО і автоколивальним процесом УСС яка дозволяє, змінюючи АФЧХ процесу різання, збільшувати або зменшувати динаміку оброблювальної системи. Таким чином, можна добитися протидії і придушення значного рівня коливань оброблювальної системи за допомогою примусової зміни основних режимів різання, швидкість різання і подачу інструменту, тим самим змінюючи фазове зрушення між головним вектором сили різання і вектором сил від пружно-інерційних коливань верстата. В результаті, покращити динамічну стійкість процесу механічної обробки та її якість.
2. Віброакустична система вимірювання є найбільш придатною системою для отримання достовірної інформації про динамічний стан процесу механообробки, його надійність і якість, а по рівню динаміки автоколивань можна судити про стійкість всієї оброблювальної системи.
3. В процесі обробки головним контрольованим параметром є динамічна геометрична похибка ТОС $\Delta r(\tau)$. Але безпосередній його контроль в умовах сучасного виробництва надзвичайно складний, отже контроль $\Delta r(\tau)$ здійснюється за допомогою супутнього параметра процесу формування динамічної похибки – динамічного стану ТОС при обробці, який контролюється за допомогою віброакустичної системи вимірювання.
4. Управління динамічним станом ТОС здійснюється зміною параметрів швидкості різання V і подачі S_0 . Отже САК автоматично регулює процес механообробки за допомогою пошуку оптимальних режимів різання що зводять до мінімуму динамічні коливальні режими в оброблювальній системі
5. Досліди розробленої АСК довели, що вона дійсно керує динамічною стійкістю оброблювальної системи, в наслідок цього знижується геометрична похибка і шорсткість оброблених деталей приблизно в 2 рази.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

Раніше ми визначили, що процес обробки металів ріжучим інструментом завжди супроводжують різного роду динамічні явища, що впливають на динамічну стійкість ТОС і відповідно якість виготовлення. Основними джерелами цих явищ є змінна за часом сила різання яка включає:

- змінну величину припуску, що зрізається;
- знос ріжучого інструменту;
- періодичність процесу стружкоутворення.

Тут ми розглянемо результати проведених досліджень деяких динамічних режимів, що виникають в ТОС в процесі роботи.

4.1. Опис обладнання та вимірювальних засобів, що застосовуються

Дані дослідження динаміки процесу механообробки деталей на верстатах є комплексом відомих і оригінальних методів і розроблених спеціальних методик, пристосувань, приладів і стендів, що дозволяють проводити комплексні дослідження динамічних характеристик як найбільш технологічної оброблювальної системи - ТОС, так і характеристик процесу різання металів, параметрів взаємодії інструменту і деталі. Всі зміни характеристик різання проводилися на спеціально розробленій системі-стенді, встановленій на токарному верстаті марки 1К62ПУ. Схема стенду для дослідження характеристик механообробки представлена в додатку Б.

4.2. Дослідження динаміки стружкоутворення

Процес різання металу ґрунтується на механічній деформації верхнього шару металу шляхом його зрізання з оброблюваної поверхні. Це супроводжується появою певних хвилевих процесів. Одним з них є стружкоутворення.

Утворення стружки здійснюється циклічно, шляхом пружно-пластичних деформацій в зоні контакту кромки ріжучого інструменту з оброблюваною деталлю. Також до циклічних процесів можна віднести процеси періодичного утворення і зриву наросту на ріжучій частині інструменту, адгезійного схоплювання задньої поверхні інструменту з деталлю і т.п. При механічній обробці деталі, всі ці процеси є джерелом спочатку в окремих пружних елементах, а потім і у всій ТОС автоколивачів і параметричних коливань багатьох характеристик різання.

Представимо ідеальний випадок процесу механообробки, в якому режим різання встановився, інструмент гострий, а заготовка заздалегідь проточена і має ідеальну форму без періодичної зміни припуску і відсутні інші збуджуючі чинники. І навіть в цьому випадку процес різання буде супроводжуватися автоколиваннями, тобто певною динамічною нестабільністю із-за періодичності стружкоутворення. Динаміку такого різання В.А.Кудінов [17] описує математичною залежністю в операторній формі:

$$W_p(\tau) = \frac{K_p}{T_p \omega i + 1} \left| \frac{1}{\text{сек}} \right| \quad (3.1)$$

де головним змінно-циклічним збудником автоколивань є постійна часу стружкоутворення – T_p визначається по формулі:

$$T_p = \eta \cdot a \cdot \xi / V \quad (3.2)$$

де η – коефіцієнт пропорційності, залежний від оброблюваного матеріалу і умов різання; a – товщина зрізу; ξ – величина усадки стружки

($\xi \approx 0,75 \div 0,88$); V – швидкість різання; T_P – час за який відбувається утворення елементу стружки при пластичному зрушенні.

Відмітимо, що величина T_P має пряму залежність від швидкості різання (3.2), а також визначає циклічність динамічного процесу $W_P(\tau)$ (3.1), міняючи частоту періодичного збудження.

По дослідженнях І. А. Тімме така частота циклічності стружкоутворення f_0 визначається наступним виразом:

$$f_0 = \frac{V}{\eta_{ac}} \left| \frac{1}{сек} \right| \quad (3.3)$$

де C - введений Тімме коефіцієнт, визначуваний відношенням довжини хвилі зрушення сегменту стружки L_B до товщини зрізу a , як $C = L_B / a$.

На кафедрі технології приладобудування були проведені досліди за визначенням такої частоти за допомогою двоконпонентного динамометра – розрізного різця, оснащеного високочутливим п'єзокерамічним датчиком ЦТС, з реєстрацією і необхідним перетворенням одержуваного сигналу на віброметричному стенді.

Досліджувана частота утворення сегментів стружки визначалася при подовжньому точінні стали 45 на універсальному верстаті ТПК125 з режимами різання:

$$t=2 \text{ мм}; S_0=0,2 \text{ мм/об}; V=0,5-0,8 \text{ м/с};$$

і геометрією твердосплавної пластини з Т15К6:

$$\varphi = 45^0; \gamma = 0^0; \alpha = 10^0$$

Отримані результати експерименту наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Швидкість різання V м/с	Довжина сегментів стружки 1 мм	Середня товщина стружки h мм	Частота сегменту утворення стружки f_0 Гц

0,666	0,85	1,16	410
1,40	0,76	1,02	780
2,26	0,58	0,94	1440
3,00	0,56	0,85	2350
8,10	0,55	0,82	3850

У своїй роботі Н. В. Василенко [13] досліджуючи циклічний процес збудження вібрації в процесі різання від періодичності стружкоутворення, і в роботах інших дослідників [16,18,19 і др.] була встановлена певна закономірність даного процесу. Вони встановили, що множення довжини хвилі l_B на швидкість різання V є числом приблизно постійним:

$$\lambda = l_B \cdot V \approx const \quad (3.4)$$

Довжина хвилі l_B (або кількість “зубців” - зрушень) підраховується на певній вибраній базовій довжині L_{BAZ} , що приймається в межах від 1...3 мм. Тоді довжина хвилі дорівнює:

$$l_B = N / L_{BAZ} \quad (3.5)$$

де N -число зрушень або хвиль на базовій довжині L_{BAZ} .

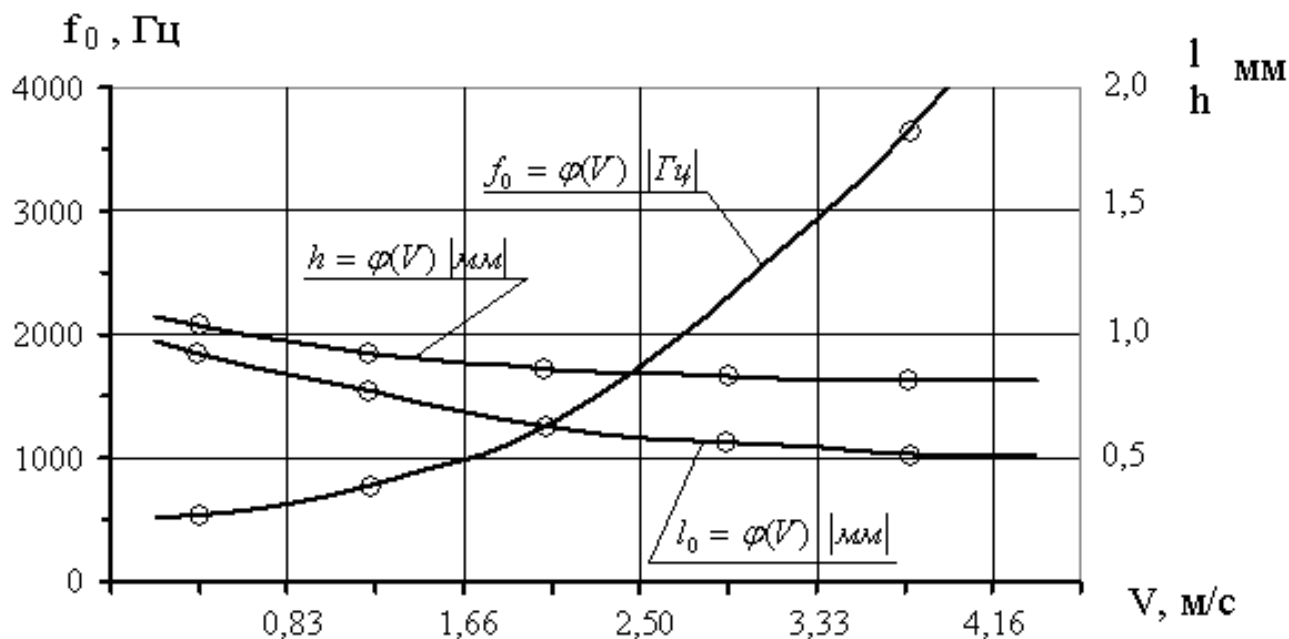
Ми перевірили цю гіпотезу в нашому експерименті шляхом підрахунку даних для випадку малих швидкостей. При малих швидкостях такі хвилі ще можна розрізнити під лупою. Дані цих досліджень приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

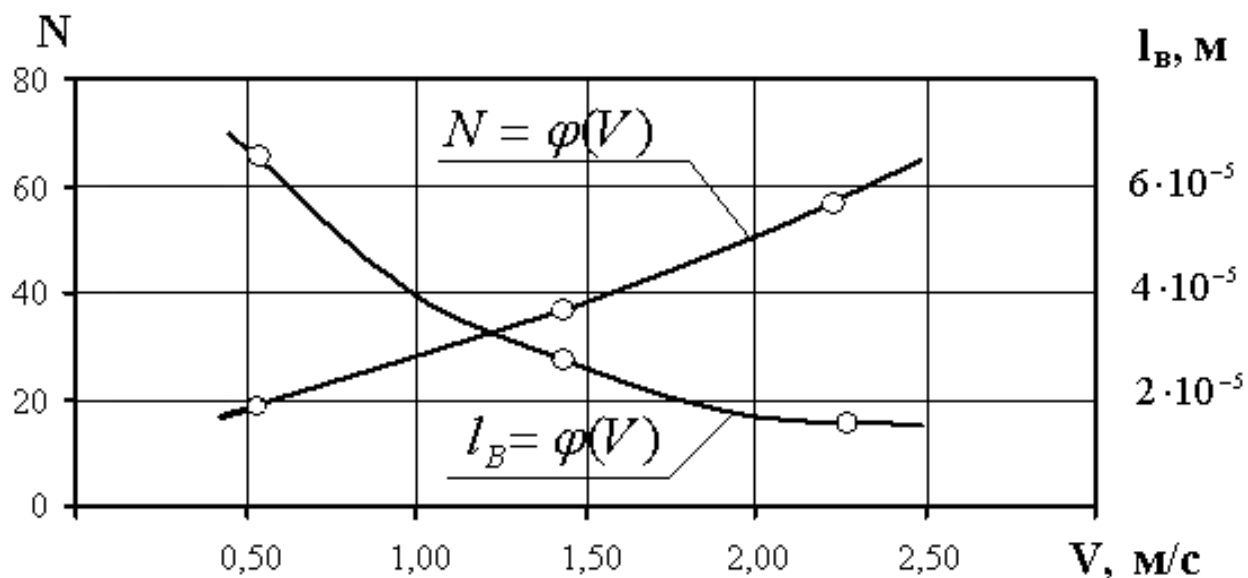
Швидкість різання V м/с	0,666	1,40	2,26
Кількість хвиль N на базовій довжині ($L_{BAZ}=1$ мм)	18	34	58
Довжина хвилі l_B м	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$2,90 \cdot 10^{-5}$	$1,80 \cdot 10^{-5}$
Множення $\lambda = l_B \cdot V$ м ² /с	$4,40 \cdot 10^{-5}$	$4,06 \cdot 10^{-5}$	$4,068 \cdot 10^{-5}$

У завершенні експерименту, за одержаними даними були побудовані графіки залежностей $f_0 = \varphi(V)$, $N = \varphi(V)$ і $l_B = \varphi(V)$ – представлені на рисунках (3.1. і 3.2.).

На графіках добре видно залежність циклічності стружкоутворення від швидкості різання. З підвищенням швидкості різання зростає і частота циклічності стружкоутворення.



Сталь 45; при $t=2$ мм; $S_0=0,2$ мм/об; $V=0,6 \div 2,3$ м/с. Різець Т15К6 при $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\alpha=10^\circ$



Обработка стали 45 при $t=2$ мм; $S_0=0,2$ мм/об; $V=0,6 \div 2,3$ м/с. Різець Т15К6 при $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\alpha=10^\circ$

4.3. Експериментальне дослідження нелінійно-гістерезисної природи сили різання

У попередніх параграфах ми визначили, що основним чинником механообробки, що порушує динамічну стійкість ТОС, є змінна величина сили різання. Розглядалися різні причини, що викликають таку закономірність прояву сили різання. До того ж періодична дія сили різання викликає в пружно-дисипативній системі верстата (ПДСВ) вторинний динамічний фронт пружних коливань у вигляді автоколивального процесу елементів ТОС. А він у свою чергу підтримує циклічність зміни сили різання.

Теорія пружності показує, що всі тіла, що пружно-деформуються, а також пружні складно-збірні системи при змінних циклічних діях зовнішньої сили проявляють нелінійну і гістерезисну коливальну поведінку, яка полягає в тому, що пружне коливальне переміщення в найменше жорстких частинах елементів системи нелінійно залежить і відстає по фазі від діючої сили. А в складних, багатоеlementних пружних системах при створенні деяких певних умов коливань можливо і випередження таких коливальних переміщень по відношенню до постійно діючої циклічної збуджуючої сили, яка все ж таки підтримує такий автоколивальний режим.

Прикладом такої пружної системи може служити складна коливальна система метало ріжучого верстата в автоколивальному процесі роботи. В результаті взаємодії двох її головних підсистем: шпиндель-деталь і інструмент-супорт в пружно-коливальному процесі, генерується змінна складова сили різання, залежність якої від переміщення елементів системи носить нелінійно-гістерезисний характер [13].

При механічній обробці деталі, амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) автоколивального процесу верстата як правило не співпадають з АЧХ процесу різання, що і обумовлює не лінійність в їх взаємозв'язку. Відбувається запізнювання пружно-інерційних сил, що можна представити у вигляді автоколивального режиму елементів верстата і зсувів підсистем від

силових впливів сил різання і тертя. У першому наближенні такий процес взаємозв'язку сил різання, тертя і пружно-інерційних сил елементів що коливаються оброблювальною системою, в кожен момент часу можна представити у вигляді векторно-пружної взаємодії двох силових систем, де головною характеристикою є жорсткість цих сил C_P .

$$\sum_{i=1}^n \vec{P}_i(\tau) \cdot \eta_i \quad \overset{\wedge \wedge \wedge}{C_P} \quad \sum_{j=1}^k \vec{F}_j(\tau) \cdot \eta_j \quad (3.6)$$

де перша сума представляє векторну суму постійної і змінної сил різання від різних збуджуючих чинників числом n , що викликають вимушені коливання в оброблювальній системі; друга - векторна сума інерційних сил від пружних коливань елементів верстата, як силові дії на всю систему автоколивального процесу з числом таких сил k ; η_i, η_j - тригонометричні функції при проекції всіх сил на вісь Y , де найбільш чутливі похибки обробки.

Висновки по розділу.

1. Процес різання завжди супроводжується автоколиваннями. Причиною тому є процес стружкоутворення, як одна з його складових. Процес стружкоутворення лінійно залежить від швидкості різання. Тобто із збільшенням швидкості різання збільшується і частота циклічності стружкоутворення.
2. Періодична дія сили різання викликає в пружно-дисипативній системі верстата вторинний динамічний фронт пружних коливань у вигляді автоколивального процесу елементів ТОС. При цьому коливальні переміщення можуть запізнюватися або випереджати постійно циклічно діючу збуджуючу силу.
3. На частотні характеристики процесу різання головний вплив робить швидкість різання і подача інструменту. При збільшенні швидкості різання частотний спектр зростає, а при збільшенні подачі - зменшується із-за збільшення об'єму пластичної деформації, що демпфірує коливання.

Висновки по роботі

В процесі виконання даної роботи були досліджені процеси і причини виникнення погрішностей при механічній обробки деталей на токарних верстатах, а також засоби боротьби з ними. Багато погрішностей вносяться на перших стадіях підготовки деталі до обробки, тобто до того як деталь почне оброблятися на верстаті. Це такі похибки як:

- Методичні похибки.
- Похибки неточної установки заготовки.
- Похибки настройки верстата на розмір.

Це легко контрольовані похибки, що усуваються. Найбільшу складність контролю та управління представляють похибки механічної обробки.

Такі похибки складаючись з багатьох чинників виражаються в загальний автоколивальний процес всієї оброблювальної системи. Автоколивальний процес - небезпечне і сильне явище, яке по мимо погрішностей обробки що вносяться, досягши резонансу руйнує ріжучий інструмент, ламає заготовку і виводить з ладу верстат. Дослідження в цій області показали, що головним збудником автоколивань є динамічний процес різання. Його керуючими параметрами є швидкості різання V та подачі S_0 . Керуючи динамічним процесом різання можна управляти динамічною стійкістю ТОС. Отже точністю і якістю обробки.

І так для управління динамічним станом ТОС потрібна інформація про поточний стан процесу різання і відповідно стан ТОС в цілому. Це завдання, контролю процесу різання, вирішують безконтактні віброакустичні системи вимірювання. На підставі одержаної з їх допомогою інформації можна судити про динамічний стан процесу механообробки, а по рівню динамічних автоколивань про стійкість всієї оброблювальної системи.

На підставі цих процесів і була розроблена система контролю і управління динамікою ТОС і якістю ПМО. Віброакустична система веде постійний моніторинг динамічного стану процесу механообработки і передає ці дані в СЧПУ. Процесор їх обробляє, порівнюючи із заданими умовами і видає сигнали керування параметрами швидкості різання V і подачі S_0 , управляючи таким чином динамічним станом ТОС і якістю ПМО.

Випробування показали, що використання розробленої АСК привело до зниження геометричної похибки і шорсткості оброблених деталей в 2 рази, в порівнянні з деталями обробленими без АСК на одному і тому ж верстаті. Що доводить ефективність використання і роботи розробленої АСК.

Література

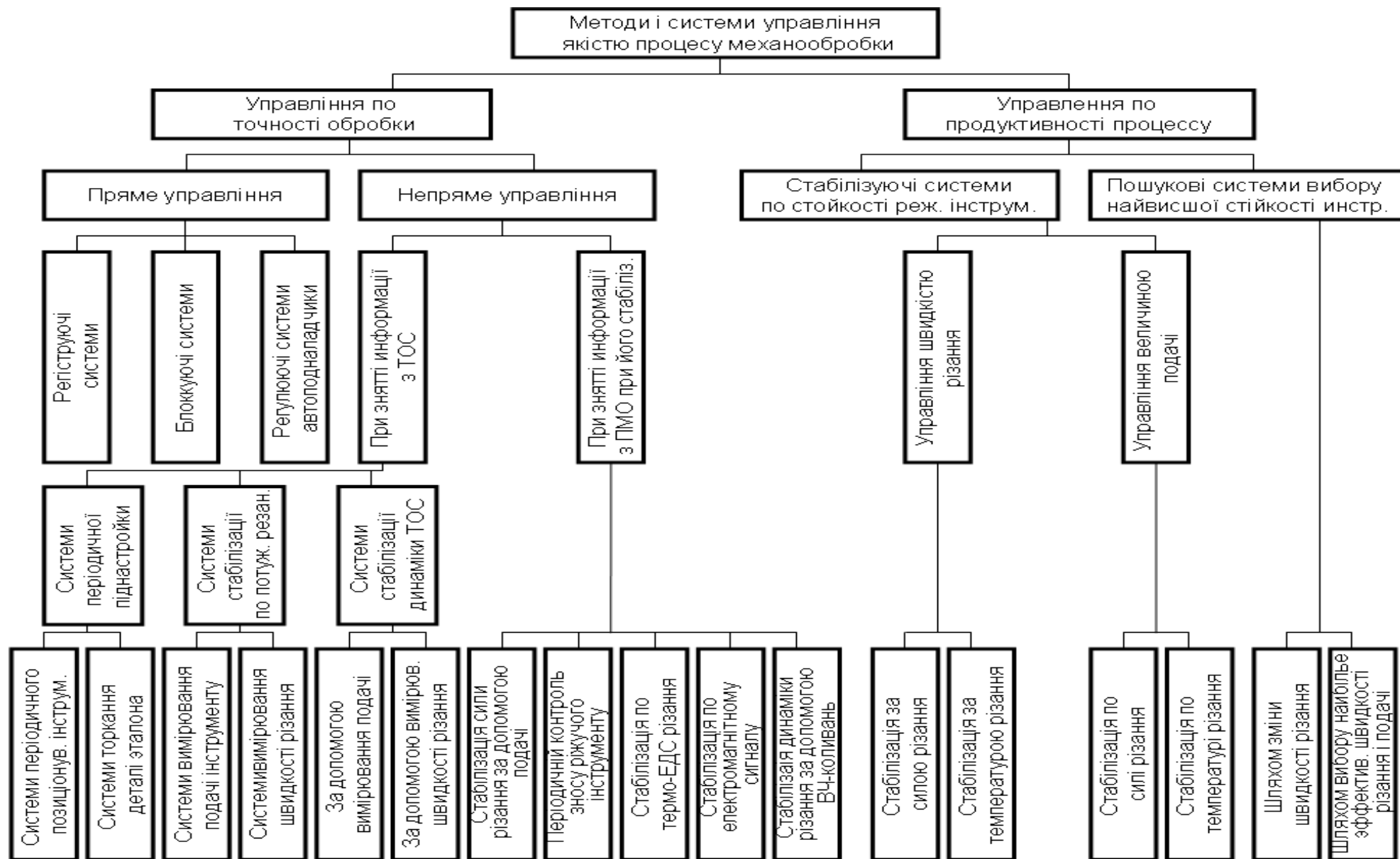
1. Каширин А.И. Вопросы устойчивости рабочего движения при обработке металлов резанием. //Сб. “Исследование колебаний металлорежущих станков при обработке”. – М.: Машгиз, 1958, Гл.IV.
2. Кудинов В.А. Влияние деформируемости системы станок-деталь-инструмент на производительность, точность и чистоту поверхности детали. – М.:1963, НТП «Машиностроение».-64с.
3. Лазарев Г.С. Устойчивость процесса резания металлов. - М.: «Высшая школа», 1973.- 184с.
4. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного управління в металообробці. Навчальний посібник.-К.: ІЗМН, 1999. - 212с.
5. Гнатейко Н.В. Исследование колебательного процесса станка при механической обработке.//Сб. «Перспективные технологии, оснастка и методология, подготовка производства». –К.:НТУУ «КПИ», 1997. с.61-64.
6. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А. Анализ динамической устойчивости обрабатывающей системы // Вибрация в технике и технологии. Винница.-1999, №12.с.28-30.
7. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А. Методика керування динамікою обробної механічної системи. // Наукові вісті. НТУУ «КПІ».-2003, №6.-с.55-58.
8. Василенко Н.В. Автоколебания при резании материалов с учетом источника энергии. -К.: ДАН УССР, серия А, №1, 1967, с.47-49.
9. Василенко Н.В. Теория колебаний. Учебное пособие. -К.:Вища школа, 1992. -430с.
- 10.Румбешта В.А., Остафьев В.А., Кокаровцев В.В. Система контроля процесса обработки на станках с ЧПУ. // Вестник Киевского Политехнического института. Серия «Приборостроение». Выпуск 13.-К.:1989, с.67-69.
11. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. –М:Машиностроение, 1978.-198с.
12. Кудинов В.А. Динамика станков. –М: Машиностроение, 1967. -359с.
13. Кушнир Э.Ф. амплитудно-фазово-частотных характеристик упругой системы станка при резании. // Станки и инструмент. -1983. -№3. с. -11-15.
14. Армин Б.П. Вибрация и режимы резания. –М: Машиностроение. 1972. -208с.
15. Локтев В.П., Попов В.И. Динамика станков.

16. Локтев В.П., Попов В.И. Влияние случайного возмущения на динамическую устойчивость станка. // Машиностроение. №1 -1974 – с.64-69.
17. Физические основы процесса резания металлов. // Коллектив авторов. Под ред. Остафьева В.А. –К.: Вища школа. 1976. -166 с.
18. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А. Анализ динамической устойчивости обрабатывающей системы. //Вибрация в технике и технологиях. - №3, 1999. –с. 28-30.
19. Гнатейко Н.В., Румбешта В.О. Підвищення якості процесу точіння за рахунок стабілізації обробної системи. /Вісті Академії інженерних наук України, №3: НТУУ «КПІ». 2002. с.35-37.
20. Румбешта В.О., Гнатейко Н.В. Методика оцінки показників якості роботи технічних систем за часом. / Наукові вісті Житомирського інженерно-технічного інституту. №23. Житомир, ЖІТІ. 2003. с.19-21.
21. Гнатейко Н.В., Румбешта В.О. Методика керування динамікою обробної механічної системи. / Наукові вісті НТУУ «КПІ» №6. 2002. с.55-58.
22. Дуж Я. Организация системы информации на предприятии. М.: Прогресс, 1972. 252 с.
23. Голиков В.Т. Автоколебания при точении. // Сб. научных трудов. Куйбышев, «Механика», 1962, с.68-74.
24. Н.А. Возникновение автоколебаний в станках и виброустойчивость станков. –М.: Машгиз. 1967. -162с.
25. Зорев Н.Н., Грановский Г.И., Лоладзе Т.Н. Развитие науки о резании металлов. М.: «Машиностроение». 1967. 380 с.
26. Салыга В.И. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Идентификация и оптимальное управление. Справочник. –Харьков: ХГУ.1976. 179 с.
27. Румбешта В.О., Андрусенко О.О. Автоматизована система аналізу якості приладів на етапах вихідного контролю та випробувань / Вісник НТУУ "КПІ" серія приладобудування №30. 2005. с.104-109.

28. Гнатейко Н.В., Румбешта В.А., Никитчук Е.А. Повышение качества процесса механообработки путём стабилизации динамики технологической обрабатывающей системы. / Вісник НТУУ "КПІ" серія приладобудування №31. 2006.
29. Никитчук О.О., Румбешта В.О. Стабилизация динамики ТОС в процессе механообработки. / Сборник тезисов докладов на Пятую Всеукраинскую молодёжную научно-техническую конференцию «Машиностроение глазами молодёжи». Сумы. 2005.
30. Никитчук О.О., Румбешта В.О. Забезпечення динамічної стабілізації технологічного обладнання (на прикладі токарного верстата). / Збірник тез доповідей на конференцію приладобудівного факультету НТУУ "КПІ". Київ. 2006.

Додаток А

Схема А. Активне управління якістю виробів



Додаток Б

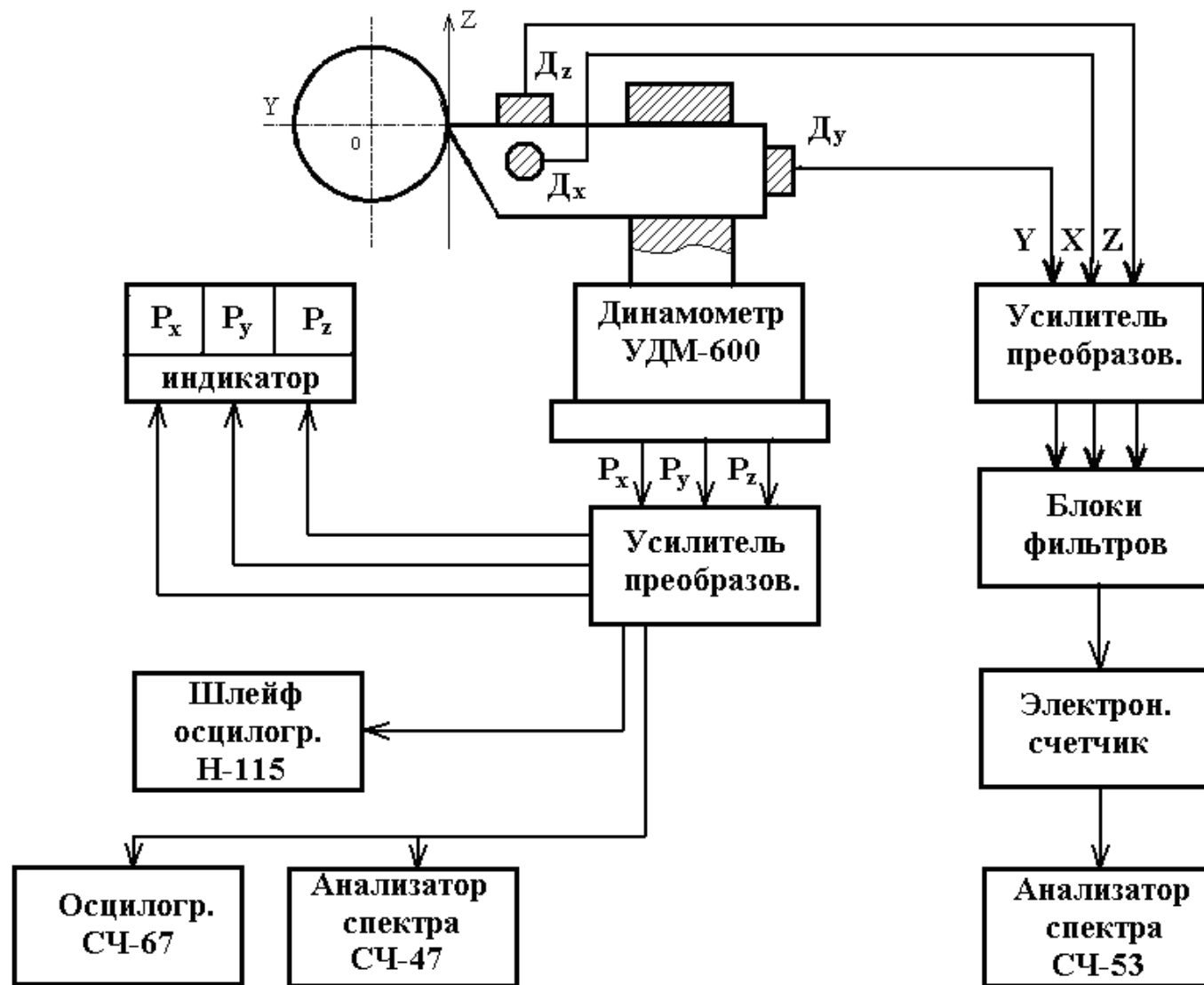


Рисунок Б - Стенд для дослідження характеристик механічної обробки.

Додаток В

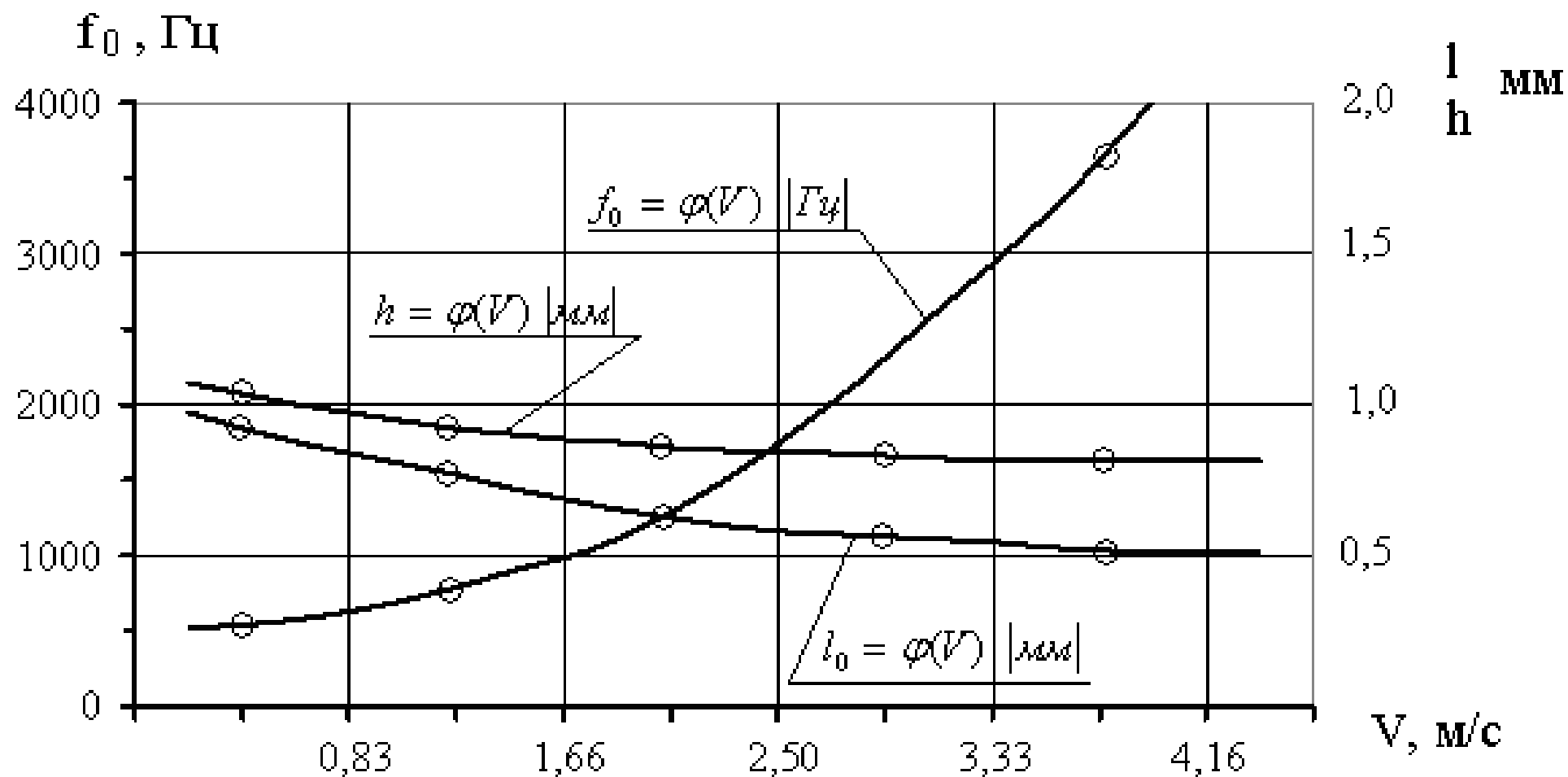


Рисунок. В1. - Залежність частоти стружкоутворення f_0 , довжини сегменту стружки l і її товщини h від швидкості різання V . Сталь 45; при $t=2\text{мм}$; $S_0=0,2\text{мм/об}$; $V=0,6\div 2,3\text{м/с}$. Різець Т15К6 при $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$;
 --- 100

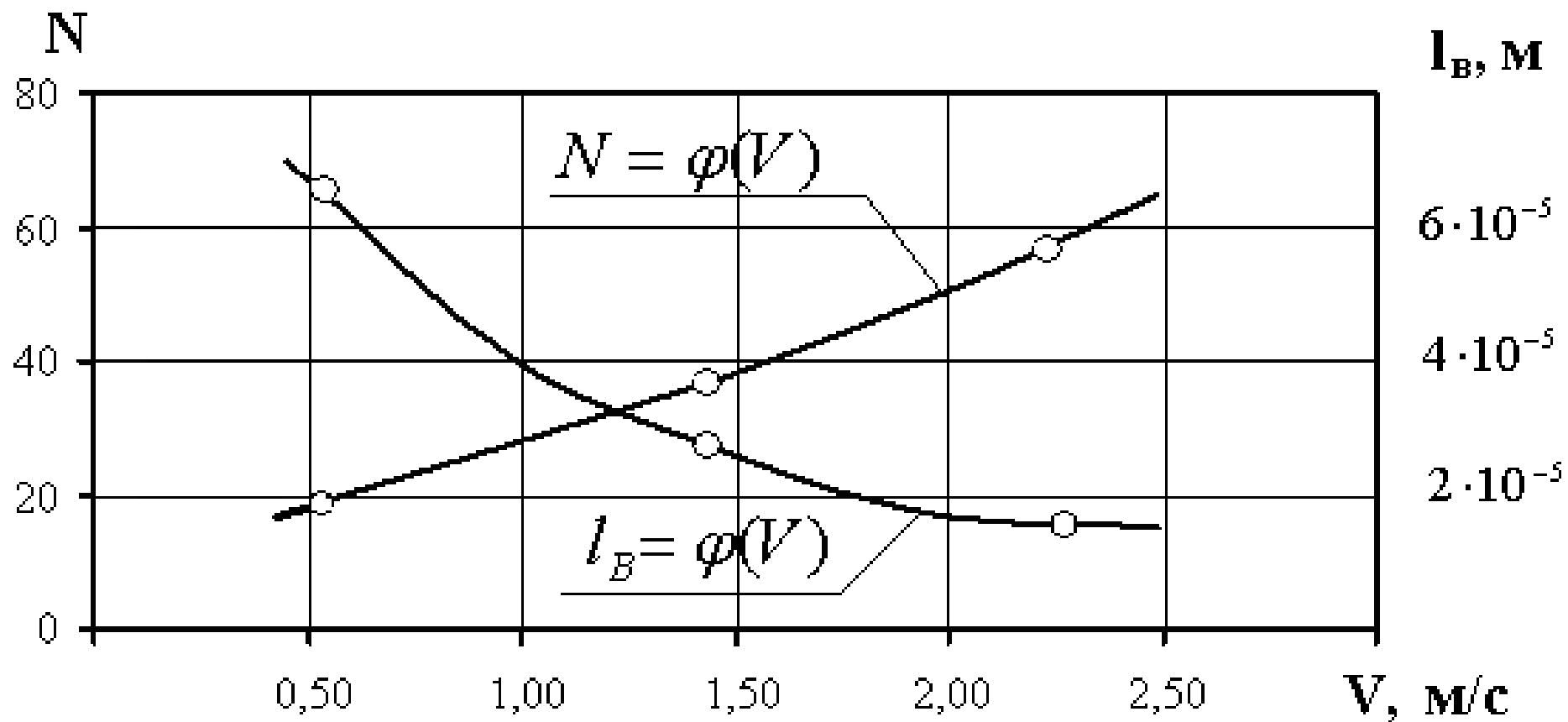


Рисунок. В2. - Залежність кількості зрушень стружки N і довжини її хвилі l_B від швидкості різання V . Обробка сталі 45 при $t=2\text{мм}$; $S_0=0,2\text{мм/об}$; $V=0,6\div 2,3\text{м/с}$. Різець Т15К6 при $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\alpha=10^\circ$.

Додаток Г

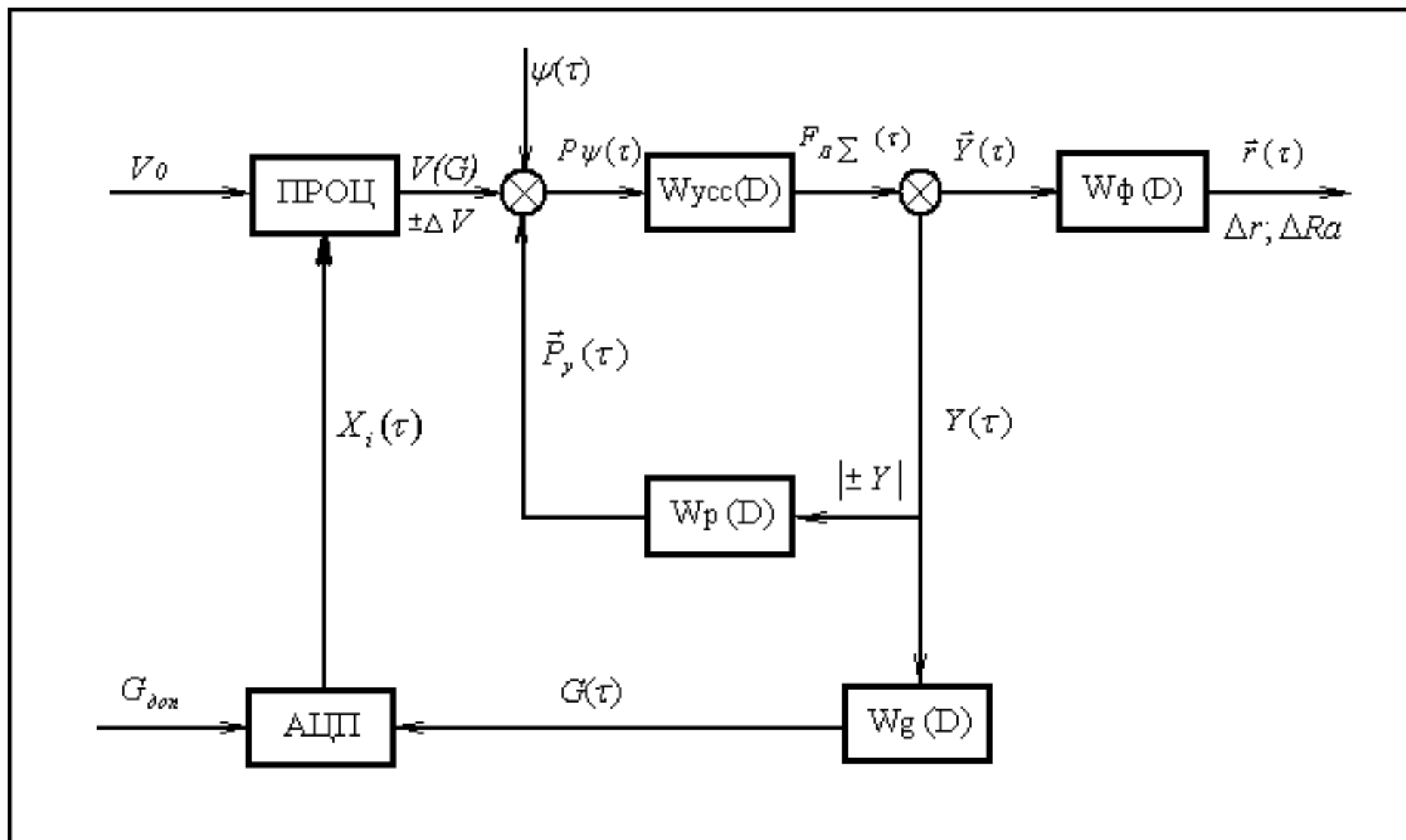


Рисунок Г. - Функціонально-параметрична схема стабілізації ТОС і управління якістю механообробки точінням

Додаток Д

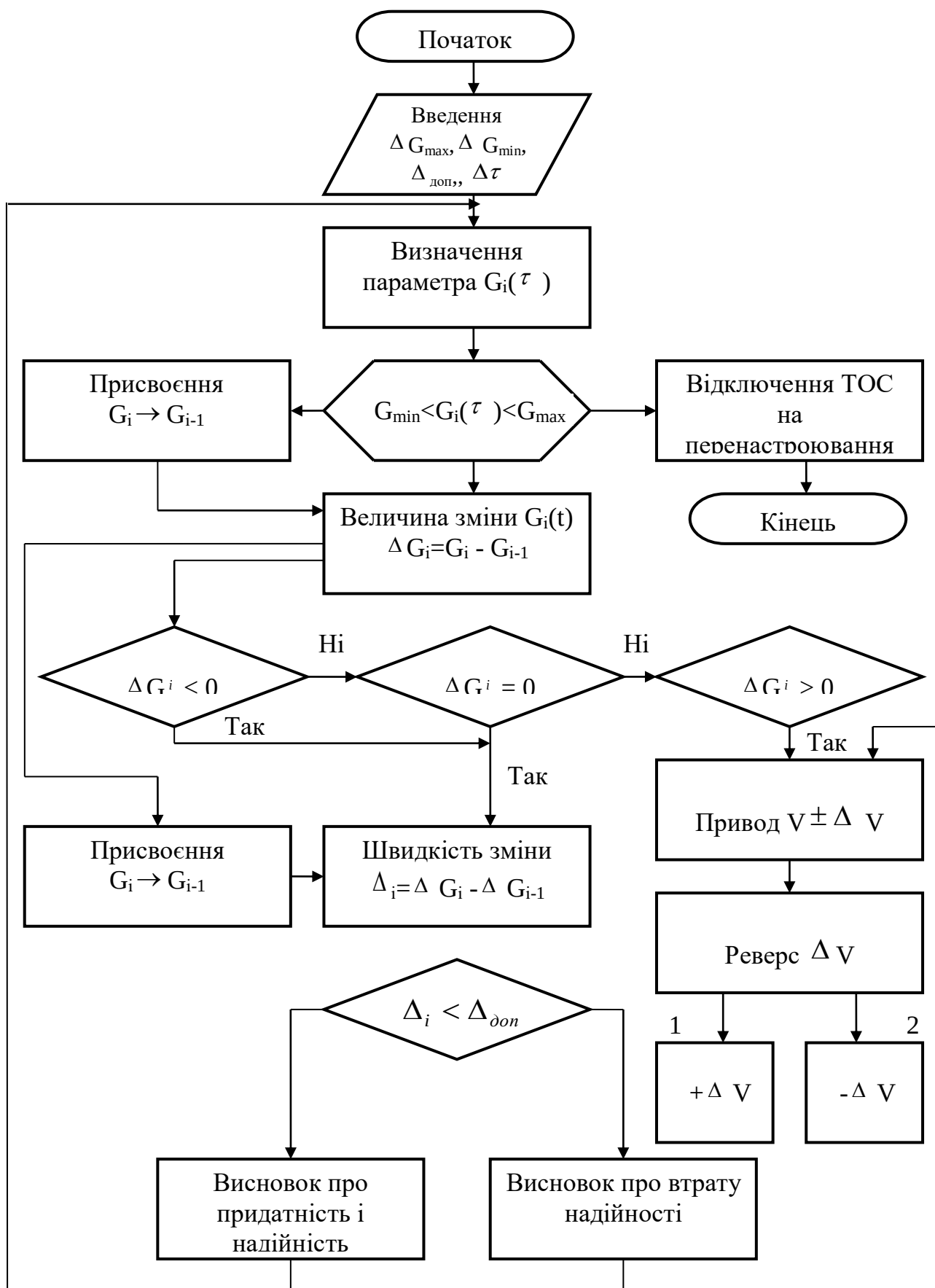


Рисунок Д. Приведений алгоритм роботи системи стабілізації ТОС при обробці