

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

на тему:

**«Моделювання та прогнозування впливу технологічної
спадковості форми заготовки на якість точіння деталей»**

**«Modeling and predicting the influence of the technological inheritance
of the workpiece shape on the quality of turning parts»**

Виконавець: здобувач гр. ГМ-24М-3

_____ Ярослав КОЛІСНІЧЕНКО

Керівник: к.т.н., доц.

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: к.т.н., доц.

_____ Олег БЕВЗ

Зав. каф. ММіР: к.т.н., доц.

_____ Андрій ГРЕЧКА

Анотація

КОЛІСНІЧЕНКО Ярослав. Моделювання та прогнозування впливу технологічної спадковості форми заготовки на якість точіння деталей. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2026. – 94 с. Матеріали презентації 9 іл.

Актуальність: Під час оброблення деталей на верстатах виникають похибки, спричинені станом заготовки та нерівномірністю припуску після попередніх операцій. Цей вплив зумовлений явищем технологічної спадковості, коли результати минулих етапів переносяться на наступні. Ефективним способом мінімізації цих похибок є вибір раціональних режимів різання (швидкості, подачі, глибини). Оптимізація цих параметрів дає змогу зменшити прояви технологічної спадковості та забезпечити задану точність і якість поверхні деталі.

Метою роботи є підвищення якості токарної обробки за рахунок обґрунтованого вибору раціональних режимів різання ще на стадії проектування технологічної операції шляхом використання програмного забезпечення, яке дає змогу моделювати процес точіння з урахуванням впливу технологічної спадковості, зокрема відхилень форми заготовки, що сформувалися на попередніх етапах її виготовлення.

Практичне значення: Розроблений метод і відповідний алгоритм визначення технологічної спадковості форми деталі у поперечному перерізі у функції повздовжньої координати, та програма, що моделює процес обробки.

Ключові слова: точіння, якість обробки, технологічна спадковість, технологічна оброблювальна система

Annotation

KOLISNICHENKO Yaroslav. Modeling and predicting the influence of the technological inheritance of the workpiece shape on the quality of turning parts. Graduation thesis for the educational degree "Master": CNTU, city Kropyvnytskyi, 2026. - 94 p. Presentation materials 9 slides.

Relevance: During machining, errors occur due to the workpiece condition and machining allowance non-uniformity from previous operations. This impact is caused by technological heredity, where preceding stage results transfer to subsequent ones. Choosing rational cutting data (speed, feed, depth of cut) effectively minimizes these errors. Optimizing these parameters reduces technological heredity effects, ensuring specified part accuracy and surface quality.

The purpose of this work is to improve turning quality by reasonably selecting rational cutting data at the technological operation design stage, utilizing software that simulates the turning process considering technological heredity, specifically workpiece shape deviations formed during preceding manufacturing stages.

Practical meaning: A method, an algorithm for determining the technological heredity of the part cross-sectional shape as a function of the longitudinal coordinate, and software simulating the machining process have been developed.

Key words: turning, processing quality, technological heredity, technological system

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММіР
Андрій ГРЕЧКА

«__»_____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Ярослава КОЛІСНІЧЕНКО

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Моделювання та прогнозування впливу технологічної спадковості
форми заготовки на якість точіння деталей
Modeling and predicting the influence of the technological inheritance
of the workpiece shape on the quality of turning parts

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

затверджені наказом ЦНТУ від «01» грудня 2025 р. № 83-13

3. Строк подання роботи до захисту 15 травня 2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є підвищення якості токарної обробки за рахунок обґрунтованого вибору раціональних режимів різання ще на стадії проектування технологічної операції шляхом використання програмного забезпечення, яке дає змогу моделювати процес точіння з урахуванням впливу технологічної спадковості, зокрема відхилень форми заготовки, що сформувалися на попередніх етапах її виготовлення.

Завдання:

- проаналізувати сутність технологічної спадковості та розглянути загальні підходи до її врахування під час проектування операцій механічної обробки;
- сформулювати статичну й динамічну моделі пружної технологічної обробної системи (ТОС) при виконанні токарної обробки;
- розробити методику та алгоритм визначення проявів технологічної спадковості форми деталі в поперечному перерізі залежно від поздовжньої координати заготовки;
- виконати теоретичне дослідження впливу спадкових відхилень форми заготовки на показники якості токарної обробки;
- розробити програмні засоби, що дають змогу прогнозувати, аналізувати й керувати впливом технологічної спадковості під час обробки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Олександр ЛИСЕНКО		
Організаційно-економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Грудень 2025	
2.	Вступ	Січень 2026	
3.	Мета та задачі роботи	Січень 2026	
4.	Методика роботи	Лютий 2025	
5.	Теоретична робота	Березень-квітень 2025	
6.	Визначення економічної ефективності	Квітень-травень 2025	
7.	Висновки	Травень 2025	
8.	Оформлення роботи	Травень 2025	
9.	Здача роботи на кафедру	Травень 2025	

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи _____ Олександр ЛИСЕНКО
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2025 р.

Здобувач _____ Ярослав КОЛІСНІЧЕНКО
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ ВИКОНАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ	11
1.1. Аналіз похибок, що впливають на точність при обробці на металорізальних верстатах.....	11
1.2. Зниження точності обробки під впливом технологічної спадковості	16
1.3. Мінімізація негативних проявів технологічної спадковості в процесі обробки заготовок.....	22
1.4. Висновки	30
2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ.....	32
2.1. Динамічна модель пружної ТОС при точінні з урахування технологічної спадковості.....	32
2.2. Статична модель пружної ТОС при точінні.....	34
2.3. Метод представлення збурення у вигляді змінного припуску	39
2.4. Методика попереднього отримання технологічної спадковості за допомогою частотних характеристик ТОС	44
3. МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ	48
3.1. Мета і задачі моделювання	48
3.2. Створення моделі для вихідної системи.....	49
3.3. Моделювання процесу різання у замкненій ТОС.....	56
3.4. Моделювання і прогнозування технологічної спадковості	61
3.5. Методика призначення режимів різання за допомогою програми, що враховує технологічну спадковість.....	71

4. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ	76
4.1. Визначення річного економічного ефекту від застосування програмного модуля	77
4.2. Витрати на проведення технологічних розрахунків базовим методом....	79
4.3. Розрахунок разових капітальних витрат.....	81
4.5. Результати розрахунку економічної ефективності використання програмного модуля	85
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасне машинобудівне виробництво дедалі частіше орієнтується на виготовлення невеликих партій деталей, які відрізняються конструктивною оригінальністю та різноманітністю. За таких умов особливого значення набуває ефективне інструментальне забезпечення металорізальних верстатів і обробних центрів, яке має відповідати потребам такого виробництва. Одночасно виробничі системи повинні забезпечувати не лише підвищення інтенсивності процесів обробки, а й достатній рівень технологічної гнучкості, що дає змогу швидко адаптуватися до зміни номенклатури деталей виробництва.

Однією з актуальних проблем машинобудування є забезпечення необхідних показників якості оброблених поверхонь. Насамперед це стосується точності геометричних параметрів, стабільності форми та досягнення заданої якості (шорсткості) поверхні обробки. При цьому важливо, щоб підвищення якості обробки не супроводжувалося істотним зниженням продуктивності, оскільки сучасне виробництво потребує поєднання високої точності з економічною ефективністю технологічного процесу.

У реальних виробничих умовах під час оброблення деталей на металорізальних верстатах та обробних центрах виникають різні види похибок, які безпосередньо впливають на кінцеву точність виготовлення виробу. Важливу роль серед таких факторів відіграє стан заготовки після попередніх технологічних операцій, зокрема величина та нерівномірність залишкового припуску. Цей вплив пов'язаний із явищем технологічної спадковості, коли результати попередніх етапів обробки частково переносяться на наступні операції та визначають умови формування остаточної поверхні деталі.

Питання технологічної спадковості досліджувалося багатьма науковцями, зокрема в аспекті її впливу на точність, якість поверхневого шару та стабільність технологічного процесу. В окремих дослідженнях розглядалися підходи до керування цим явищем з метою зменшення негативного впливу попередніх

операцій на кінцевий результат обробки. Однак сучасний рівень розвитку машинобудування потребує подальшого вдосконалення методів компенсації технологічної спадковості та розроблення нових підходів до її мінімізації.

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є обґрунтований вибір раціональних режимів різання на відповідних операціях механічної обробки. Оптимальне поєднання швидкості різання, подачі, глибини різання та інших технологічних параметрів дає змогу зменшити вплив залишкових похибок попередніх переходів і забезпечити досягнення заданої точності та якості обробленої поверхні. Таким чином, керування режимами різання може розглядатися як один із ефективних засобів підвищення стабільності технологічного процесу та зниження проявів технологічної спадковості.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є підвищення якості токарної обробки за рахунок обґрунтованого вибору раціональних режимів різання ще на стадії проектування технологічної операції шляхом використання програмного забезпечення, яке дає змогу моделювати процес точіння з урахуванням впливу технологічної спадковості, зокрема відхилень форми заготовки, що сформувалися на попередніх етапах її виготовлення.

Для реалізації поставленої мети в роботі передбачається розв'язати такі основні завдання:

- проаналізувати сутність технологічної спадковості та розглянути загальні підходи до її врахування під час проектування операцій механічної обробки;
- сформувати статичну й динамічну моделі пружної технологічної обробної системи (ТОС) при виконанні токарної обробки;
- розробити методику та алгоритм визначення проявів технологічної спадковості форми деталі в поперечному перерізі залежно від поздовжньої координати заготовки;
- виконати теоретичне дослідження впливу спадкових відхилень форми заготовки на показники якості токарної обробки;

– розробити програмні засоби, що дають змогу прогнозувати, аналізувати й керувати впливом технологічної спадковості під час обробки.

Об'єкт дослідження – процес токарної обробки.

Предмет дослідження – вплив технологічно успадкованих відхилень форми заготовки на точність і якість поверхні деталі під час токарної обробки.

Елементи наукової новизни:

- запропоновано алгоритм визначення технологічної спадковості за частотними характеристиками ТОС;
- для прогнозування технологічної спадковості запропонована тримасова динамічна модель ТОС, замкнена через процес різання;
- отримана форма віртуальної деталі і моделюванням та доведено, що у залежності від способу установки деталі на верстаті, звичайні форми мають значне викривлення, яке залежить від режиму точіння, зокрема від швидкості різання.

Практичне значення: Розроблений метод і відповідний алгоритм визначення технологічної спадковості форми деталі у поперечному перерізі у функції повздовжньої координати, та прикладна програма, що моделює процес обробки. Проведене моделювання технологічної спадковості у поперечному перерізі деталі за повздовжньою координатою формоутворення довело, що в залежності від способу установки заготовки на верстаті, звичайні форми (бочкуватість при установці у патроні і задньому центрі, конусність – при установці у патроні) мають значне викривлення, яке залежить від режиму точіння, зокрема, швидкості різання.

Апробація результатів роботи.

За матеріалами роботи була зроблена доповідь та опубліковані тези (<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/59f204a0-e800-4e97-aeac-d2fa1fd7d2b5/content#page=101>) [32] на традиційний LVII науковій конференції здобувачів вищої освіти, яка відбулась у м. Кропивницький на базі Центральноукраїнського національного технічного університету 22-23 квітня 2026 року, присвяченої до "Дня науки-2026".

1. АНАЛІЗ ВИКОНАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

1.1. Аналіз похибок, що впливають на точність при обробці на металорізальних верстатах

До основних експлуатаційно-технологічних вимог, що висуваються до сучасних металорізальних верстатів, належать забезпечення необхідної точності обробки, формування поверхні із заданими якісними характеристиками та підтримання високої продуктивності виробничого процесу [25]. Саме тому важливим напрямом підвищення ефективності механічної обробки є виявлення, аналіз і зменшення похибок, які виникають під час виготовлення деталей на верстатному обладнанні та визначають рівень відповідності готового виробу заданим технічним вимогам [33].

Загальний процес механічної обробки деталей на металорізальних верстатах доцільно розглядати як послідовність трьох взаємопов'язаних етапів, що реалізуються у визначеному часовому порядку. Перший етап пов'язаний із установленням заготовки або деталі на базові поверхні верстата чи спеціального пристосування. На цьому етапі виконуються її базування із заданою точністю та подальше закріплення, яке має забезпечувати збереження досягнутого положення протягом усього періоду обробки.

Другий етап охоплює статичне налагодження технологічної обробної системи, тобто настроювання її розмірних і кінематичних ланцюгів без дії робочих навантажень. Сутність цього процесу полягає у встановленні різальних кромek інструменту в необхідне положення відносно баз верстата, пристосування або, в окремих випадках, відносно базових поверхонь самої оброблюваної деталі. Таке налагодження спрямоване на забезпечення початкової геометричної точності технологічної системи перед початком різання.

Третій етап пов'язаний із динамічним налагодженням тих самих розмірних і кінематичних ланцюгів технологічної обробної системи. На відміну від статичного настроювання, цей етап враховує вплив робочих навантажень, які виникають безпосередньо під час процесу різання. Саме в динамічних умовах проявляються пружні деформації елементів системи, зміщення інструменту та заготовки, а також інші фактори, що можуть впливати на фактичну точність обробки.

Виконання кожного з етапів обробки супроводжується появою певних похибок, пов'язаних із базуванням, закріпленням, статичним і динамічним налагодженням технологічної обробної системи. У результаті ці відхилення можуть проявлятися у вигляді неточності розмірів, порушення заданої геометричної форми та відхилення взаємного розташування поверхонь деталі [2, 12, 17]. У роботі [13] приведені дані про питомий вплив елементарних похибок (у % від загальної похибки Δ_{Σ}):

- позиціонування верстата – 5...10;
- жорсткість верстат, пристосування, інструмента – 15...20;
- розмірне спрацювання інструмента – 5...10;
- встановлення заготовки – 20...25;
- теплові деформації – 15...20;
- налагодження, підналагодження верстата – 10...15.

Отже, підвищення точності оброблюваної деталі потребує цілеспрямованого зменшення похибок, що виникають на кожному з трьох основних етапів технологічного процесу. Особливої уваги заслуговують похибки налагодження, оскільки в багатьох випадках саме вони становлять істотну частку в загальному балансі точності. У зв'язку з цим доцільним є аналіз наявних підходів і технічних рішень, спрямованих на зниження впливу таких похибок на кінцеві параметри виготовленої деталі [18].

Досвід машинобудівного виробництва свідчить, що реалізація будь-якого технологічного процесу супроводжується появою відхилень за різними показниками точності [24, 37]. Ці відхилення можуть проявлятися у зміні

розмірів, форми, взаємного розташування поверхонь, а також у погіршенні характеристик обробленої поверхні. Під час механічної обробки на металообробному обладнанні вони формуються під впливом сукупності різнорідних чинників, серед яких можуть бути як систематичні, так і випадкові складові. Їхня дія змінюється впродовж процесу обробки, що ускладнює прогнозування фактичної точності та потребує комплексного підходу до її забезпечення.

Технологічну обробну систему, до складу якої входять верстат, пристосування, заготовка та різальний інструмент, доцільно розглядати як пружну систему. Під час механічної обробки її елементи зазнають деформацій під дією сил різання, закріплення, інерційних і теплових впливів. Такі деформації можуть спричиняти появу як систематичних, так і випадкових похибок, що проявляються у відхиленнях розмірів і геометричної форми оброблюваних заготовок.

Водночас технологічна обробна система функціонує як замкнена динамічна система, чутлива до зовнішніх і внутрішніх збурень. У процесі різання в ній можуть виникати та підтримуватися коливання, які негативно впливають на стабільність формоутворення поверхні. Наслідком таких вібрацій є поява похибок форми, зокрема некруглості та хвилястості оброблених поверхонь, а також збільшення їхньої шорсткості [3, 6].

Під час обробки партії заготовок на попередньо налагодженому верстаті фактичні розміри отриманих деталей не залишаються абсолютно сталими. Вони змінюються в певному інтервалі, відрізняючись як між собою, так і від розміру, заданого під час налагодження обладнання. Такі відхилення зумовлюються дією випадкових похибок, які неможливо повністю передбачити до початку обробки [7].

Випадковою називають похибку, значення якої для окремих заготовок однієї партії є різним і не має чітко вираженої закономірності виникнення або зміни. Її особливість полягає в тому, що навіть за однакових умов обробки

результати можуть дещо відрізнятися, оскільки на процес формоутворення одночасно впливає значна кількість нестабільних чинників.

Наявність випадкових похибок призводить до розсіювання розмірів заготовок, оброблених за однаковою технологічною схемою та на одному й тому самому обладнанні. Таке розсіювання є наслідком сукупної дії багатьох причин випадкового характеру, які діють одночасно, незалежно одна від одної і не можуть бути точно визначені наперед. До таких чинників належать коливання твердості оброблюваного матеріалу, нерівномірність припуску, зміна фактичного положення заготовки у пристосуванні, похибки її базування та закріплення, а також неточності самого пристосування. Крім того, на формування випадкових відхилень впливають неточності встановлення супортів за упорами або лімбами, зміни температурного режиму обробки, нестабільність сил різання та пов'язані з цим пружні переміщення елементів технологічної системи.

Отже, до основних випадкових факторів, які впливають на точність обробки, можна віднести:

- нерівномірність або відхилення величини припуску на обробку;
- зміну фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу як між окремими деталями партії, так і в межах однієї заготовки;
- відмінності температурного стану деталей, що надходять на обробку;
- похибки базування, закріплення та встановлення заготовки у пристосуванні;
- нестабільність сил різання і пружних деформацій елементів технологічної обробної системи;
- інші випадкові чинники, що виникають у процесі роботи верстатного обладнання.

Систематичною похибкою вважають таке відхилення, яке для всіх заготовок однієї партії або зберігає сталість, або змінюється за певною закономірністю під час послідовної обробки деталей [32]. Іншими словами, на відміну від випадкових похибок, систематична складова має більш визначений

характер і може бути пов'язана з конкретними причинами, що діють у технологічній системі протягом певного часу.

Якщо величина похибки залишається практично незмінною для всієї партії заготовок, її відносять до постійних систематичних похибок. Таку похибку часто розглядають як похибку самої технологічної системи. У випадку, коли відхилення не є сталим, але змінюється за певним законом від однієї оброблюваної заготовки до наступної, його називають змінною систематичною, або функціональною, похибкою.

Основними причинами виникнення систематичних і змінних систематичних похибок під час механічної обробки є:

- неточність виготовлення, зношування та деформації елементів верстата, пристосувань і різального інструменту;
- пружні або залишкові деформації оброблюваних заготовок;
- теплові процеси, що відбуваються в елементах технологічної системи та в зоні дії змащувально-охолоджувальної рідини;
- недосконалість або умовність прийнятої теоретичної схеми обробки;
- інші чинники, пов'язані з конструктивними, технологічними та експлуатаційними особливостями обладнання.

У процесі експлуатації металорізальний верстат перебуває під постійною дією різних зовнішніх і внутрішніх чинників. Насамперед це стосується механічної та теплової енергії, які впливають на його вузли, механізми й несучі елементи. Такий вплив може спричиняти небажані процеси, що поступово або тимчасово змінюють вихідні характеристики обладнання, зокрема його точність, жорсткість, стабільність положення робочих органів і здатність забезпечувати задані параметри обробки.

Водночас не всі процеси, що виникають у верстаті під час роботи, мають незворотний характер. Частина з них є зворотною, тобто такою, що змінює параметри окремих деталей, вузлів або всієї системи лише в певних межах і не супроводжується стійкою тенденцією до прогресивного погіршення стану обладнання. Найтиповішим прикладом таких процесів є деформації деталей і

вузлів верстата, які виникають під дією силових навантажень або температурних полів і можуть частково або повністю зникати після припинення дії відповідного чинника.

Частотні характеристики першого роду передбачають зовнішній вплив на технологічну оброблювальну систему і процес різання у вигляді кінематичного збудження, що змінюється за гармонічним законом, а частотні характеристики другого роду – у вигляді зміни припуску за гармонічним законом [31]. Такий підхід закладає основи для математичного обґрунтування і прогнозування технологічної спадковості [38].

1.2. Зниження точності обробки під впливом технологічної спадковості

Питання забезпечення точності в машинобудуванні доцільно розглядати не лише з позиції геометричних відхилень, а й через аналіз фізичних причин, які можуть призводити до порушення працездатності виробів. У цьому контексті важливим є дослідження умов виникнення відмов, механізмів їх розвитку та наслідків, що впливають на якість і надійність деталей. Зміна властивостей виробів під час їх виготовлення, а також у процесі подальшої експлуатації значною мірою пояснюється явищем технологічної спадковості [9, 35].

Під технологічною спадковістю розуміють перенесення певних властивостей заготовки, матеріалу або поверхневого шару з попередніх технологічних операцій на наступні етапи обробки. Іншими словами, це здатність деталі частково зберігати ознаки, сформовані на ранніх стадіях технологічного процесу, і передавати їх далі в ході послідовного формоутворення. Таке трактування є достатньо широким, оскільки дає змогу пов'язати початковий стан матеріалу або заготовки з її подальшими змінами на всіх етапах перетворення у готову деталь.

Носіями технологічно успадкованої інформації виступають сам матеріал заготовки, його структура, фізико-механічні властивості, а також поверхні деталі з комплексом параметрів, що характеризують їхній стан. До таких параметрів можна віднести геометричні відхилення, шорсткість, залишкові напруження, стан

поверхневого шару, твердість та інші характеристики, сформовані під час попередніх операцій. У процесі виготовлення ці носії інформації послідовно проходять через різні технологічні впливи, внаслідок чого їхні властивості можуть змінюватися, послаблюватися, посилюватися або повністю усуватися.

Окремі операції технологічного процесу можуть зменшувати прояв технологічної спадковості або переривати передачу певних властивостей на наступні етапи обробки. Прикладом такого впливу є термічна обробка, яка здатна змінювати структуру матеріалу, знижувати залишкові напруження, стабілізувати властивості заготовки та частково усувати наслідки попередніх технологічних дій.

Наочним проявом впливу технологічної спадковості на точність механічної обробки є перенесення початкових геометричних похибок заготовки на оброблену поверхню деталі. У таких випадках відхилення, сформовані до початку остаточної обробки, можуть частково копіюватися в процесі різання та проявлятися у вигляді похибок форми готової деталі. Наприклад, початкова овальність, ексцентричність або інші відхилення форми заготовки можуть спричиняти відповідні похибки обробленої поверхні, якщо технологічна система та режими різання не забезпечують достатнього зменшення їхнього впливу.

Ступінь поопераційного копіювання визначається коефіцієнтом зменшення похибок:

$$k_{y.n.} = \frac{\Delta_{\partial_{n-1}}}{\Delta_{\partial_n}},$$

де $\Delta_{\partial_{n-1}}$ і Δ_{∂_n} – величини похибки, що розглядається (наприклад конусоподібності) відповідно на попередній і на операції, що виконується.

Якщо обробка деталей виконується в декілька операцій (переходів), то загальний коефіцієнт зменшення похибок $k_{y.n_{06}}$ є добуток $k_{y.n}$ окремих операцій:

$$k_{y.n_{06}} = k_{y.n_1} k_{y.n_2 \dots} k_{y.n_n},$$

В жорстких технологічних системах точність форми деталі поступово збільшується від чорнових до чистових операцій і від чистових до оздоблювальних. В таких системах $k_{y.n_{об}}$ буде дорівнювати

$$k_{y.n_{об}} = \frac{\Delta_3}{\Delta_{\partial 1}} \times \frac{\Delta_{\partial 1}}{\Delta_{\partial 2}}, \dots, \frac{\Delta_{\partial_{n-1}}}{\Delta_{\partial_n}}$$

$$\text{де } \Delta_{\partial_{n-1}} \geq \Delta_{\partial_n}.$$

В нежорстких системах при виконанні даної операції можливе повне копіювання похибок попередньої операції. В таких системах для досягнення потрібної точності форми необхідно, щоб точність на попередніх операціях була б не нижчою, ніж на наступних, і тоді передостанній член у формулі повинен бути $\Delta_{\partial_{n-1}} \leq \Delta_{\partial_n}$.

Процес копіювання геометричних похибок заготовки на деталь відбувається при будь-якому методі обробки різанням. Але в залежності від знаку жорсткості системи може мати місце пряме і зворотне копіювання похибок попередніх операцій [1, 10, 27 28].

При позитивній жорсткості системи похибка по попередньої операції копіюється на виконуємії операції зменшеною в кількість разів, що дорівнює коефіцієнту $k_{y.n}$. При цьому збільшенні похибки $\Delta_{\partial_{n-1}}$ буде відповідати і збільшенню розміру обробленої поверхні деталі в перерізі, що розглядається, тобто утворення випуклої ділянки. Таким чином, при даному виді жорсткості присутнє пряме копіювання похибок попередньої операції (заготовки) а-а на виконуємо б-б (рис. 1.1. а).

переконалися аналізуючи рис. 1.2. Характер відхилення форми розточуваного отвору значною мірою визначається кількістю затискних елементів, тобто кулачків затискного патрона. Під час закріплення заготовки в патроні сили затиску спричиняють її пружне деформування, а після обробки та зняття затискного зусилля ці деформації частково відновлюються, що призводить до появи похибок форми отвору. При цьому кількість характерних відхилень на поверхні отвору, як правило, відповідає кількості кулачків патрона.

У разі використання двокулачкового патрона на обробленому отворі може формуватися овальність, оскільки заготовка деформується переважно у двох протилежних напрямках. Якщо застосовується чотирикулачковий патрон, то на поверхні отвору можуть виникати чотири виражені хвилеподібні відхилення. Таким чином, схема закріплення заготовки безпосередньо впливає на характер технологічно успадкованої похибки форми. Сили закріплення викликають також відхилення форми. На рис. 1.2 показані 4 фази (I...IV) стану заготовки типу кільця, встановленого в трьохкулачковий патрон для розточування отвору. На першій фазі заготовка не деформована, на другій – і зовнішня, і внутрішня поверхні деформовані силами Q . Після розточування отвору (третя фаза) відхилень форми не спостерігається. Точності розміру і форми отвору можуть бути доволі високими. Зовнішня поверхня деформована. Після розкріплення кільця (четверта фаза) точність отвору порушена, а зовнішня поверхня відновила свою форму.

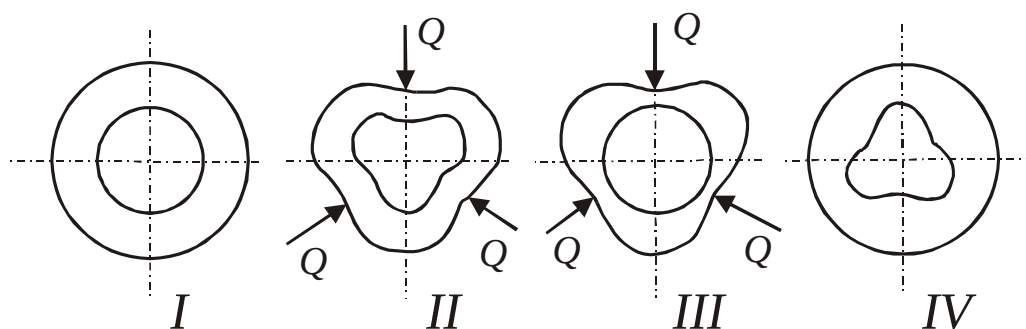


Рис. 1.2. Похибки форми, що викликані силами закріплення

Прояви технологічної спадковості можуть виникати не лише під час безпосереднього різання, а й на етапі базування заготовок. Це можна розглянути на прикладі токарної обробки заготовки, встановленої в центрах [19]. У процесі обробки на заготовку діє сила P (рис. 1.3, *а*), а роль технологічних баз виконують конічні поверхні B центрових отворів.

У зв'язку з особливостями виготовлення центрових отворів на їх поверхнях утворюється хвилястість. Частіше за все спостерігається дві, три або п'ять хвиль, що умовно показані на рис. 1.3, *б*. Коли центра не обертаються, а напрямок сили P є постійним, жорсткість системи „заготовка – центра” виявляється змінною. Тому і пружне переміщення заготовки також буде змінним.

На поверхні A , що підлягає обробці, формуються відхилення геометричної форми, схематично наведені на рис. 1.3, *в*. При цьому кількість характерних виступів і западин на обробленій поверхні відповідає кількості хвиль, наявних на технологічних базах. Отже, початкові похибки базових поверхонь можуть передаватися на оброблювану поверхню, тобто проявлятися у вигляді технологічно успадкованих відхилень.

Необхідність урахування технологічної спадковості визначається окремо для кожного конкретного технологічного процесу. Якщо успадкована властивість має малу величину і практично не впливає на функціональні характеристики деталі або машини, її дію можна не враховувати як суттєвий фактор формування якості. Якщо ж вплив такої властивості є значним і безпосередньо визначає показники точності, якості поверхні або експлуатаційної надійності, явище технологічної спадковості необхідно враховувати обов'язково.

У такому випадку оцінювання впливу технологічно успадкованих властивостей має здійснюватися на основі комплексного аналізу всього життєвого циклу виробу: від отримання матеріалу та виготовлення заготовки до виконання завершальних операцій обробки, складання готової машини й подальших умов її експлуатації.

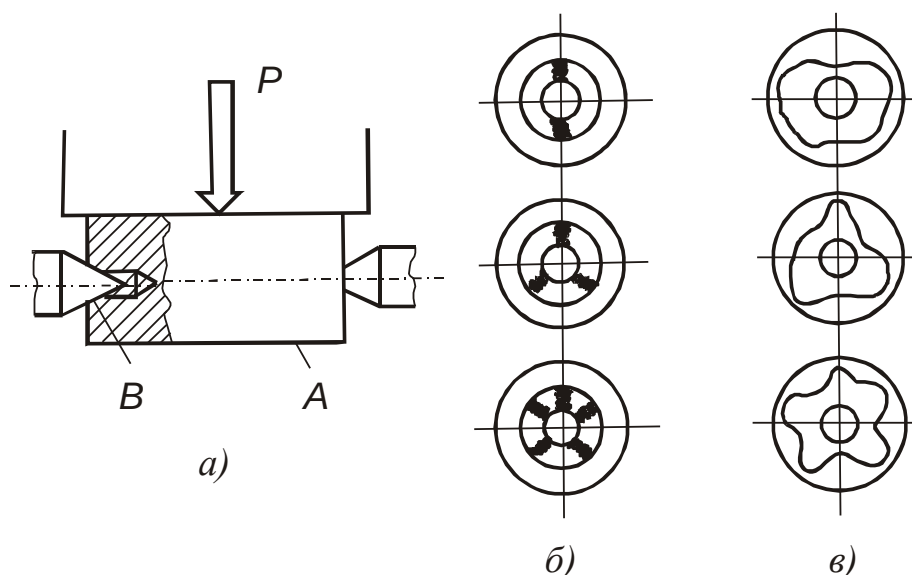


Рис. 1.3. Технологічна спадковість, що виникає внаслідок технологічних баз

Аналіз закономірностей формування та прояву технологічної спадковості дає можливість не лише оцінювати її вплив на якість обробки, а й певною мірою керувати цим процесом. Урахування таких закономірностей під час проектування технологічних операцій дозволяє обґрунтовано вибрати структуру технологічного процесу, визначати найбільш доцільні режими різання та прогнозувати їхній вплив на кінцеві показники точності й якості поверхні. Це забезпечує створення ефективних технологічних рішень, спрямованих на підвищення якості обробки деталей машин [25] і зменшення впливу похибок, успадкованих від попередніх операцій.

1.3. Мінімізація негативних проявів технологічної спадковості в процесі обробки заготовок

Технологічна спадковість впливає не лише на точність обробки, а й на формування якості поверхневого шару, від якої залежать експлуатаційні властивості деталей. Тому під час проектування технологічних процесів важливо прогнозувати не тільки геометричні параметри виробу, а й його майбутні властивості в умовах роботи. На практиці врахування технологічної спадковості найчастіше полягає у встановленні залежностей між методами попередньої

обробки, параметрами режимів різання та експлуатаційними характеристиками деталей. Такий підхід дозволяє оцінити вплив попередніх операцій на кінцевий стан виробу, однак потребує подальшого розвитку для більш точного керування якістю обробки.

Подібні залежності можуть бути встановлені і між методами попередньої і кінцевої обробки деталей. Наприклад, попередні методи (точіння і шліфування) можуть змінити величину зношування циліндричних поверхонь деталей із сталі 30 ХГСА після кінцевої обробки шліфуванням у 2 рази, після електромеханічної обробки у 1,9 рази і після накатки в 1,6 рази [41, 42]. Слід відмітити, що операції пластичного деформування (ППД) є значними перепонами для негативних властивостей технологічної спадковості (структурної неоднорідності, остаточної напружень розтягу, мікротріщин і т. п.). Однак ці частинні залежності мають обмежене застосування, так як не розкривають повністю фізичного сенсу технологічної спадковості. В роботі [4] розглядається питання про можливість управління технологічною спадковістю. Результати робіт показали, що кожний метод кінцевої обробки повинен виконуватися поряд тільки з визначеним методом попередньої обробки. Оптимальний вибір цих методів дозволяє зменшити шорсткість у 3,5 рази, збільшити радіус закруглення вершин нерівностей у 10 разів, підвищити мікротвердість поверхні у 1,9 рази, знизити величину зношування у 3,2 рази. Проте цей процес трудомісткий і вимагає дуже точного вибору методів попередньої обробки. Причому такий метод необхідно підбирати окремо для кожної деталі.

Намічені можливості управління технологічною спадковістю дозволяють більш обґрунтовано проектувати технологічні процеси, призначаючи кожного разу найбільш вигідне поєднання попередньої і кінцевої обробки. Положення технологічної спадковості дають підставу вважати, що для досягнення заданої точності, якості та продуктивності обробки необхідно розділяти технологічні процеси на ряд етапів (під етапом слід розуміти сукупність аналогічних, послідовно виконуваних операцій по обробці основних і другорядних поверхонь

деталей), суворо дотримуючись загальної для даного класу послідовності їх виконання [20]. Для деталей класу вали рекомендуються наступні етапи обробки:

1. – створення баз (відрізання, правка, розмітка, центрування);
2. – чорнова обробка основних поверхонь;
3. – чорнова обробка другорядних поверхонь;
4. – термічна обробка;
5. – розмітка, правка, створення чистових баз, слюсарна обробка;
6. – чистова обробка основних поверхонь;
7. – кінцева обробка основних поверхонь.

Очевидно не всякий процес обробки деталей буде містити всі вказані етапи. У практиці виготовлення ряду деталей мають місце випадки, коли об'єднуються два етапи в один, наприклад, поєднується чорнова і чистова обробки. Однак у всіх випадках послідовність обробки повинна відповідати приведеній схемі.

В ході механічної обробки різанням наслідуються більшість властивостей заготовок. Відхилення розмірів можуть бути враховані при налагодженні різальних інструментів. Часто відхилення від круглості у вигляді овальності повністю переносяться на готовий виріб і при низькій жорсткості системи проявляється частковий випадок наслідування – копіювання.

Для обґрунтованого врахування технологічної спадковості у процесі проектування технологічних операцій необхідно встановлювати не тільки характер її прояву, а й кількісні характеристики, що дають змогу оцінити ступінь впливу попередніх операцій на кінцеві показники якості деталі. Саме кількісні характеристики дозволяють визначити, наскільки великий вплив технологічного наслідування даної властивості на надійність роботи деталі у машині. Простіше за все для цього використовувати коефіцієнти технологічної спадковості k , які є простими дробами, у яких чисельник вказує на кількісне вираження визначеної величини до проведення операції, а знаменник – кількісне її вираження після проведення операції. Наприклад, значення $k_1 = 60/20 = 3$ показує, що відхилення від круглості до проведення операції дорівнювало 60 мкм, а вже після закінчення операції – 20 мкм. У випадку встановлення факту технологічної спадковості,

можна зв'язувати будь-які операції будь-які властивості технологічного процесу. Віднесемо значення k_2 до наслідування напруг в поверхневих шарах. Припустимо $k_2 = 4,2$. Це може означати, що спадкові напруги у заготовки були в 4,2 рази вищі, ніж у готової деталі.

Доцільність урахування технологічної спадковості необхідно визначати окремо для кожного конкретного технологічного процесу, виду деталі та умов її подальшої експлуатації. Якщо успадкована властивість має незначну величину і практично не впливає на функціональні характеристики деталі або працездатність машини, її можна не розглядати як суттєвий чинник формування якості.

Водночас у випадках, коли вплив технологічно успадкованої властивості є істотним і безпосередньо позначається на точності, якості поверхневого шару, надійності чи довговічності виробу, її необхідно обов'язково враховувати. У такій ситуації технологічну спадковість слід аналізувати не ізольовано в межах однієї операції, а в контексті всього технологічного маршруту виготовлення деталі.

Такий аналіз має охоплювати всі етапи формування властивостей виробу: від отримання матеріалу, виготовлення заготовки та виконання проміжних операцій до остаточної обробки, складання машини і подальшої експлуатації. Це дає змогу визначити джерела успадкованих відхилень, оцінити їхній вплив на кінцеві показники якості та обґрунтувати заходи щодо його зменшення.

У процесі послідовного виконання технологічних операцій від попередніх етапів обробки до наступних можуть переноситися як позитивні, так і негативні технологічно успадковані властивості, що по-різному впливають на формування якості готової деталі. Тому необхідно створювати такі технологічні процеси, при яких дія негативних властивостей ліквідовувалась би на початку процесу, а позитивних – розвивалася і підсилювалася в ході процесу. Отже, вплив негативних властивостей на кінцеві характеристики деталей, що оброблюються повинен бути або ліквідований, або, по меншій мірі, обмежений. Тому технологічною спадковістю слід управляти, призначаючи такі операції і режими обробки, котрі гарантували б отримання деталі з заздалегідь заданою точністю.

До заходів, спрямованих на запобігання формуванню негативних проявів технологічної спадковості під час обробки різанням, належать:

- термічні операції (наприклад, старіння, відпуск, віджиг, нормалізацію);
- підвищення жорсткості технологічної системи;
- виконання обробки при тепловому режимі системи, що встановився;
- багато прохідна обробка;
- застосування пружинних різців;
- зміна напрямку діючих на технологічну систему складових сили різання;
- застосування методів зміцнюючої технології.

Важливим бар'єром негативним властивостям технологічної спадковості являється жорсткість системи. При цьому слід мати на увазі, що жорсткість і коефіцієнт зменшення похибок зростають при режимі роботи верстата, що встановився. Точкові діаграми, отримані при розмірно-чистовому обточуванні дисків на верстаті 163 в невстановленому (крива 1) і тому, що встановився (крива 2) тепловому режимі після 3 годин безперервної роботи верстата, показані на рис. 1.4. [5]. В другому випадку похибка обробки зменшилась від 0,048 до 0,028 мм. Проте, якщо верстат буде працювати довгий час при встановленому тепловому режимі, наслідком може стати перегрівання виконавчих робочих органів і, в кінцевому підсумку їх руйнування.

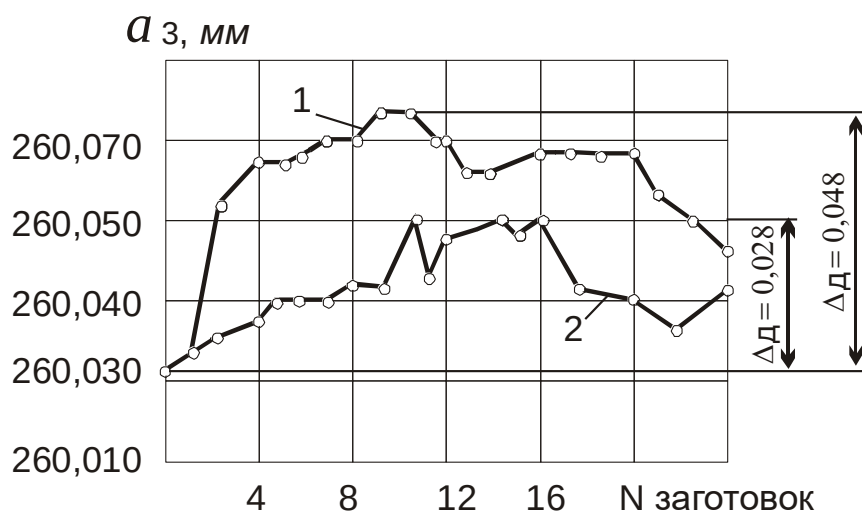


Рис. 1.4. Точкові діаграми обробки дисків на верстаті 163 при теплових режимах: що не встановився (крива 1); що встановився (крива 2).

Перешкоджає появі негативних властивостей технологічної спадковості (копіювання похибок) і обробка в декілька проходів. Для встановлення впливу на точність обробки числа робочих ходів i проведені експерименти різцями, що мали головні кути в плані φ – 15° , 90° , 55° і 50° (два останніх значення кута були оптимальними) [15]. Результати виконаних експериментів (рис. 1.5) показують, що при точінні заготовки з постійним припуском $z = 1$ мм, але з різними глибинами різання $t = 1.04$; 0.5 ; 0.25 ; 0.125 мм, точність підвищується зі збільшенням числа робочих ходів $i = 1, 2, 4, 8$. При цьому різці з вказаними головними кутами в плані забезпечують різну точність обробки при 1, 2, 3, і 4 проходах.

У цьому контексті необхідно враховувати, що поділ технологічної операції на кілька проходів, хоча й сприяє підвищенню точності за рахунок зменшення проявів технологічної спадковості, має певні економічні обмеження. Збільшення кількості проходів призводить до зростання тривалості обробки, зниження продуктивності та підвищення собівартості виготовлення деталі. Отже, застосування такого підходу не завжди є раціональним, особливо в умовах серійного виробництва, де важливими є мінімізація машинного часу та забезпечення економічної ефективності процесу.

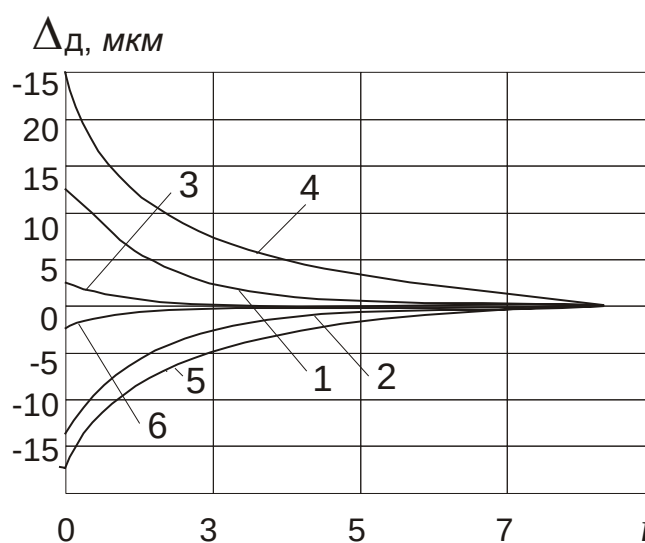


Рис. 1.5. Вплив головного кута в плані φ на кількість робочих ходів для досягнення високої точності.

Одним із засобів інтенсивнішого усунення початкових відхилень форми заготовки є використання пружинних різців, конструкція яких дає змогу частково компенсувати нерівномірність припуску та зменшувати вплив технологічно успадкованих похибок. Результати порівняльних експериментів по розмірно-чистовому обточуванню жорсткими (крива 1) і пружинними (крива 2) швидкорізальними широкими різцями представлені на рис. 1.6. Ці результати показують, що жорсткий широкий різець (крива 1) на значному діапазоні глибини різання „затягується” в оброблюємо поверхню і зменшує розмір валу, тобто має місце явище негативної жорсткості [15]. Пружинний же широкий різець (крива 2) на всіх глибинах різання, що застосовувались, забезпечує більш стабільну точність і шорсткість поверхні $Ra = 1,25 \div 0,1$ мкм (жорсткий різець забезпечує шорсткість поверхні $Ra = 5 \div 2,5$ мкм).

Водночас слід враховувати, що широкі пружинні різці мають вищу вартість порівняно зі звичайними токарними різцями. Тому їх застосування може призводити до збільшення витрат на механічну обробку деталей.

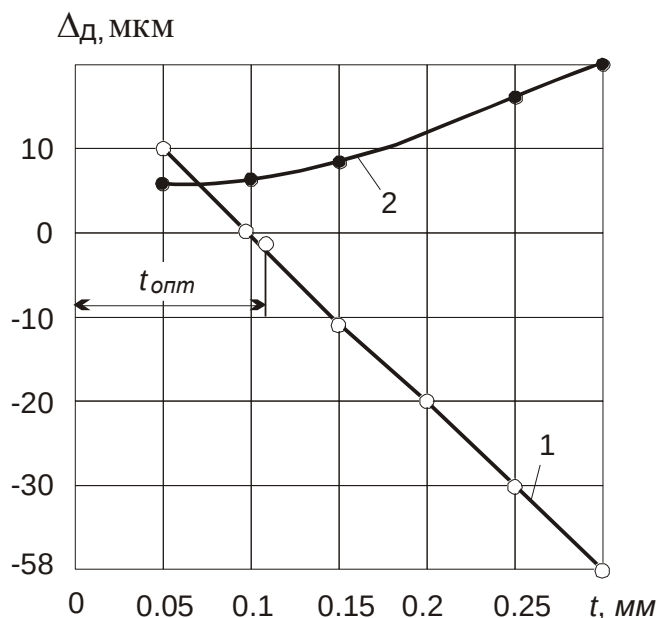


Рис. 1.6. Залежність похибки обробки від глибини різання при точінні широкими різцями.

Актуальність забезпечення точності механічної обробки зумовлена необхідністю стабільного отримання деталей із заданими геометричними параметрами та якістю поверхні. Для цього важливо не лише контролювати результати виготовлення після завершення операції, а й прогнозувати можливі відхилення ще на етапі проектування технологічного процесу. Такий підхід дає змогу своєчасно виявляти фактори, що впливають на якість деталей, і обґрунтовано коригувати умови їх обробки [12, 13].

В англomовних тематичних працях явище технологічної спадковості зазвичай не виділяється як окремий термін, однак його основні прояви розглядаються через поняття цілісності поверхневого шару, залишкових напружень, наклепу, впливу попередніх технологічних операцій, температурних і силових факторів обробки. Зокрема, у працях S. Kalpakjian, S. R. Schmid [44], M. P. Groover [43], J. T. Black та R. A. Kohser [39] розглядається вплив виробничих процесів на шорсткість, точність, залишкові напруження, мікроструктурний стан і експлуатаційні характеристики деталей. Що дозволяє підвести теоретичну основу для пояснення окремих механізмів технологічної спадковості.

У роботі [45] розглянуто, як попереднє точіння та зношування різальної пластини впливають на початкову шорсткість, мікротвердість і стабільність подальшої обробки.

Наступна робота [40] розглядає вплив попередніх технологічних етапів на твердість, мікроструктуру, залишкові напруження та стан поверхневого шару сталі AISI 4140. Матеріали, викладені у роботі доводять те, що властивості, сформовані на попередніх операціях, зберігаються або трансформуються на наступних етапах технологічного процесу.

Стаття [41] є фундаментальною роботою, що описує концепцію Process Signatures, близьку до поняття технологічної спадковості. Автори пропонують підхід, за яким зміни стану матеріалу після обробки пов'язуються не лише з режимами різання, а з внутрішніми термомеханічними навантаженнями, що формують властивості поверхневого шару.

Робота [42] є продовженням розвитку концепції Process Signatures. У статті підкреслюється, що для прогнозування властивостей поверхневого шару важливо враховувати не тільки параметри обробки, а й реакцію матеріалу на внутрішні навантаження в процесі виготовлення.

Таким чином, у сучасних закордонних дослідженнях явище технологічної спадковості розглядається переважно через поняття впливу попередніх технологічних операцій, цілісності поверхневого шару та процесних сигнатур. Зокрема, показано, що попереднє точіння, термічна обробка, зміцнювальні операції та інші етапи технологічного ланцюга можуть суттєво змінювати шорсткість, мікротвердість, залишкові напруження, мікроструктуру й подальші експлуатаційні властивості деталей.

1.4. Висновки

Проведений аналіз свідчить, що на сучасному етапі розвитку машинобудування особливої актуальності набуває розроблення нових підходів до керування проявами технологічної спадковості. Такі підходи мають забезпечувати можливість попереднього моделювання процесу механічної обробки, оцінювання впливу успадкованих похибок і вибору раціональних режимів різання ще на стадії проектування технологічної операції.

За результатами огляду відомих способів зменшення впливу технологічної спадковості можна сформулювати такі висновки:

- поділ технологічної операції на кілька послідовних проходів дійсно може сприяти підвищенню точності за рахунок часткового усунення успадкованих похибок. Однак цей підхід супроводжується збільшенням тривалості обробки, зниженням продуктивності та зростанням собівартості виготовлення деталі, що обмежує його економічну доцільність;

- застосування широких пружинних різців дає змогу інтенсивніше зменшувати початкові відхилення форми заготовки, проте такі інструменти є

дорожчими порівняно зі стандартними токарними різцями. Унаслідок цього їх використання підвищує витрати на виконання технологічної операції;

- урахування технологічної спадковості під час обробки конкретної партії деталей часто потребує складних розрахунків, проведення додаткових досліджень і значних витрат часу. Це ускладнює оперативне застосування таких підходів у реальних виробничих умовах, особливо за необхідності швидкого проектування або коригування технологічного процесу.

Метою роботи є підвищення якості токарної обробки за рахунок обґрунтованого вибору раціональних режимів різання ще на стадії проектування технологічної операції шляхом використання програмного забезпечення, яке дає змогу моделювати процес точіння з урахуванням впливу технологічної спадковості, зокрема відхилень форми заготовки, що сформувалися на попередніх етапах її виготовлення.

Для реалізації поставленої мети в роботі передбачається розв'язати такі основні завдання:

- проаналізувати сутність технологічної спадковості та розглянути загальні підходи до її врахування під час проектування операцій механічної обробки;
- сформулювати статичну й динамічну моделі пружної технологічної обробної системи (ТОС) при виконанні токарної обробки;
- розробити методику та алгоритм визначення проявів технологічної спадковості форми деталі в поперечному перерізі залежно від поздовжньої координати заготовки;
- виконати теоретичне дослідження впливу спадкових відхилень форми заготовки на показники якості токарної обробки;
- розробити програмні засоби, що дають змогу прогнозувати, аналізувати й керувати впливом технологічної спадковості під час обробки.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ В ПРОЦЕСІ ОБРОБКИ

2.1. Динамічна модель пружної ТОС при точінні з урахування технологічної спадковості

Показники оцінки якості верстата, за розробленими методиками [23, 26, 28], де верстат розглядається як окрема механічна система, не ураховують саме процес різання, в наслідок якого і утворюється деталь. У той же час відомо, що всі вихідні характеристики якості металорізальних верстатів залежать не тільки від верстата, а всієї технологічної оброблювальної системи (ТОС) до якої входять інструмент, заготовка, пристрій, режим різання тощо.

Експериментально-розрахункові дослідження [29] підтверджують, що взаємне положення різального інструменту та оброблюваної деталі, яке безпосередньо визначає процес формоутворення, значною мірою залежить від динамічних чинників, що виникають у технологічній обробній системі під час різання. Особливо суттєвим цей вплив стає за умов обробки заготовок із нерівномірним припуском, а також під час виконання спеціальних різновидів токарної обробки. До таких процесів, зокрема, належить токарно-копіювальна обробка, за якої технологічна обробна система постійно перебуває під дією періодичних збурень. Одним із прикладів таких збурень є зміна глибини припуску в поперечному перерізі заготовки.

Отже, для підвищення достовірності прогнозування точності виготовлення деталей необхідно враховувати динамічні властивості технологічної обробної системи безпосередньо в процесі обробки. Саме ці характеристики визначають характер пружних деформацій елементів системи вздовж довжини обробки та впливають на формування загальної технологічної спадковості в поперечному перерізі деталі.

Наявність надійної математичної моделі процесу точіння дозволяє розв'язати проблему прогнозування можливої технологічної спадковості форми заготовки і управляти нею. Складанню будь-якої моделі механічної системи передуює розробка її статичної моделі. Причому, для розв'язання поставленої задачі, така статична модель повинна відображати залежності параметрів пружної системи від координат змінного під час обробки формоутворюючого руху [16].

З огляду на те, що пружні деформації за координатою X мають незначний вплив на прояв технологічної спадковості форми в поперечному перерізі деталі, у першому наближенні їх можна не враховувати. За таких умов технологічна обробна система токарного верстата може бути представлена спрощеною одномасовою моделлю, у якій основними розрахунковими напрямками є координати Y і Z . Деформації саме за цими координатами найбільшою мірою визначають фактичне взаємне положення інструменту та заготовки, а отже, безпосередньо впливають на точність формоутворення обробленої поверхні (рис. 2.1).

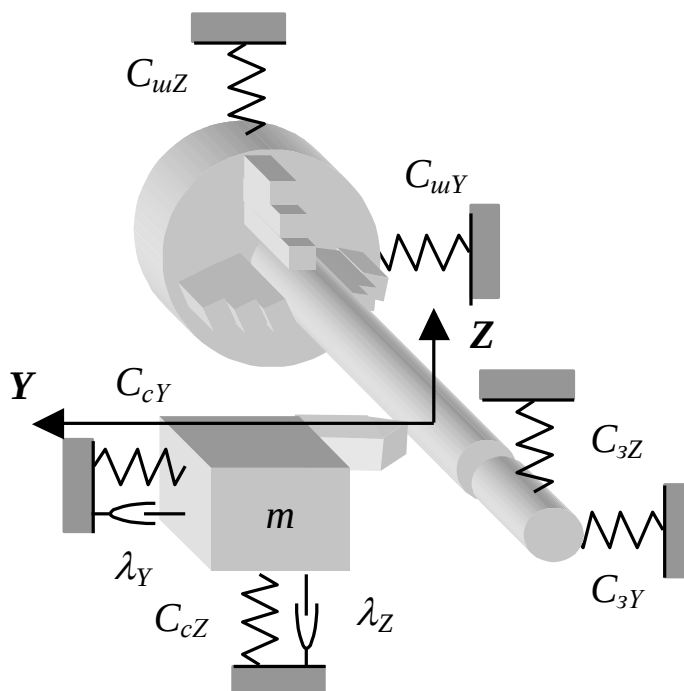


Рис. 2.1. Узагальнена динамічна модель токарної обробки

Отже, технологічна спадковість, яка впливає на точність виготовлення деталі, визначається не лише частотними характеристиками верстата. Важливе значення мають також параметри технологічної обробної системи, що змінюються залежно від положення інструменту за координатою формоутворювального руху вздовж заготовки. Тобто під час обробки необхідно враховувати не тільки загальні динамічні властивості верстата, а й зміну характеристик системи в різних ділянках довжини оброблюваної поверхні.

Особливо актуальним це стає при збільшенні швидкості різання. За таких умов можна очікувати посилення впливу динамічних характеристик, які змінюються вздовж координати поздовжньої подачі, на прояв технологічної спадковості. Це означає, що при високошвидкісній або інтенсивній обробці навіть незначні зміни жорсткості, демпфування чи інерційних властивостей елементів технологічної системи можуть суттєвіше позначатися на точності формоутворення.

У зв'язку з цим первинна узагальнена модель, наведена на рис. 2.1, потребує подальшого розвитку й уточнення. Зокрема, її доцільно деталізувати шляхом переходу до тримасової моделі з урахуванням положень, розроблених у другому розділі. Такий підхід дає змогу глибше проаналізувати вплив основних елементів динамічної системи токарного верстата на формування технологічно успадкованих похибок.

Визначення реакції ТОС на ці збурення на етапі проектування технологічної операції є важливим завданням, розв'язання якого допоможе правильно розрахувати так звану технологічну спадковість, оцінити динамічні властивості ТОС, верстату, правильно визначити режим різання.

2.2. Статична модель пружної ТОС при точінні

У першому наближенні технологічну обробну систему токарного верстата можна подати у вигляді одномасової динамічної системи, що розглядається за координатами Y і Z . Саме пружні переміщення в цих напрямках найбільш істотно

впливають на точність формоутворення оброблюваної поверхні (рис. 2.1). Відповідно до прийнятої розрахункової схеми, динамічні властивості ТОС характеризуються приведеними жорсткостями C_y і C_z , приведеною масою m , а також коефіцієнтами в'язкого тертя λ_y і λ_z .

Для врахування впливу формоутворювальної координати на прояв технологічної спадковості необхідно побудувати динамічну модель, приведену до вершини різця. У такій моделі параметри жорсткості мають розглядатися не як сталі величини, а як функції поздовжньої координати заготовки.

Під час точіння інструмент переміщується вздовж оброблюваної поверхні, тобто змінюється поточна координата x . Унаслідок цього приведені жорсткості C_y і C_z не залишаються незмінними протягом усього процесу обробки. Їх доцільно визначати як функції координати x з урахуванням жорсткості самої деталі, яка залежить від схеми її встановлення, геометричних параметрів і положення зони різання.

У токарній обробці найчастіше застосовують дві основні схеми встановлення заготовки: закріплення у патроні та встановлення у патроні з додатковою підтримкою заднім центром. Надалі ці варіанти закріплення доцільно розглянути послідовно, оскільки кожен із них по-різному впливає на жорсткість технологічної системи та, відповідно, на формування похибок обробки.

1. Встановлення у патроні.

При уявленні деталі абсолютно жорсткою отримуємо схему пружної системи при установці її у патроні (рис. 2.2). Податливість такої пружної системи можна розрахувати за залежністю:

$$j_1 = \frac{1}{C_{\emptyset Y}} + \frac{1}{C_{\tilde{n}Y}} = \frac{C_{\tilde{n}Y} + C_{\emptyset Y}}{C_{\tilde{n}Y}C_{\emptyset Y}}.$$

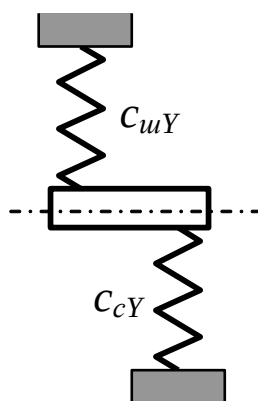


Рис. 2.2. Розрахункова схема при установці деталі у патроні

Додаємо до такої системи податливість деталі, що розраховується за формулою консольно закріпленого стрижня $j_d = x^3/3EJ$ і після виконання нескладних математичних перетворень одержуємо вираз для податливості пружної технологічної обробної системи за координатою Y у точці обробки, положення якої визначається координатою x :

$$j_{\Sigma Y} = j_1 + j_d = \frac{c_{\tilde{n}Y} + c_{\emptyset Y}}{c_{\tilde{n}Y}c_{\emptyset Y}} + \frac{x^3}{3EJ} = \frac{3EJ(c_{\tilde{n}Y} + c_{\emptyset Y}) + c_{\tilde{n}Y}c_{\emptyset Y}x^3}{3EJc_{\tilde{n}Y}c_{\emptyset Y}}.$$

В результаті загальна жорсткість ТОС, яка визначається за координатою Y у функції від поточної координати x :

$$c_{\Sigma Y}(x) = \frac{1}{j_{\Sigma Y}} = \frac{3EJc_{\emptyset Y}c_{\tilde{n}Y}}{3EJ(c_{\emptyset Y} + c_{\tilde{n}Y}) + c_{\emptyset Y}c_{\tilde{n}Y}x^3}. \quad (2.1)$$

де E – значення модуля пружності для матеріалу заготовки;

$J = \pi d_c^4/64$ – значення моменту інерції заготовки (d_c – величина середнього діаметру заготовки);

x – величина текучої координати визначення, $0 < x \leq \ell_{\ddot{a}}$;

$\ell_{\ddot{a}}$ – значення довжини заготовки; інші позначення, наведені на схемі

рис.2.1.

2. Встановлення заготовки у патроні та задньому центрі

Використовуємо такий же підхід та представляємо деталь абсолютно жорсткою, а супорт поки що не розглядаємо. Отримуємо пружну систему за рис. 2.3.

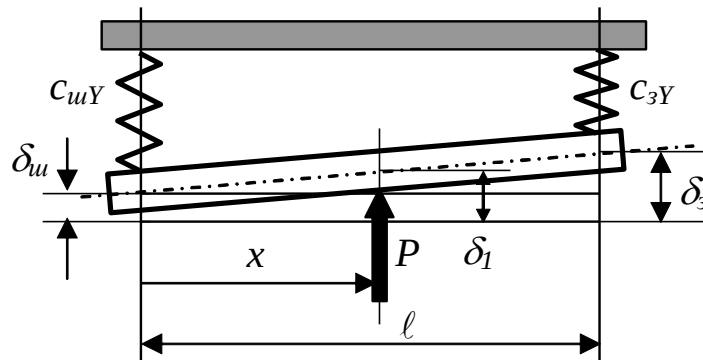


Рис. 2.3. Пружна система при установці деталі у патроні і задньому центрі

Значення сили P , що викликає реакції опор:

$$P_{\emptyset} = \frac{P(\ell - x)}{\ell}, \quad P_{\zeta} = \frac{Px}{\ell}. \quad (2.2)$$

Отже, деформації опор:

$$\delta_{\emptyset} = P_{\emptyset} / c_{\emptyset}, \quad \delta_{\zeta} = P_{\zeta} / c_{\zeta}. \quad (2.3)$$

З геометричних співвідношень за рис. 2.3 маємо:

$$\delta_1 = \delta_{\emptyset} + (\delta_{\zeta} - \delta_{\emptyset})x / \ell. \quad (2.4)$$

Після підстановки у (2.4) спочатку формул для деформацій (2.3), а потім – для реакцій опор (2.2) і простих алгебраїчних перетворень, отримуємо для точки координати x залежність деформації δ_1 системи:

$$\delta_1 = \frac{P_\emptyset}{c_\emptyset} \left(1 - \frac{x}{\ell}\right) + \frac{P_\zeta x}{c_\zeta \ell} = \frac{P(\ell - x)^2}{c_\emptyset \ell^2} + \frac{Px^2}{c_\zeta \ell^2}.$$

Тепер можна знайти жорсткість всієї системи за рис 2.3 у функції координати x :

$$c_1 = \frac{P}{\delta_1} = \frac{c_\emptyset c_\zeta \ell^2}{c_\emptyset x^2 + c_\zeta (\ell - x)^2}.$$

Податливість системи з урахуванням супорту знайдемо за методикою, що була застосована для випадку закріплення деталі у патроні:

$$j_2 = \frac{1}{c_c} + \frac{1}{c_1} = \frac{c_\emptyset c_\zeta \ell^2 + c_c c_\zeta (\ell - x)^2 + c_\emptyset c_c x^2}{c_c c_\emptyset c_\zeta \ell^2}.$$

Додаємо до цієї системи податливість деталі, що розраховується за формулою для стрижня, який закріплений на двох опорах

$$j_{\ddot{a}} = \frac{x^2 (\ell - x)^2}{3EJ\ell}$$

та отримуємо залежність у функції значення координати x податливості ТОС:

$$j_\Sigma = j_2 + j_{\ddot{a}} = \frac{c_c c_\emptyset c_\zeta \ell x^2 (\ell - x)^2 + c_\emptyset c_\zeta \ell^2 3EJ + c_c c_\zeta (\ell - x)^2 3EJ + c_\emptyset c_c x^2 3EJ}{3EJ c_c c_\emptyset c_\zeta \ell^2}.$$

Приведену жорсткість з наведеної залежності розраховують як величину, значення якої зворотне податливості:

$$C_y = \frac{\ell_{\ddot{a}}^2 C_{\emptyset Y} C_{\tilde{n}Y} C_{\zeta Y} 3EJ}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}, \quad (2.5)$$

$$\text{де } a_1 = (\ell_{\delta} - x)^2 C_{cY} C_{zY} 3EJ;$$

$$a_2 = x^2 C_{wy} C_{cy} 3EJ;$$

$$a_3 = \ell_{\delta}^2 C_{wy} C_{zy} 3EJ;$$

$$a_4 = x^2 (\ell_{\delta} - x)^2 \ell_{\delta} C_{wy} C_{cy} C_{zy}$$

Приведену жорсткість технологічної обробної системи за координатою Z можна визначити за аналогічними залежностями. При цьому у формулах (2.1) і (2.5) необхідно замінити індекси відповідних жорсткостей, що характеризують пружні властивості системи в напрямі координати Z .

Деформація пружної системи за координатою Y безпосередньо змінює фактичну глибину різання, оскільки впливає на положення вершини різального інструменту відносно оброблюваної поверхні. Водночас вплив переміщення δ_z за координатою Z може бути оцінений за залежністю (2.3), яка враховує зміну геометричних умов формоутворення.

Математична модель процесу різання формується відповідно до прийнятої методики з урахуванням того, що пружна технологічна обробна система є замкненою. Це означає, що сили різання, пружні переміщення елементів системи та фактичні параметри зрізуваного шару взаємопов'язані й повинні розглядатися як єдина взаємодіюча система.

2.3. Метод представлення збурення у вигляді змінного припуску

При точінні заготовок, що мають круглі поверхні форма заготовки у поперечному перерізі завжди відрізняється від ідеального циліндра з віссю, що співпадає з віссю обертання шпинделя верстата. Найбільш часто зустрічається

випадок ексцентричного розташування припуску внаслідок неспівпадіння вісі обертання шпинделя верстата і вісі циліндричної заготовки (рис. 2.4).

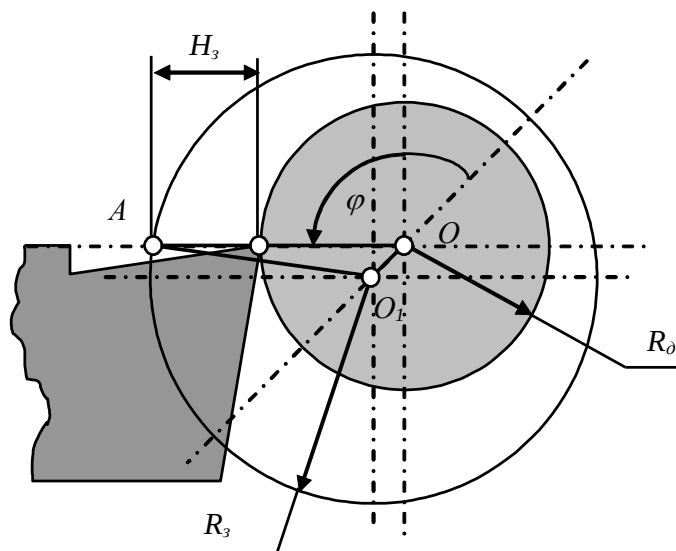


Рис. 2.4. Схема визначення залежності глибини різання від кута повороту

Таке неспівпадіння визначається ексцентриситетом $e = OO_1$. Величина заданого припуску (заданої глибини різання), як функція полярного кута φ визначається з трикутника OO_1A . За теоремою косинусів маємо:

$$\hat{I}_1 \hat{A}^2 = \hat{I} \hat{A}^2 + \hat{I} \hat{I}_1 - 2 \cdot \hat{I} \hat{A} \cdot \hat{I} \hat{I}_1 \cdot \cos(\pi - \varphi). \quad (2.6)$$

Згідно до позначень, наведених на рис. 2.4 перепишемо залежність (2.6) у вигляді:

$$R_{\zeta}^2 = \hat{I} \hat{A}^2 + e^2 + 2 \cdot \hat{I} \hat{A} \cdot e \cdot \cos(\varphi).$$

У цьому рівнянні одна невідома величина – OA , яку можна знайти з квадратного рівняння:

$$\hat{I} \hat{A}^2 + 2 \cdot \hat{I} \hat{A} \cdot e \cdot \cos(\varphi) + e^2 - R_{\zeta}^2 = 0.$$

Розв'язання цього рівняння дає:

$$\hat{I}\dot{A} = -e \cos(\varphi) \pm \sqrt{e^2 \cos^2(\varphi) - e^2 + R_{\zeta}^2}.$$

Оскільки, із схеми за рис. 2.4, $H_z = OA - R_o$, отримуємо вираз для визначення залежності глибини різання від кута повороту шпинделя верстату, відкидаючи знак мінус перед коренем:

$$H_{\zeta}(\varphi) = \sqrt{R_{\zeta}^2 - e^2 \sin^2(\varphi)} - R_{\ddot{a}} - e \cos(\varphi). \quad (2.7)$$

При точінні $\varphi = \omega t$ і таким чином з (2.7) отримуємо періодичну функцію залежності заданої глибини різання від геометричних параметрів ТОС, яка визначає силове періодичне збурення з періодом $T = 2\pi/\omega$:

$$H_{\zeta}(\omega t) = \sqrt{R_{\zeta}^2 - e^2 \sin^2(\omega t)} - R_{\ddot{a}} - e \cos(\omega t). \quad (2.8)$$

Як показує аналіз залежності (2.8), функція $H_z(\omega t)$ є періодичною і парною, тому у розкладі у ряд Фур'є відсутні складові з синусом, а спектр амплітуд перетворення Фур'є є дискретним:

$$H_{\zeta}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_0 n t), \quad (2.9)$$

де $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f_0$,

$n = 1, 2, 3 \dots$ – номери гармонік.

Коефіцієнти розкладу обчислюються за формулами :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} H_{\zeta}(t) \cos(\omega_0 n t) dt, \quad (2.10)$$

де $n = 0, 1, 2 \dots$ – номери коефіцієнтів.

Після підстановки у (2.10) залежності (2.8) і нескладних математичних перетворювань отримуємо вираз для визначення коефіцієнтів розкладу Фур'є:

$$a_n = \frac{R_{\zeta}}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(n\varphi) \sqrt{1 - m^2 \sin^2(n\varphi)} d\varphi - \frac{e}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2(n\varphi) d\varphi - \frac{R_{\ddot{a}}}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(n\varphi) d\varphi, \quad (2.11)$$

де $m^2 = e^2/R_{\zeta}^2$.

При визначенні коефіцієнта з нульовим індексом перша складова виразу (2.11) перетворюється на еліптичний інтеграл Лежандра другого роду, оскільки $\cos(0\varphi) = 1$. Такий інтеграл не має аналітичного розв'язку і тому для розрахунку коефіцієнтів доцільно використовувати чисельні методи інтегрування на ЕОМ.

Використовуючи наведену вище методику, можна представити будь-яке збурення у вигляді зміни припуску за допомогою розкладу у ряд Фур'є [14]. Тут йдеться про такі форми поперечного перерізу заготовки, яка саме і визначає змінне збурення, котрі можуть бути представлені аналітичною залежністю, наприклад, поперечний переріз у вигляді овалу, багатогранного профілю з округленнями тощо.

Коли форму заготовки не можна представити таким способом, необхідно діяти чисельним методом, визначаючи масив даних залежності глибини різання від кута повороту з деяким кроком, а потім розкласти таку функцію у ряд Фур'є чисельними методами, наприклад, за допомогою спеціальної прикладної

програми, розробленої у Галузевій лабораторії віртуальних засобів навчання (створену при кафедрі ТМ НТУУ "КПІ").

Для використання прикладної програми спочатку необхідно підготувати графічний файл (у форматі .bmp), на якому зображений графік зміни глибини різання при заданому розташуванні припуску. Такий файл можна легко отримати розрахунком у будь-якому програмному середовищі і використанні стандартної програми Paint. Для підвищення точності визначення ряду Фур'є графік повинен охоплювати найбільш можливу площу графічного вікна програми. Після завантаження файлу діяти у відповідності до інструкцій програми.

На рис. 2.5, а представлений спектр глибини різання при ексцентричному розташуванні припуску з ексцентриситетом 0,5 мм, а на рис. 2.5, б – з овальним розташуванням припуску (овальність заготовки 0,5 мм). Видно, що у першому випадку можуть бути прийняті у якості вагомих перші дві гармоніки: перша з частотою ω_0 і амплітудою $-0,500$ мм та друга з частотою $2\omega_0$ і амплітудою $+0,018$ мм. Іншими гармоніками можна знехтувати. При овальному розташуванні припуску значущими є також дві гармоніки: друга з частотою $2\omega_0$ і амплітудою $+0,500$ мм та четверта з частотою $4\omega_0$ і амплітудою $+0,040$ мм.

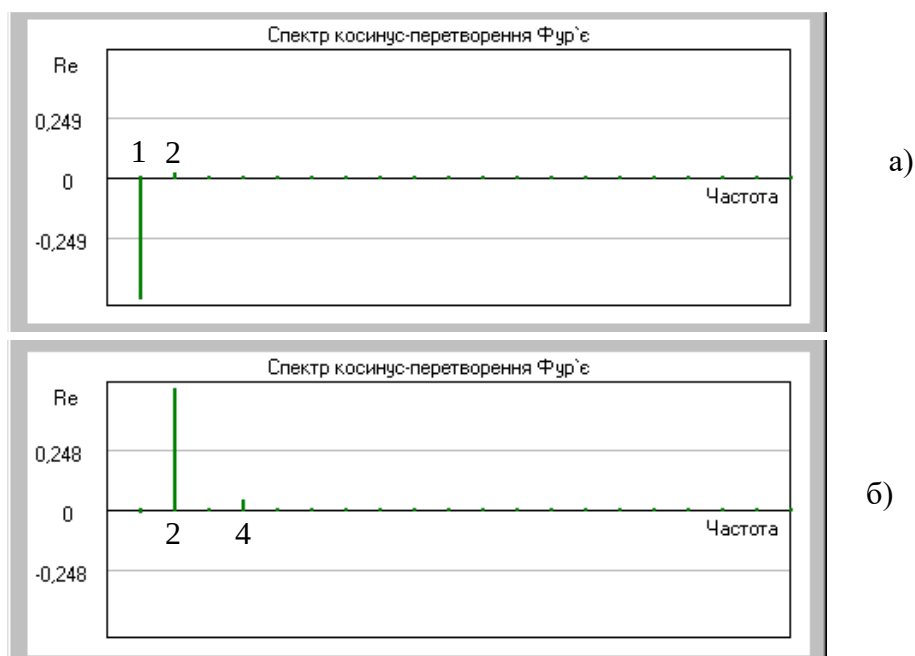


Рис. 2.5. Спектр функції глибини різання:
а) – при ексцентриковому,
б) – при овальному розташуванні припуску

У всіх розглянутих випадках йдеться про детерміновану форму заготовки, яка на практиці обов'язково має випадкові відхилення. У такому разі детерміноване подання принаймні повинно відповідати математичному очікуванню значення функції форми для кожного значення полярного кута повороту.

2.4. Методика попереднього отримання технологічної спадковості за допомогою частотних характеристик ТОС

Зміна припуску у поперечному перетині заготовки, яка у загальному випадку може бути обумовлена або похибкою форми заготовки, або похибкою установки на верстаті, а частіше за все спільною дією таких похибок, викликає появу збурення у ТОС при різанні. Причому таке збурення належить до швидкоплинних, оскільки змінюється у часі відповідно до швидкості різання.

Для встановлення впливу зміни припуску на технологічну спадковість, що безпосередньо пов'язана з формуванням похибки форми деталі, доцільно застосувати запропонований алгоритм розрахунку. Послідовність його виконання подано у вигляді схеми на рис. 2.6.

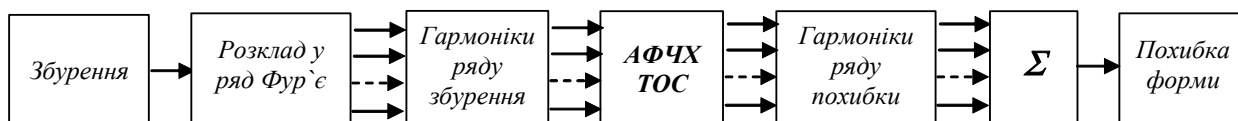


Рис. 2.6. Алгоритм для отримання технологічної спадковості

Згідно алгоритму, наявне збурення у вигляді змінного за кутом повороту припуску повинно бути представлене, як сума гармонік, що отримані за методикою, викладеною у підрозділі 2.2. Надалі кожна гармонічна складова збурення, отримана в результаті розкладання у ряд Фур'є, перетворюється на відповідну гармоніку похибки, тобто складову технологічної спадковості. Це перетворення відбувається через частотну передаточну функцію технологічної обробної системи, яка має бути подана у вигляді амплітудно-фазової частотної

характеристики системи. В даному випадку необхідно використовувати АФЧХ другого роду, тобто такі, що відображають реакцію ТОС при точінні на змінний припуск. Таким чином, за координатними осями – безрозмірна величина, що дорівнює відношенню пружної деформації ТОС до фактичної глибини різання.

Оскільки технологічна спадковість, яка впливає на точність виготовлення деталі, визначається не лише частотними характеристиками верстата, а й параметрами технологічної обробної системи, що змінюються вздовж координати x формоутворювального руху, її прогнозування має враховувати просторову змінність динамічних властивостей системи. Для цього необхідно визначати не одну узагальнену частотну характеристику, а відповідну сукупність частотних характеристик, побудованих для різних положень інструменту вздовж довжини заготовки (рис. 2.7).

Для вирішення цього завдання необхідно отримати частотні характеристики ТОС, які, як правило, визначаються у вигляді амплітудно-фазової частотної характеристики. Найбільш достовірні дані отримують в результаті експериментальних досліджень частотних характеристик системи ТОС при точінні. При цьому розрізняють частотні характеристики першого та другого роду. Частотні характеристики першого роду одержують при завданні інструменту і заготовці взаємовідносних коливань (тобто від кінематичного збурення), а частотні характеристики другого роду – при точінні заготовки спеціально спрофільованої для завдання силового збурення.

Оскільки, як було зазначено вище, переважна більшість видів токарної обробки супроводжується силовим збуренням від змінного припуску, розглянемо саме його вплив на ТОС, який залежить від частотних характеристик другого роду.

Таким чином, для оцінювання технологічно успадкованих відхилень форми деталі в поперечному перерізі як функції поздовжньої координати заготовки запропоновано відповідний розрахунковий алгоритм.

Після розкладу у ряд Фур'є функції збурення за допомогою припуску та виділення головних гармонік, за порівнянням їх амплітуди з точністю обробки, що досягається на токарному верстаті (тобто гармоніки з незначними амплітудами відкидаються), треба провести відповідні розрахунки з

використанням побудованих АФЧХ. Відповідно до частоти першої гармоніки на графіку АФЧХ будь-якого перетину знаходиться ця точка і початок координат з'єднується радіус-вектором з такою точкою. Величина радіус-вектора визначає значення амплітудно-частотної характеристики, а кут від напрямку вісі дійсних чисел до радіус-вектора – значення фазово-частотної характеристики для такої частоти.

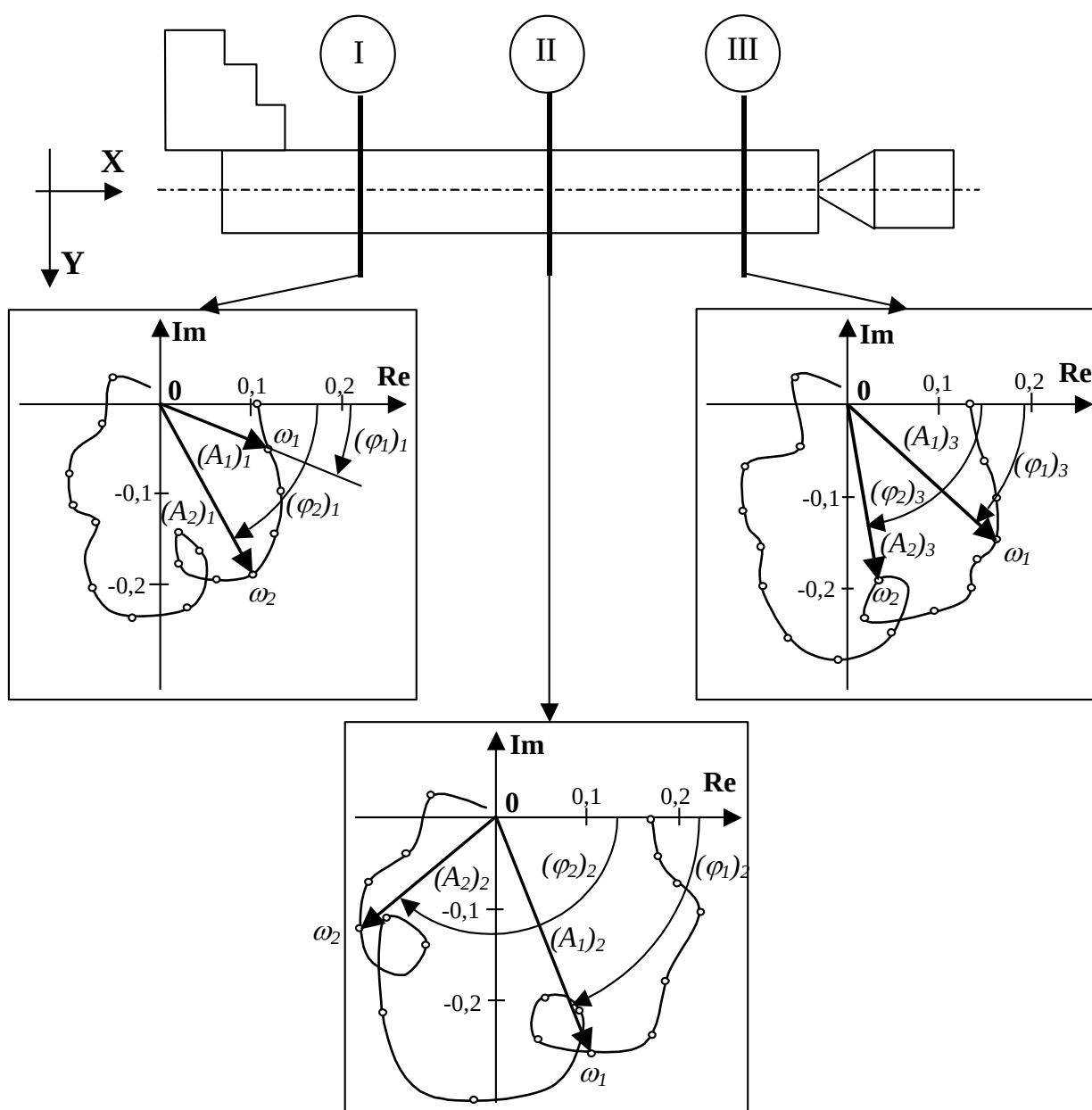


Рис. 2.7. Родина АФЧХ ТОС залежно від положення зони різання вздовж заготовки

Наприклад, відповідно до побудов рис. 2.7, при двох значущих гармоніках збурення, для перерізу I деталі маємо: перша гармоніка при $\omega_1 - (A_1)_1$ і $(\varphi_1)_1$, друга гармоніка при $\omega_2 - (A_2)_1$ і $(\varphi_2)_1$; для перерізу II деталі маємо: перша гармоніка при $\omega_1 - (A_1)_2$ і $(\varphi_1)_2$, друга гармоніка при $\omega_2 - (A_2)_2$ і $(\varphi_2)_2$; для перерізу III деталі маємо: перша гармоніка при $\omega_1 - (A_1)_3$ і $(\varphi_1)_3$, друга гармоніка при $\omega_2 - (A_2)_3$ і $(\varphi_2)_3$;

Відповідно до розробленого методу, гармоніки ряду похибки, що визначають технологічну спадковість форми деталі, визначається за залежністю для кожного перерізу окремо:

$$\Delta_y(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n A(\omega_0 n) \cos [n\alpha + \varphi(\omega_0 n)], \quad (2.12)$$

де α – полярний кут деталі;

$A(\omega_0 n)$ – амплітудно-частотна характеристика;

$\varphi(\omega_0 n)$ – фазово-частотна характеристика ТОС.

Як вже зазначалося, практично кількість гармонік ряду завжди обмежується з міркувань нормальної точності токарної обробки.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СПАДКОВОСТІ

3.1. Мета і задачі моделювання

У роботі моделювання виконується на базі математичної моделі об'єкту або процесу для оцінки впливу їх найважливіших параметрів на вихідні характеристики [3, 4].

Поведінку верстату у процесі точіння можливо описати математичними моделями. Для розв'язання таких математичних моделей, які, до того ж мають досить високий порядок, немає альтернативи використанню комп'ютер зі стандартними процедурами чисельного інтегрування. Таким чином, була обрана методика створення математичних моделей у програмному середовищі Delphi з подальшим проведенням машинного експерименту.

У ході такого експерименту можуть бути перевірені будь-які робочі гіпотези, узагальнені результати, отримані практичні рекомендації для одержання яких при натурному експерименті необхідно багато матеріальних витрат і витрат часу. Однак, перед проведенням таких експериментів завжди необхідно переконатися у адекватності створених моделей і вірного відображення їх програмними засобами.

Для задоволення таким вимогам, перед проведенням машинних експериментів були виконані деякі натурні експерименти з реальним обладнанням, які забезпечують вірні вихідні дані систем, що моделюються. Наприклад, були визначені реальні значення найважливіших динамічних параметрів ТОС: жорсткості за відповідними осями координат, приведеної маси і тертя. Такі експерименти представлені у четвертому розділі не зважаючи на те,

що деякі їх результати були використані для завдання вихідних даних у розробленому програмному забезпеченні.

Головною метою моделювання є необхідність перевірки запропонованої методики визначення технологічної спадковості. Оскільки така методика передбачає використання сімейства амплітудно-фазово частотних характеристик ТОС другого роду, виникає необхідність підтвердження можливості використанні АФЧХ. Зазначені характеристики отримано в процесі моделювання за допомогою прикладного програмного продукту «Експериментальне дослідження частотних характеристик другого роду ТОС», розробленого Галузевою лабораторією віртуальних засобів навчання. Використання цієї програми дало змогу оцінити зміну частотних характеристик технологічної обробної системи залежно від параметрів моделювання та положення зони обробки.

3.2. Створення моделі для вихідної системи

Наявність достовірної математичної моделі процесу різання в умовах замкненої пружної технологічної обробної системи створює можливість для поглибленого аналізу впливу параметрів динамічної системи на стабільність процесу обробки [34, 36]. Така модель дає змогу досліджувати, як зміна жорсткості, масових характеристик, демпфування та інших параметрів ТОС позначається на характері формоутворення та виникненні похибок.

Крім того, використання адекватної моделі дозволяє обґрунтовано вибирати такі значення параметрів технологічної системи, які забезпечують необхідні динамічні характеристики процесу різання. Це важливо для зменшення коливань, підвищення сталості обробки та зниження впливу факторів, що погіршують точність і якість поверхні деталі.

Урахування явища технологічної спадковості в межах такої моделі дає змогу цілеспрямовано впливати на динаміку процесу формоутворення. Завдяки цьому можна прогнозувати прояв успадкованих похибок, оцінювати їхній вплив

на кінцеву геометрію деталі та визначати технологічні умови, за яких забезпечується необхідна якість обробки.

Отже, побудова математичної моделі процесу точіння має здійснюватися з урахуванням замкнутого характеру технологічної обробної системи та відображення найбільш суттєвих зворотних зв'язків, які впливають на процес формоутворення. Такий підхід дає змогу врахувати взаємозалежність між параметрами різання, силовою реакцією системи та пружними переміщеннями її елементів. Якщо вхідними параметрами моделі прийняти задані значення глибини різання H_3 , подачі S_3 і швидкості різання V_3 , а вихідними величинами – складові сили різання P_x , P_y і P_z , то процес різання можна подати у вигляді функціональної схеми, наведеної на рис. 3.1.

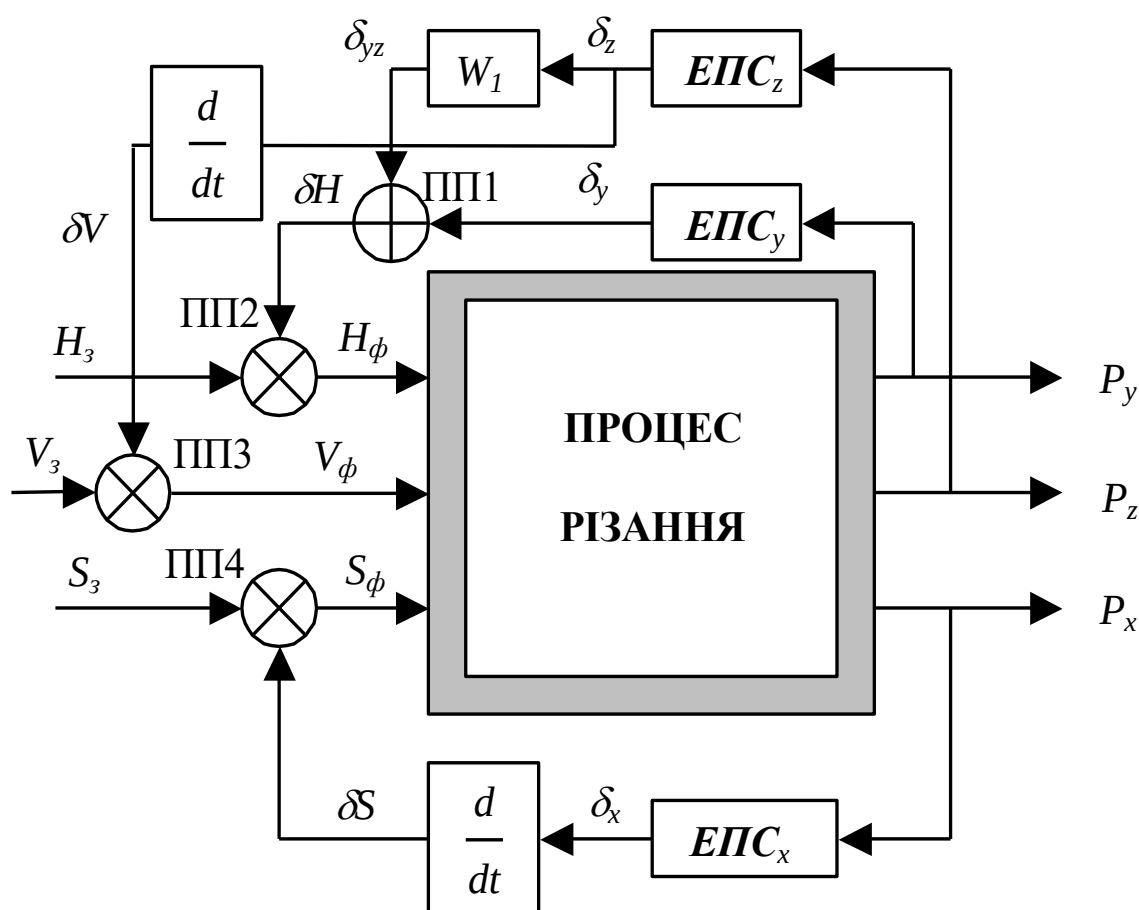


Рис. 3.1. Схема функціональна процесу точіння

Еквівалентна пружна система (ЕПС) у функціональній схемі подана у вигляді окремих блоків, які характеризують її реакцію на відповідні складові сили різання за координатними осями. Відповідно, результатом дії цих сил є пружні переміщення системи, що описуються складовими δ_x , δ_y і δ_z .

Водночас вплив зазначених деформацій на вхідні параметри процесу різання є неоднаковим і залежить від напрямку їх дії. Зокрема, деформація за координатою Y безпосередньо змінює фактичну глибину різання, оскільки вона пов'язана з радіальним зміщенням інструменту відносно заготовки. Деформація за координатою Z впливає на глибину різання опосередковано – через геометричні залежності, що визначають схему формоутворення.

На функціональній схемі ці взаємозв'язки відображені за допомогою порівняльних пристроїв *ПП1*, *ПП3* та передаточної функції W_1 . Остання описує геометричне перетворення складової пружної деформації δ_z у складову δ_{yz} , яка враховується при визначенні фактичної глибини різання.

Швидкість зміни пружної деформації δ_z впливає на фактичне значення швидкості різання, оскільки напрям її вектора збігається з напрямом вектора швидкості різання. У функціональній схемі цей взаємозв'язок відображено за допомогою порівняльного пристрою *ПП3*, який враховує вплив відповідного пружного переміщення на реальні кінематичні умови процесу.

За аналогічним принципом швидкість зміни деформації δ_x впливає на фактичну величину поздовжньої подачі. Цей вплив у схемі враховується через порівняльний пристрій *ПП4*, що забезпечує коригування заданої подачі з урахуванням динамічної реакції пружної технологічної системи.

Таким чином, фактична поздовжня подача формується не лише заданим значенням подачі, а й динамічним впливом швидкості зміни пружної деформації δ_x еквівалентної пружної системи за координатою X . З урахуванням цього фактичну подачу можна визначити за такою залежністю:

$$S_\phi = S_z - \frac{d\delta_x}{dt}. \quad (3.1)$$

Подібним чином на фактичну швидкість різання впливає швидкість зміни складової пружної деформації δ_z , що виникає в еквівалентній пружній системі $ЕПС_z$. Оскільки ця складова пов'язана з напрямом швидкості різання, її необхідно враховувати під час визначення реальних кінематичних параметрів процесу:

$$V_{\delta} = V_{\zeta} - \frac{d\delta_z}{dt}. \quad (3.2)$$

Як було встановлено раніше, пружна деформація еквівалентної пружної системи за координатою Y має прямий вплив на формування фактичної глибини різання. Натомість деформація $ЕПС_z$ впливає на цей параметр через геометричні співвідношення, що випливають зі схеми формоутворення, поданої на рис. 3.2. Відповідно до геометрії цієї схеми можна записати:

$$\delta_{yz} = \sqrt{R^2 + \delta_z^2} - R. \quad (3.3)$$

де $R = D/3$ – радіус оброблюваної заготовки.

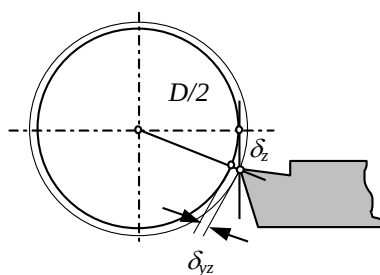


Рис. 3.2. Як деформація δ_z впливає на фактичне значення H_{ϕ}

Тому, визначення впливу деформації ЕПС в цілому на фактичне значення глибини різання ілюструється формулою:

$$H_{\delta} = H_{\zeta} - (\delta_y + \sqrt{R^2 + \delta_z^2} - R). \quad (3.4)$$

Процес обробки різанням можливо подати за допомогою емпіричної залежності відомої в теорії різання:

$$P_z = C_{Pz} H_{\delta}^{x_{pz}} S^{y_{pz}} V^n k_{Pz}, \quad (3.5)$$

де C_{Pz} , k – коефіцієнти, що враховують реальні умови різання x_{pz} , y_{pz} , n – показники, що враховують ступінь впливу відповідно глибини, подачі та швидкості різання.

Разом із тим процес різання має власні динамічні властивості, що пов'язані з інерційністю процесу стружкоутворення. З урахуванням постійної часу стружкоутворення такий процес може бути поданий у вигляді диференціального рівняння першого порядку:

$$T_p \frac{dP_z}{dt} + P_z = k_p H_{\delta}, \quad (3.6)$$

де T_p – значення постійної часу для стружкоутворення;

k_p – коефіцієнт, що характеризує лінеаризацію кривої сили різання в залежності від глибини.

Цей коефіцієнт визначається за існуючим принципом з використанням часткових похідних :

$$k_p = \left(\frac{\partial P_z}{\partial H_{\delta}} \right)_0 = C_{Pz} x_{Pz} (H_{\delta 0})^{x_{Pz}-1} (S_{\delta 0})^{y_{Pz}} (V_{\delta 0})^n k_{Pz}, \quad (3.7)$$

де $H_{\phi 0}$, $S_{\phi 0}$, $V_{\phi 0}$ – параметри режиму точіння у точці лінеаризації, в умовах роботи з встановленим режимом.

У теорії різання відома наступна залежність в умовах обробки пластичних матеріалів $P_{xy} = 0.6 P_z$ з урахуванням векторів технологічних складових сили

різання, визначаються наступні формули для визначення технологічних складових сили різання P_y та P_x :

$$P_y = \sqrt{\frac{P_{xy}^2}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi + \eta)}}; \quad (3.8)$$

$$P_x = P_y \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \eta), \quad (3.9)$$

де φ – значення головного кута різальної частини в основній площині;
 η – значення кут сходження стружки.

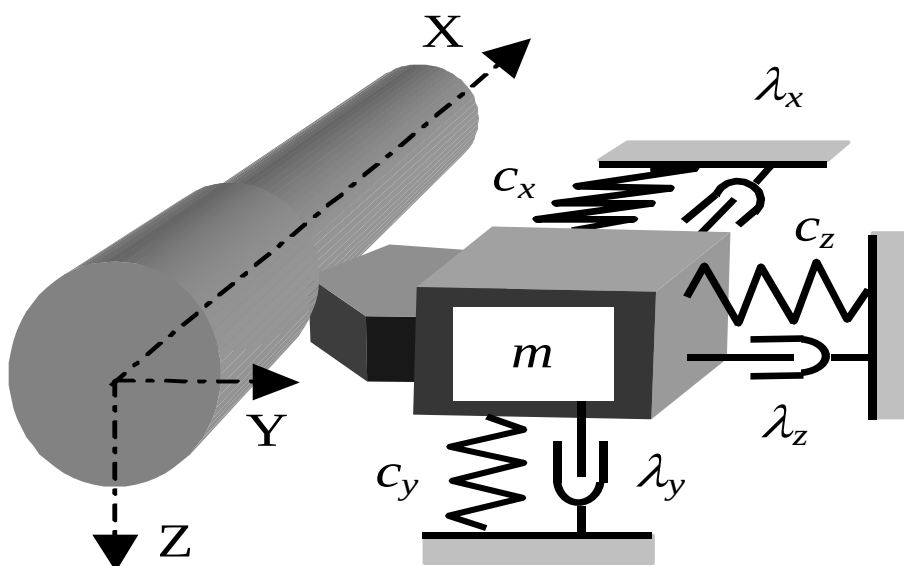


Рис. 3.3. Динамічна модель ТОС приведена у технологічній координатній системі

У першому наближенні еквівалентну пружну систему можна подати як одномасову динамічну систему з трьома ступенями рухомості відповідно до координат X , Y і Z (рис. 3.3). У кожному з координатних напрямів зв'язок приведеної маси m з нерухомою основою описується за допомогою приведеної жорсткості c та коефіцієнта в'язкого тертя λ .

Під в'язким тертям у цьому випадку розуміють такий вид опору руху, за якого сила тертя пропорційна швидкості відносного переміщення елементів системи. За прийнятої розрахункової схеми рух еквівалентної пружної системи за кожною координатою описується окремим диференціальним рівнянням другого порядку. Відповідно, для трьох координат X , Y і Z система рівнянь має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \delta_x}{dt^2} m + \lambda_x \frac{d\delta_x}{dt} + c_x \delta_x &= P_x; \\ \frac{d^2 \delta_y}{dt^2} m + \lambda_y \frac{d\delta_y}{dt} + c_y \delta_y &= P_y; \\ \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} m + \lambda_z \frac{d\delta_z}{dt} + c_z \delta_z &= P_z. \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Комплекс формул (3.1-3.10) подає математична модель точіння для замкнутої пружної технологічної системи, яка з великим ступенем достовірності корелює з функціональною схемою, поданої на рис.3.1.

Найбільш складним і мало дослідженим завданням є задача визначення форми технологічної спадковості заготовки для поперечного перерізу. Для вирішення подібних завдань необхідний більший ступінь деталізації динамічної моделі, яку є сенс подати тримасовою системою, замкненої через процес різання. Подібна модель приведена на рис. 3.4 за однією з трьох координат, а саме за координатою Y .

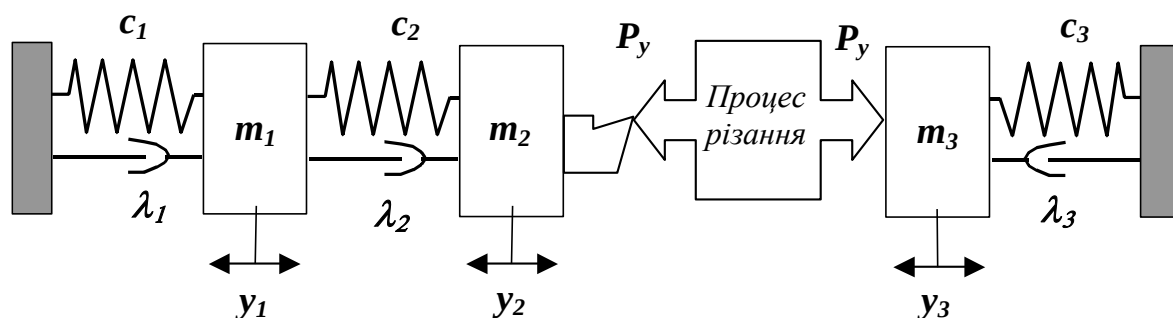


Рис. 3.4. Тримасова динамічна модель ТОС

На схемі (рис.3.4) прийняті наступні позначення, що взагалі відповідають пружній ТОС токарного верстата, як сукупності конструктивно відокремлених елементів: m_1 – маса супорта, m_2 – маса різцетримача, m_3 – маса шпинделя.

Математична модель такої системи має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} H_{\delta} &= H_{\zeta} - (y_2 + y_3); \\ T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y &= k_p H; \\ m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + \lambda_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_2 (y_2 - y_1) &= P_y; \\ m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \lambda_1 \frac{dy_1}{dt} + c y_1 &= \lambda_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + c_2 (y_2 - y_1); \\ m_3 \frac{d^2 y_3}{dt^2} + \lambda_3 \frac{dy_3}{dt} + c_2 y_3 &= P_y. \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

причому коефіцієнт k_p лінеаризованої залежності сили різання від глибини знаходиться за формулою (3.7), але фактичні повздовжня подача і швидкість різання визначаються з умови замкненості ТОС за формулами (3.1) і (3.3) при $\delta_x = \delta_{x3} + \delta_{x3}$ і $\delta_z = \delta_{z3} + \delta_{z3}$. Деформації мас системи за відповідними осями координат знаходяться з диференціальних рівнянь руху за цими осями.

Розроблені у розділі математичні моделі відображають всі передбачені характеристики і фізичні зв'язки реальної системи при різанні і надають, таким чином, можливість їхнього теоретичного дослідження.

3.3. Моделювання процесу різання у замкненій ТОС

Процес різання в замкненій технологічній обробній системі, описаний розробленою математичною моделлю за залежностями (3.1-3.10), є вихідною основою для дослідження впливу різних параметрів системи на її вихідні характеристики. Ця модель може використовуватися як базова для подальшого ускладнення розрахункових схем, зокрема для побудови моделей із більшою

кількістю виділених мас, що дає змогу глибше аналізувати прояви технологічної спадковості в процесі обробки.

Розроблену математичну модель базової системи реалізовано у програмному середовищі відповідно до алгоритму, узагальнену структурну схему якого наведено в попередньому розділі (див. рис. 2.6).

Прінтскрін програми під час роботи наведено на рис. 3.5. У лівій частині програми (див. прінтскрін) передбачено введення початкових параметрів системи та задання часу інтегрування. У нижній частині вікна програми розміщено кнопки керування роботою. Права частина інтерфейсу призначена для відображення результатів моделювання у вигляді графічних залежностей.

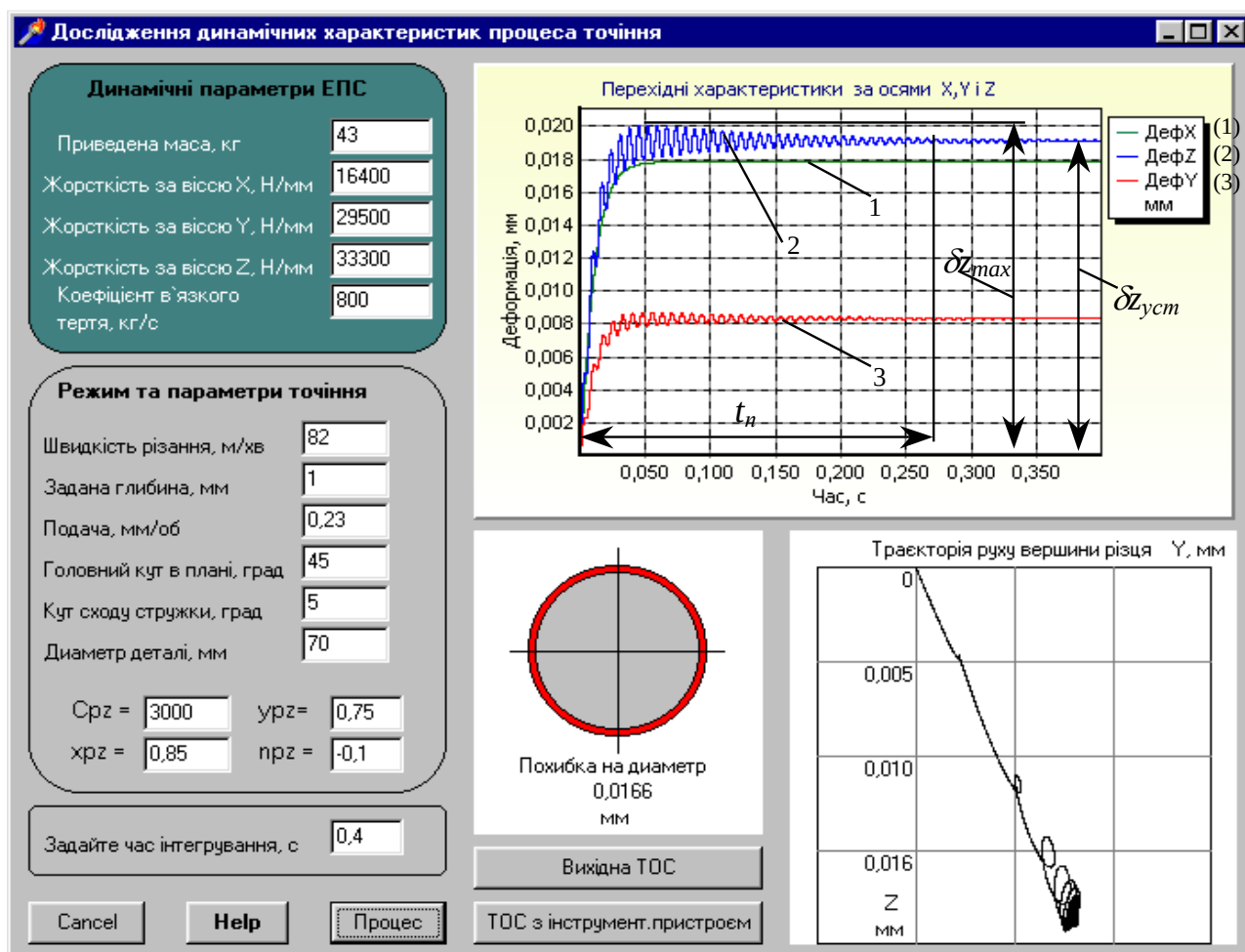


Рис. 3.5. Прінтскрін вікна програми в процесі моделювання перехідного процесу (наприклад при врізанні різця) вихідної технологічної системи

Реакція технологічної системи на раптове збільшення заданої вихідної глибини різання подається у вигляді трьох графічних залежностей перехідних характеристик за відповідними технологічними координатними осями. Додатково програма відображає траєкторію переміщення вершини різця, що характеризує реакцію системи на вказане збурення в поперечному перерізі ТОС. Також передбачено виведення результату зміни діаметра оброблюваної деталі в усталеному режимі точіння.

Вихідні дані, що представлені у відповідних вікнах головного інтерфейсу, отримані при натурних експериментах на реальному обладнанні, про що буде сказано у четвертому розділі.

Під час виконання машинних експериментів із прикладною програмою, що реалізує моделювання базової системи, було встановлено нерівномірний характер коливань за координатними напрямками. Найбільші амплітуди коливань динамічної системи спостерігалися за координатою Z , тоді як найменші – за координатою X .

Такий результат пояснюється особливістю взаємозв'язку між переміщенням вершини різця, фактичною швидкістю різання та силою різання. Коливання вершини інструменту в напрямі осі Z змінюють швидкість її відносного руху, що безпосередньо впливає на фактичну швидкість різання. Зміна швидкості різання, у свою чергу, спричиняє зміну складових сили різання та відповідних пружних деформацій технологічної обробної системи.

Зокрема, переміщення вершини різця у додатному напрямі осі Z викликає миттєве зменшення фактичної швидкості різання. Оскільки в залежності сили різання від швидкості показник ступеня має від'ємне значення, зменшення швидкості призводить до зростання сили різання. Це спричиняє збільшення деформації ТОС і, відповідно, підсилення коливального процесу. У результаті формується позитивний зворотний зв'язок, який погіршує динамічну сталість системи.

На відміну від цього, швидкість коливальних переміщень за координатою X впливає на фактичне значення поздовжньої подачі таким чином, що в технологічній системі формується негативний зворотний зв'язок. Його дія сприяє демпфуванню коливань і підвищенню динамічної сталості процесу різання. Наприклад, у разі збільшення складової сили різання P_x виникає відповідна деформація ТОС у напрямі осі X . Швидкість цієї деформації спричиняє миттєве зменшення фактичної поздовжньої подачі. Зменшення подачі, у свою чергу, призводить до зниження сили різання, а отже, і до зменшення амплітуди коливань системи.

Під час перевірки адекватності розробленої моделі за кількісними критеріями, тобто за відповідністю чисельних значень її вихідних характеристик реальним даним, необхідно виконувати уточнення постійних коефіцієнтів моделі. Таке коригування має здійснюватися як за результатами статичних вимірювань, наприклад за фактичним діаметром обробленої поверхні, так і за динамічними характеристиками процесу різання.

Особливе значення при цьому мають динамічні випробування реального процесу точіння, оскільки вони дають змогу визначити параметри, які складно або практично неможливо отримати аналітичним шляхом. До таких параметрів належить коефіцієнт в'язкого тертя технологічної обробної системи, який не може бути достовірно визначений лише теоретичними способами.

Порівняння з натурними експериментальними дослідженнями показує, що при заданих вихідних даних середньостатистична точність обробки відповідає отриманому при моделюванні значенню похибки на діаметр.

Динамічні властивості системи у часовій області можна оцінювати за її перехідними характеристиками. Для цього доцільно використовувати інтегрований показник A , який визначається як добуток відносного перерегулювання та тривалості перехідного процесу. Такий показник дає змогу узагальнено охарактеризувати якість динамічної реакції ТОС після дії збурення. Зокрема, для координати Z вихідної технологічної обробної системи значення

необхідних параметрів визначаються за результатами вимірювань, наведених на рис. 3.5:

$$A = t_i \left(1 + \frac{\delta z_{\max} - \delta z_{\text{óñò}}}{\delta z_{\text{óñò}}} \right) = 0,253 \left(1 + \frac{0,020 - 0,019}{0,019} \right) = 0,2663, \quad (3.12)$$

де t_i – характеристика часу тривалості перехідного процесу,

$\delta z_{\max}$, $\delta z_{\text{уст}}$ – відповідно максимальне та таке що встановилося значення пружної деформації технологічної системи за технологічною координатою Z .

За таким самим підходом можна визначити інтегральні показники динамічної якості технологічної обробної системи і для інших координатних напрямів. Значення цього показника характеризує інтенсивність і тривалість перехідного процесу: що меншим є інтегрований показник A , то вищою можна вважати динамічну якість системи. У граничному, ідеалізованому випадку, коли перерегулювання та тривалість перехідного процесу відсутні, значення показника наближається до нуля ($A = 0$).

Розроблене програмне забезпечення може бути використане під час проектування технологічних процесів точіння для аналізу та поліпшення їхніх динамічних характеристик. Застосування програми дає змогу оцінювати вплив параметрів технологічної обробної системи на сталість процесу різання, визначати раціональні значення цих параметрів, а також досліджувати ефективність використання динамічних компенсаторів коливань.

Крім того, ця програма може розглядатися як базовий інструмент для подальшого вивчення способів підвищення динамічної якості пружної ТОС. Зокрема, вона створює основу для аналізу можливостей застосування спеціальних пристроїв, які автоматично компенсують похибки обробки, зумовлені пружними деформаціями елементів технологічної системи.

3.4. Моделювання і прогнозування технологічної спадковості

Відповідно з розробленою у другому розділі методикою визначення технологічної спадковості, запропонований алгоритм вимагає використання амплітудно-фазово частотних характеристик технологічної системи другого роду [11, 21, 22, 30].

Найвищу достовірність під час аналізу динамічних властивостей технологічної обробної системи забезпечує використання експериментально отриманих амплітудно-фазових частотних характеристик ТОС. Такі характеристики можуть бути визначені в результаті проведення складних експериментальних досліджень у процесі точіння заготовки, профіль якої змінюється за гармонічним законом.

Однак виконання такого експерименту в реальних виробничих умовах потребує значних витрат часу, спеціальної підготовки заготовки та відповідного вимірювального забезпечення. Тому на етапі технологічної підготовки виробництва доцільно застосовувати комп'ютерне моделювання зазначеного експерименту.

Для цього може бути використана прикладна програма «Експериментальне дослідження частотних характеристик другого роду ТОС», розроблена в Лабораторії віртуальних засобів навчання Міністерства освіти і науки України. Головний інтерфейс цієї програми наведено на рис. 3.6.

Програма призначена для імітаційного моделювання експериментального визначення частотних властивостей технологічної обробної системи під час точіння. Залежно від прийнятого рівня спрощення динамічна модель ТОС може бути подана як одномасова, двомасова або тримасова система.

У випадку вибору одномасової моделі до її складу входить пружна система, приведена до різцетримача, а також модель процесу точіння, що відбувається в умовах замкненої технологічної обробної системи. Якщо використовується двомасова модель, динамічна схема охоплює різцетримач і

супорт. Для тримасової моделі до цих елементів додатково вводиться динамічна модель шпиндельного вузла.

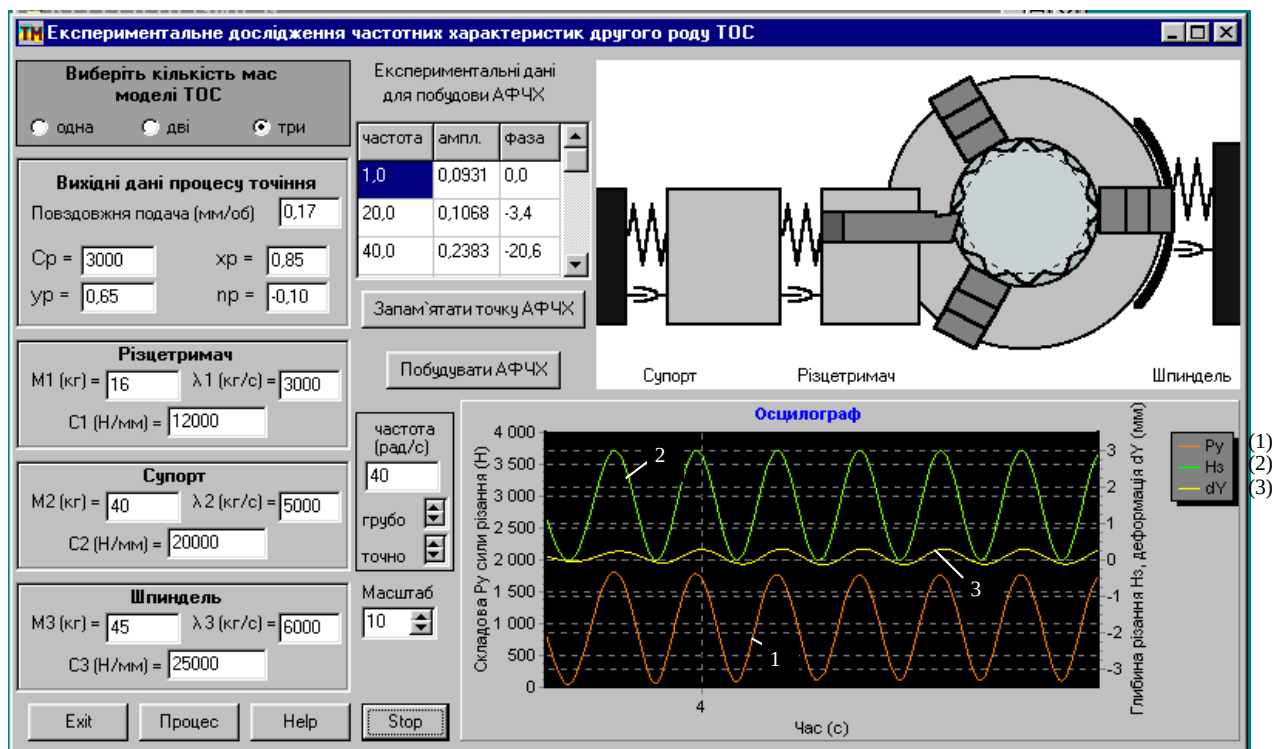


Рис. 3.6. Прінтскрін програми дослідження частотних характеристик технологічної системи другого роду

Незалежно від вибраного рівня деталізації, обов'язковою складовою математичної моделі є процес різання, який розглядається як елемент замкненої системи взаємодії інструменту, заготовки та пружних ланок ТОС.

Під час моделювання розглядається процес точіння спеціально підготовленої заготовки, контур якої в поперечному перерізі задається відповідно до гармонічного закону. За таких умов технологічна обробна система зазнає періодичного збурення, пов'язаного зі зміною величини припуску, яка також описується гармонічною залежністю.

Амплітуда цього збурення залишається сталою, тоді як його частота змінюється дослідником у процесі проведення експерименту. Це дає змогу оцінити реакцію пружної ТОС на гармонічні впливи різної частоти та визначити її частотні властивості.

Реакція пружної технологічної обробної системи фіксується на осцилографі у вигляді зміни складової сили різання P_y та відповідної пружної деформації в напрямі осі Y . Саме ця деформація характеризує прояв технологічної спадковості в процесі обробки.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики другого роду визначають амплітудне співвідношення та фазовий зсув між досліджуваними величинами. Амплітудна складова оцінюється як відношення максимального значення пружної деформації до максимального значення складової сили різання P_y . Фазова складова визначається кутом між максимумом пружної деформації та максимумом складової сили різання P_y .

Залежність цих параметрів від частоти гармонічного збурення дає змогу отримати амплітудно-фазову частотну характеристику другого роду для досліджуваної технологічної обробної системи.

У головному вікні програми передбачено поля для вибору необхідного варіанта динамічної моделі пружної технологічної обробної системи. Вибір моделі здійснюється за допомогою миші. Після цього в інтерфейсі автоматично відображаються відповідні вихідні дані, а схема динамічної моделі, розміщена у правій частині вікна, змінюється відповідно до обраного варіанта.

Запуск процесу моделювання виконується натисканням кнопки «Процес». Над кнопкою «Stop» розташовано елементи керування, які дають змогу змінювати масштаб відображення складової P_y сили різання на лівій осі осцилографа, а також регулювати частоту збурення. При цьому передбачено грубе налаштування частоти з кроком 1 рад/с і точне налаштування з кроком 0,1 рад/с.

У верхній частині інтерфейсу розміщені кнопки «Побудувати АФЧХ» та «Запам'ятати точку АФЧХ», які призначені відповідно для формування амплітудно-фазової частотної характеристики та фіксації окремої її точки. Для зручності аналізу передбачено таблицю експериментальних даних, у якій для кожної точки АФЧХ відображаються значення частоти, амплітуди та фази. Кожен рядок цієї таблиці відповідає координатам однієї точки графіка амплітудно-фазової частотної характеристики.

У процесі моделювання на екрані осцилографа відображаються такі осцилограми:

- складова P_y сили різання – лінія 1 на рис. 3.6;
- заданий припуск H_z – лінія 2 на рис. 3.6;
- пружна деформація δ_y – лінія 3 на рис. 3.6.

Після натискання кнопки «Запам'ятати точку АФЧХ» відповідні числові значення автоматично заносяться до таблиці експериментальних даних. Якщо після цього змінити частоту збурення і повторно натиснути зазначену кнопку, нові дані будуть записані в наступний рядок таблиці. Таким чином формується набір точок, необхідний для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики.

За наявності даних щонайменше для трьох точок натискання кнопки «Побудувати АФЧХ» викликає появу додаткового вікна з відповідним графіком. Біля експериментальних точок на графіку вказуються значення частоти, за якої вони були отримані. Крива АФЧХ будується шляхом апроксимації експериментальних даних кубічним сплайном Ерміта.

Розглянемо приклад моделювання. Нехай на токарному верстаті виконується обробка заготовки з радіусом $R_z = 50$ мм до заданого радіуса деталі $R_d = 45$ мм. При цьому ексцентриситет заготовки становить $e = 0,5$ мм. Параметри технологічної обробної системи верстата приймаються відповідно до значень, наведених у головному інтерфейсі прикладної програми на рис. 3.6.

Розрахунками визначаємо величини коефіцієнтів ряду Фур'є:

$$a_0 = 10, \quad a_1 = -0.5, \quad a_2 = 0.015, \quad a_3 = -0.00125, \quad a_4 = 0.000103.$$

Коефіцієнт a_0 , у відповідності до залежності (2.9), визначає постійну складову збурення, яким є припуск і вплив цієї складової може бути компенсований підналагодженням верстату. Коефіцієнти a_3 і a_4 визначають змінні складові, але для умов токарної обробки з нормальною точністю, їхнім впливом можна знехтувати. Таким чином, змінна складова припуску, що визначає похибку

форми деталі, яку не можна компенсувати будь-якою постійною корекцією розмірного ланцюга ТОС, з достатнім ступенем точності може бути представлена двома гармоніками:

$$H_{\zeta\zeta}(t) = -0.5 \cos(\omega_0 t) + 0.015 \cos(2\omega_0 t). \quad (3.13)$$

Тут можна переконатися у точності визначення коефіцієнтів ряду за допомогою прикладної програми (див. рис. 2.5, а).

Згідно з алгоритмом (див. рис. 2.6) та залежністю (2.12), для прогнозування і оцінки похибки форми необхідно використовувати частотні характеристики ТОС: амплітудно-частотну та фазово-частотну. Амплітудно-частотна характеристика обумовлює викривлення амплітуди вхідної гармоніки змінної складової припуску, а фазово-частотна характеристика – фазовий кут зсуву цієї гармоніки до відповідної вихідної гармоніки.

У результаті імітаційного моделювання технологічної обробної системи за допомогою прикладної програми отримано необхідні частотні характеристики, представлені у вигляді амплітудно-фазової частотної характеристики на рис. 3.7. Під час виконання розрахунку використовувалися параметри динамічної моделі та процесу різання ТОС, які відповідають значенням, заданим у головному інтерфейсі програми, наведеному на рис. 3.6. Такий підхід дозволив оцінити частотну реакцію системи на гармонічне збурення та використати отримані дані для подальшого аналізу технологічної спадковості.

Похибку форми деталі розраховуємо наступним чином. При частоті обертання деталі під час обробки 40 рад/с (приблизно 400 об/хв) за АФЧХ ТОС (дивись рис. 3.7) визначаємо амплітуду і фазу для частоти $\omega_0 = 40$ рад/с (0,1502 та 18° відповідно) та для частоти $2\omega_0 = 80$ рад/с (0,0685 та 146°). У відповідності до залежності (2.12) маємо визначення похибки форми у функції полярного кута α деталі:

$$\delta y(\alpha) = -0.5 \cdot 0.1502 \cdot \cos(\alpha + 18^0) + 0.015 \cdot 0.0685 \cdot \cos(2\alpha + 146^0).$$

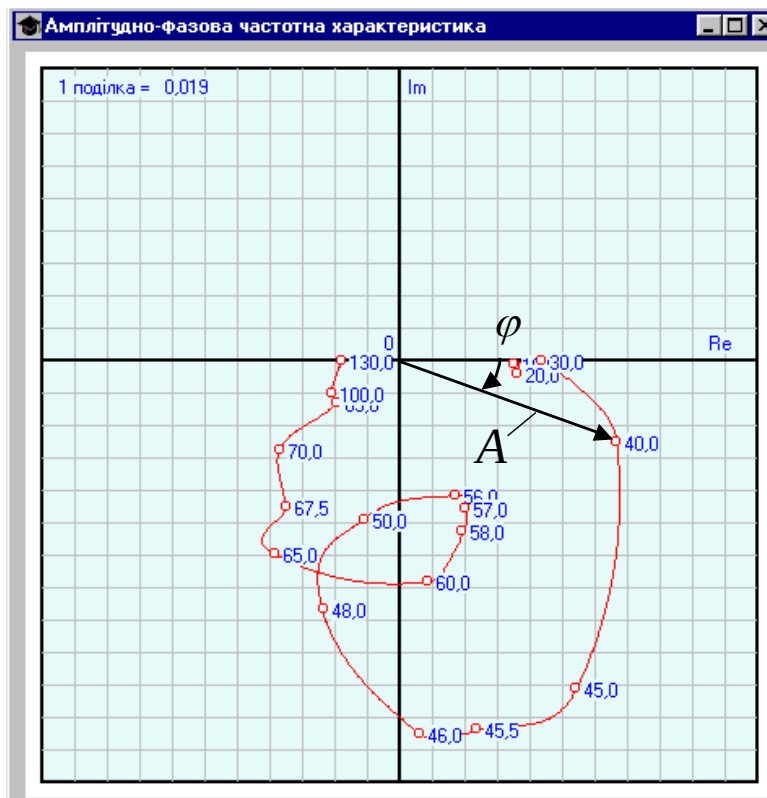


Рис. 3.7. Прінтскрін проведеного моделювання АФЧХ технологічної системи другого роду

Аналогічно визначається похибка форми при інших частотах обертання деталі під час обробки. Для розрахунку похибки форми у поперечному перерізі зручно використовувати спеціальну програму, що будує графіки похибки за залежністю (2.12) (рис. 3.8).

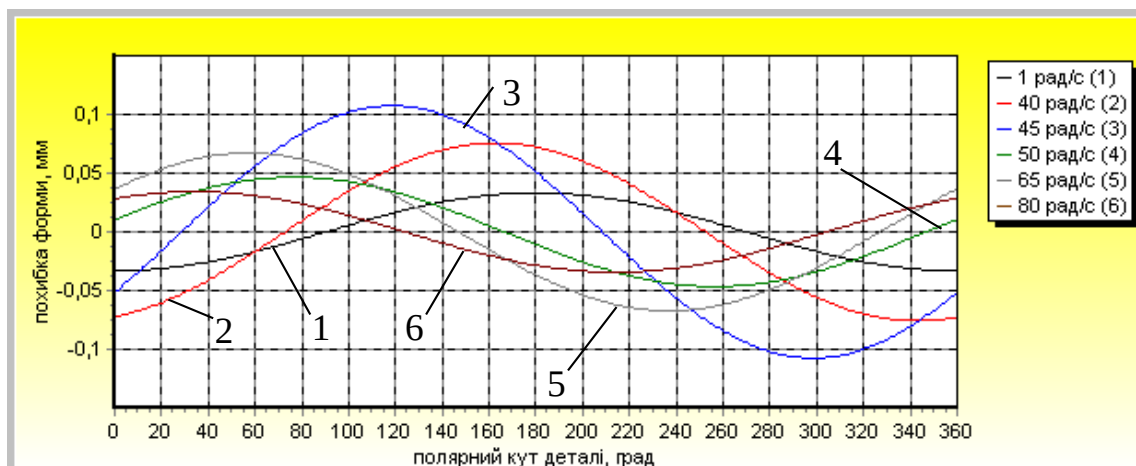


Рис. 3.8. Залежність похибки форми від частоти обертання

Аналіз результатів розрахунків для умов прикладу (рис. 3.9) показує, що при налагодженні верстату з компенсацією постійної складової похибки розмір деталі, в основному, відповідає кресленню, але відносно осі є похибка, яка визначається технологічною спадковістю і обумовлює похибку форми у поперечному перерізі. Причому амплітуда похибки і кут фазового зсуву суттєво залежить від частоти обертання деталі при точінні. Так, при частоті 1 рад/с (лінія 1) амплітуда похибки майже дорівнює статичній деформації ТОС при зміні сили різання, і не перевищує 0,034 мм, а фазовий кут у порівнянні з розташуванням припуску близький до нуля. Для наочності пояснень нижче представлена схема вимірювання зазначених величин – рис. 3.9. Фазовий кут α вимірюється як полярний кут між максимальним радіусом контуру заготовки і максимальною величиною радіусу контуру деталі, що була оброблена, та вимірюється проти напрямку обертання під час точіння.

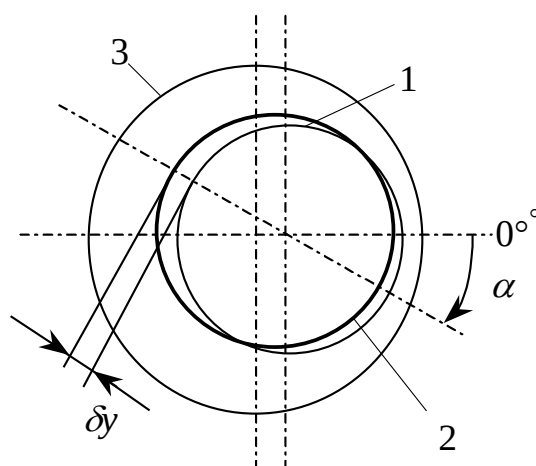


Рис. 3.9. Схема кутового розташування контурів ідеальної деталі (1), деталі, що оброблена (2) і заготовки (3)

Таким чином, похибка форми деталі від технологічної спадковості може бути оцінена за амплітудою та фазою, що визначає розташування за полярним кутом максимального значення похибки. Величини амплітуди та фази в діапазоні середніх частот обертання деталі під час точіння сильно залежать від значення частоти. Максимальна похибка (0,11 мм) спостерігається для частоти обертання під час точіння 45 рад/с (430 об/хв), а максимальний полярний кут її розташування (фаза дорівнює 146°) – для частоти обертання 80 рад/с (760 об/хв).

Для ілюстрації запропонованої методики визначення технологічної спадковості для точіння, що враховує зміни частотних характеристик ТОС в залежності від координати формоутворюючого руху інструменту за довжиною заготовки, розглянемо на прикладі прогнозування технологічної спадковості для циліндричної деталі, заготовка якої має ексцентрично розташований припуск з ексцентриситетом 0.5 мм. Припустимо, що заготовка встановлюється в патрон і задній центр і обробляється за один прохід (рис. 3.10).

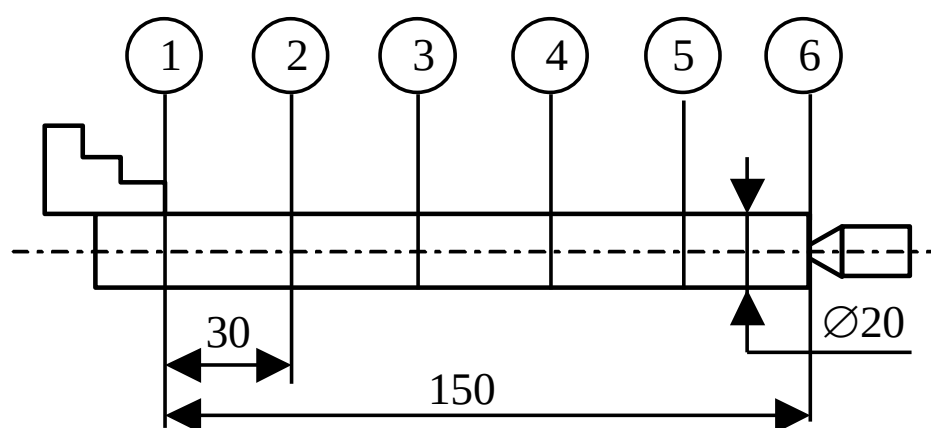


Рис. 3.10. Схема встановлення деталі на верстаті та розрахункові перерізи

У відповідності до методики, що була викладена у третьому розділі, перший етап передбачає визначення приведеної жорсткості ТОС за залежністю (2.5), яка відповідає прийнятому встановленню заготовки. Розрахунки проводимо для шести перерізів, що позначені на рис. 3.9 при наступних значеннях жорсткості верстату: $C_{uy} = 50000$ Н/мм; $C_{cy} = 30000$ Н/мм; $C_{zy} = 50000$ Н/мм. Отримуємо при $d_c = 20.5$ мм: $C_{y1} = 18750$ Н/мм; $C_{y2} = 14290$ Н/мм; $C_{y3} = 10361$ Н/мм; $C_{y4} = 10082$ Н/мм; $C_{y5} = 12824$ Н/мм; $C_{y6} = 15000$ Н/мм.

Ці дані, а також відомості про інші параметри пружної динамічної системи (приведена маса $m = 45$ кг; коефіцієнт в'язкого тертя $\lambda = 6000$ кг/с) є вихідними для прикладної програми з розрахунку АФЧХ ТОС, інтерфейс якої представлений на рис. 3.6. Інші вихідні дані характеризують процес різання для матеріалу

заготовки Ст30 ($C_p = 3000$, $x_p = 0.85$, $y_p = 0.65$, $n_p = -0.1$) повздовжня подача 0.23 мм/об.

Отримані при моделюванні АФЧХ ТОС представлені на рис. 3.11., де криві позначені відповідно до позначення перерізів оброблювальної заготовки (рис. 3.10). Значення частот приведені відповідно до експериментальних точок АФЧХ у рад/с.

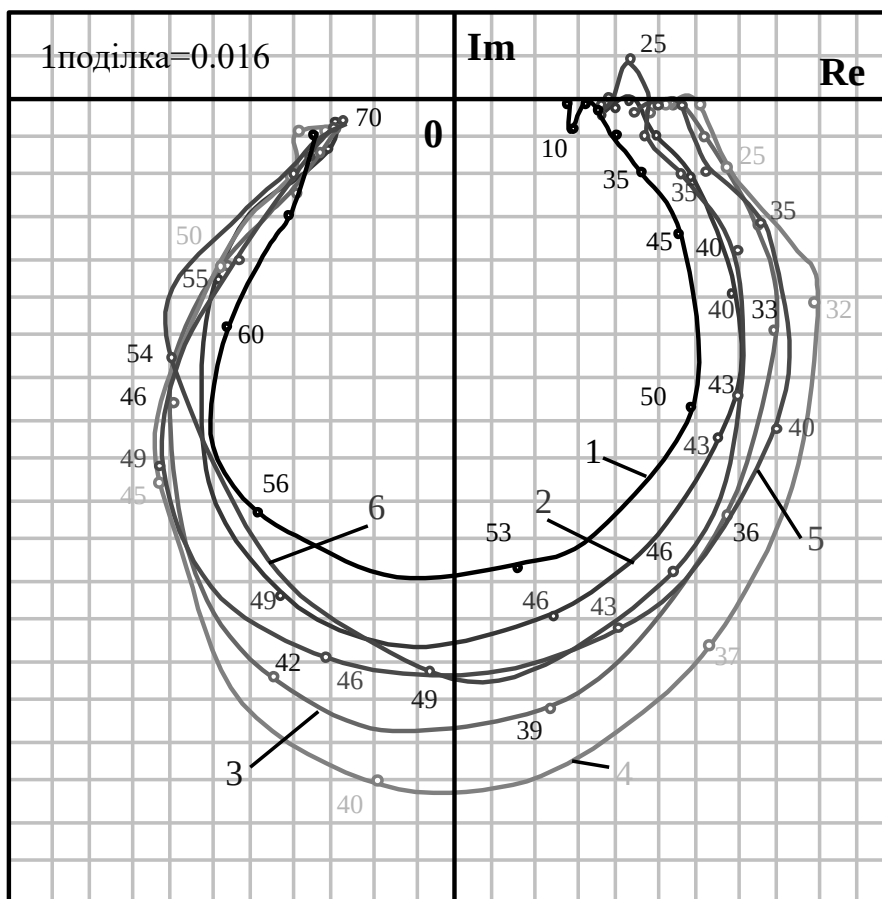


Рис. 3.11. Сімейство АФЧХ ТОС, що отримані моделюванням

Раніше було встановлено, що змінна складова припуску, яка визначає похибку форми деталі, з достатнім ступенем точності може бути представлена двома гармоніками (дивись залежність (3.14)). Згідно з алгоритмом рис. 2.6, для прогнозування і оцінки похибки форми деталі за вибраними перерізами необхідно використовувати сімейство частотних характеристик ТОС.

Похибка форми деталі у кожному перерізі розраховується аналогічно методики, що була викладена вище у розглянутому прикладі.

Розроблена методика була реалізована у прикладній програмі, за допомогою якої для розглянутого випадку обробки була побудована віртуальна деталь (рис. 3.12). Образ віртуальної деталі складається з відповідних перерізів, що співпадають з перерізами, показаними на рис. 3.9. Видно, що технологічна спадковість від ексцентрично розташованого припуску проявляється у кожному перерізі зі зсувом за фазовим кутом та зміною максимального значення похибки. Така похибка форми буде сприйматися візуально, як викривлення осі деталі, разом з бочкуватістю.

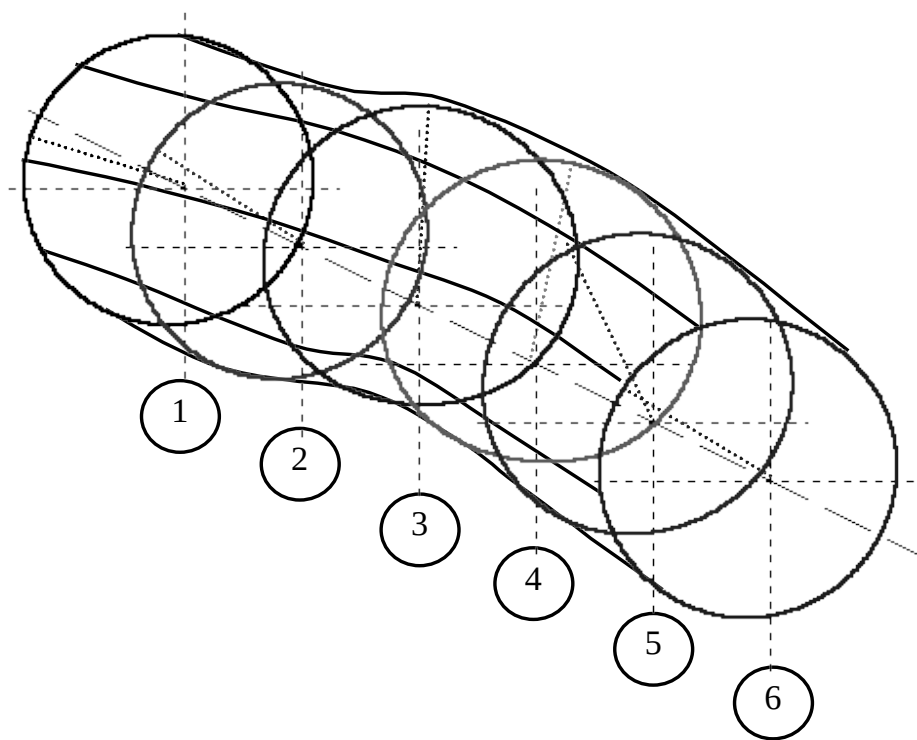


Рис. 3.12. Форма віртуальної деталі

На рис. 3.12 для кожного розрахункового перетину деталі виділені радіус-вектори поверхні, що відповідають максимальному значенню похибки. Видно, що вони змінюються за перерізами не тільки за величиною, а й за кутовим розташуванням, яке відповідає розрахованому фазовому зсуву.

3.5. Методика призначення режимів різання за допомогою програми, що враховує технологічну спадковість

Розроблена математична модель описує процес різання під час точіння з урахуванням основних параметрів технологічного процесу та впливу технологічної спадковості на кінцеві характеристики обробленої заготовки. У межах моделі враховується взаємозв'язок між режимами різання, пружними деформаціями технологічної обробної системи та формуванням похибок обробленої поверхні. Для практичного використання модель реалізовано у вигляді прикладної програми, інтерфейс якої представлено на рис. 3.13.

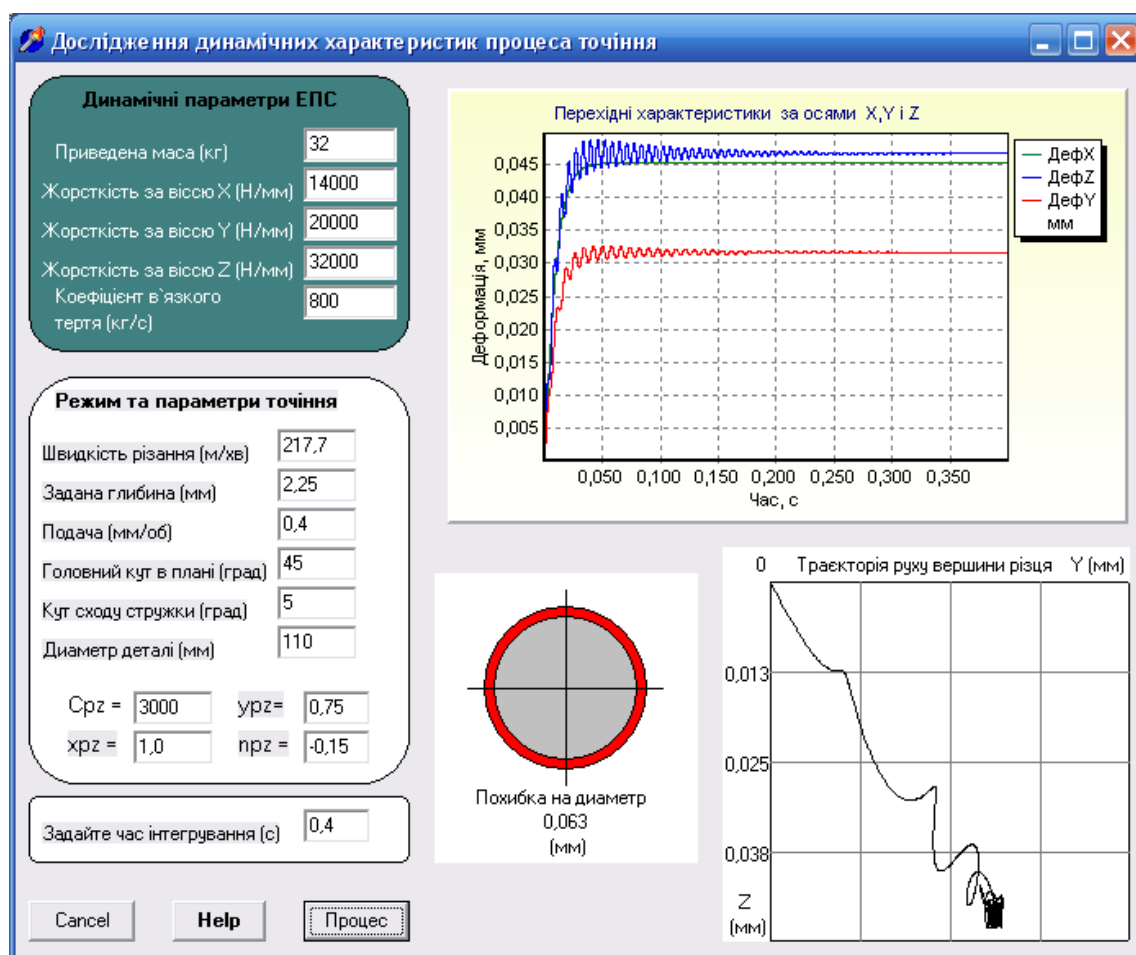


Рис. 3.13. Програмний модуль моделювання процесу точіння у дії

Ліва частина інтерфейсу програми призначена для введення вихідних параметрів технологічної системи та встановлення тривалості інтегрування. У нижній частині вікна розташовані елементи керування, що забезпечують запуск,

зупинку та виконання відповідних операцій моделювання. Права частина інтерфейсу використовується для візуалізації результатів розрахунку у графічній формі.

Реакція технологічної обробної системи на раптове збільшення заданої глибини різання відображається трьома графіками перехідних процесів за відповідними координатними напрямками. Окрім цього, програма формує траєкторію руху вершини різального інструменту, яка дає змогу оцінити характер динамічної реакції системи на збурення в поперечному перерізі ТОС. Додатково виводиться зміна діаметра оброблюваної деталі після встановлення режиму точіння, що дозволяє оцінити вплив динамічних процесів на кінцеву точність обробки.

У процесі виконання машинних експериментів із прикладною програмою, що імітує роботу базової динамічної системи, було встановлено, що амплітуди коливань за різними координатними напрямками є неоднаковими. Найбільш інтенсивні коливання спостерігаються за координатою Z , тоді як за координатою X вони мають найменші значення.

Такий характер динамічної поведінки пояснюється особливостями взаємозв'язку між переміщенням вершини різального інструменту, фактичною швидкістю різання та силою різання. Коливальні переміщення вершини різця в напрямі осі Z змінюють її швидкість відносно заготовки, що безпосередньо впливає на фактичну швидкість різання. Зміна швидкості різання, у свою чергу, спричиняє зміну сили різання і відповідної амплітуди коливань технологічної обробної системи.

Зокрема, переміщення вершини різця у додатному напрямі осі Z викликає короткочасне зменшення фактичної швидкості різання. Оскільки залежність сили різання від швидкості має від'ємний показник ступеню, зниження швидкості призводить до збільшення сили різання. У результаті зростають пружні деформації елементів ТОС, що додатково підсилює коливальний процес. Таким чином, у системі формується позитивний зворотний зв'язок, який має дестабілізувальний характер.

Інший характер впливу спостерігається для коливань за координатою X . Швидкість пружних переміщень у цьому напрямі впливає на фактичну величину поздовжньої подачі таким чином, що в системі виникає негативний зворотний зв'язок. Його дія спрямована на зменшення амплітуди коливань і стабілізацію процесу різання.

Наприклад, у разі збільшення складової сили різання P_x деформація ТОС у напрямі осі X змінює фактичну подачу. Швидкість цієї деформації спричиняє миттєве зменшення поздовжньої подачі, що, у свою чергу, призводить до зниження сили різання. Внаслідок цього амплітуда коливань також зменшується, а динамічна система набуває більш стійкого характеру поведінки.

Під час кількісної перевірки адекватності математичної моделі необхідно оцінювати відповідність розрахованих вихідних характеристик фактичним результатам моделювання або експериментальних вимірювань. Для цього постійні коефіцієнти моделі мають уточнюватися як за статичними параметрами, наприклад фактичним діаметром обробленої поверхні, так і за динамічними характеристиками процесу різання.

Розроблена прикладна програма може використовуватися на етапі проектування технологічних операцій токарної обробки. Її застосування дає змогу попередньо оцінювати динамічну поведінку ТОС, аналізувати вплив параметрів процесу та обґрунтовувати вибір початкових режимів обробки.

Програма дозволяє здійснити моделювання процесу точіння, та отримати прогнозовану максимальну похибку обробки на заданій технологічній операції, з врахуванням технологічної спадковості від попередніх операцій.

Для цього необхідно у відповідні (рис. 3.13) поля ввести вихідні дані, які складаються з блоків: динамічні параметри еквівалентної пружної системи, параметрів процесу точіння, задати час інтегрування на натиснути кнопку „Процес”. Відбудеться моделювання процесу обробки, результатом якого стане максимально можлива похибка для даних умов обробки.



Рис. 3.14. Алгоритм вибору режиму різання на етапі проектування технологічної операції точіння за допомогою програмного модулю, що враховує технологічну спадковість

На основі отриманих результатів моделювання можна по-перше зробити висновок про забезпечення необхідної точності обробки на даній технологічній операції при отриманих в результаті розрахунку параметрах режимів різання. По-друге, наприклад методом покоординатного спуску, змінюючи параметри режиму різання підібрати такі раціональні режими, що забезпечують можливу мінімальну похибку обробки, або максимальні режими різання при незмінній можливій максимальній похибці обробки.

На основі виконаних теоретичних досліджень був розроблений загальний алгоритм дія для підвищення ефективності процесу точіння шляхом вибору раціональних режимів обробки на етапі технологічної підготовки виробництва (рис. 3.14), що дозволяє шляхом моделювання точності формоутворення у поперечному перетині вздовж осі заготовки, підбирати максимальні режими на дану операцію, при умові отримання необхідної точності.

4. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ

Темпи економічного розвитку держави в чималій мірі залежать від стану машинобудування. Оскільки у ньому матеріалізуються головні науково-технічні ідеї, створюються нові знаряддя праці, системи, машини, які визначають прогрес в інших галузях народного господарства. Саме тут закладаються основи широкого виходу на принципово нові технології підвищення продуктивності праці та якості продукції.

Сучасні засоби проектування є одним з напрямків досягнення високого рівня машинобудування. У нинішній час створені та розвиваються програми для верстатів з числовим програмним керуванням.

Світовий досвід створення і функціонування таких програм засвідчує, що перехід до обробки металів в умовах їхнього застосування дає чималий ефект. Перш за все економічний ефект досягається завдяки скороченому часу на виконання проектних (конструкторських і технологічних робіт). Важливу роль у цьому відіграє технічно обґрунтоване нормування робіт [8].

Розроблений модуль прикладної програми дає можливість скоротити витрати часу на обробку деталі, а також отримати більш якісну обробку і досягти високої точності.

Нормування і розрахунок економічного ефекту при використанні машинних засобів проектування проводиться для токарного верстата в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Розрахунок проводиться на прикладі циліндричної деталі типу вал. Економічний ефект при проектуванні запропонованим методом досягається завдяки скороченому часу на обробку, а також підвищенню точності обробленої поверхні. Вироби, отримані за таких умов обробки, мають значно більший попит, підвищують задоволеність працею.

Повний економічний ефект складається з трьох частин: ефект від створення програми, від виготовлення і від експлуатації виробу.

Метою проведення економічного аналізу застосування розробленої програми є порівняння витрат на обробку деталей базовим методом (безмашинним) і тим, що оцінюється (з використанням модуля прикладної програми).

4.1. Визначення річного економічного ефекту від застосування програмного модуля

Річний економічний ефект від застосування програмного модуля розраховується за формулою:

$$E_p = E - E_n \cdot K,$$

де E – річна економія від впровадження програмного модуля;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності використання капітальних витрат;

K – разові капітальні витрати на впровадження програмного модуля.

$$E = C_{баз} - C_{пр},$$

де $C_{баз}$ – витрати на виконання технологічних розрахунків базовим способом;

$C_{пр}$ – витрати на виконання технологічних розрахунків за допомогою прикладного модуля.

Вихідні дані для розрахунку зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні дані для розрахунків

№ п/п	Показники	Позна- чення	Одиниця виміру	Варіант	
				базовий	проект
1	2	3	4	5	6
1.	Базова вартість технічних засобів	B_{eom}	грн.		36000
2.	Норма амортизації на реновацію ЕОМ	$H_{ам.еом}$	%		25

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5	6
3.	Норма амортизації на реновацію приміщення	$H_{ам.пр}$	%	5	5
4.	Нормативний коефіцієнт ефективності	E_n			0,16
5.	Річний фонд часу роботи інженера-проектувальника	$F_{ч.к}$	год.	1864	
6.	Річний фонд часу роботи інженера-програміста	$F_{ч.пр}$	год.		1864
7.	Коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату	$K_{доод}$		0,10	0,10
8.	Коефіцієнт, який враховує відрахування у соціальні фонди	$K_{соц}$		0,22	0,22
9.	Площа, яку займає ЕОМ	$S_{еом}$	м ²		4,0
10.	Площа, яку займає робоче місце технолога	S_m	м ²	4,0	
11.	Вартість 1кВ/год. електроенергії	$\Pi_{ел}$	грн.	18,1	18,1
12.	Потужність ЕОМ	N_k	кВт		0,25
13.	Річні витрати на ремонт і технічне обслуговування ЕОМ	$B_{р.еом}$	грн.		3825
14.	Витрати на матеріали інженера-технолога	B_m	грн.	373,5	
15.	Вартість 1 м ² виробничої площі	Π_n	грн.	365,0	365,0
16.	Витрати на придбання програмних засобів	$B_{п.с}$	грн.		25500
17.	Кількість кондиціонерів в залі (1 на 10 од. ЕОМ)	$N_{кон}$	шт.		1/10
18.	Кількість робочого часу на організацію підготовчих робіт та впровадження системи	H_o	год.		25
19.	Вартість кондиціонера	$\Pi_{кон}$	грн.		21200,0
20.	Коефіцієнт, який враховує накладні витрати	$K_{нак}$		0,6	0,6
21.	Вартість носіїв інформації	$B_{н.інф}$	грн.		220,0
22.	Кількість деталей на рік, на які необхідно скласти розрахунки режимів різання	N_{∂}	шт.	1800	1800
23.	Оклад інженера-технолога	O_k	грн./міс.	27000	

Продовження табл. 4.1

	2	3	4	5	6
24.	Витрати на утримання приміщення (на 1 м ²)	B_{np}	грн.	780	780
25.	Вартість господарчого інвентарю	B_{inv}	грн.		3600
26.	Оклад інженера-програміста	O_n	грн./міс.		32000
27.	Час на організаційні роботи з ЕОМ	$H_{o.eom}$	год.		16
28.	Середньогодинна зарплата інженера-програміста	$З_{год.пр}$	грн./год.		181,82
29.	Витрати на матеріали інженера-програміста	B_m	грн.		630,0
30.	Річний фонд роботи ЕОМ	F_{eom}	год.		1800
31.	Норма амортизації кондиціонера	$H_{ам.к}$	%		25
32.	Норма часу на проведення технологічних розрахунків	t_{eom}			0,6

4.2. Витрати на проведення технологічних розрахунків базовим методом

Сюди включають:

- заробітну плату (основну та додаткову) інженерів-технологів;
- відрахування у соціальні фонди;
- накладні витрати;
- амортизацію приміщень.

На розрахунок режимів різання, з врахуванням їхнього корегування в разі необхідності, для досягнення заданої точності обробки витрачається 20,5 годин. В цьому часі враховується підготовчо-заклучний час, час на особисті потреби, відпочинок в розмірі 10% від середнього оперативного часу, який включає в себе час на проведення та корегування розрахунків, проміжну та остаточну апробацію розрахованих режимів різання.

$$T_{np} = N_o \cdot t_p = 1800 \cdot 20,5 = 36900 \text{ н-год.}$$

Чисельність технологів складає:

$$N_{\kappa} = \frac{T_{np}}{F_{\kappa}} = \frac{36900}{1864} = 19,8 \text{ осіб}$$

Приймаємо $N_{\kappa}=20$ осіб.

Фонд основної заробітної плати проектувальника при місячному окладі технолога 1-ї категорії – 7000 грн. складе:

$$\Phi_{o.zn} = O_{\kappa} \cdot N_{\kappa} = 27000 \cdot 20 = 540000 \text{ грн.}$$

Річний фонд заробітної плати:

$$\Phi_{zn} = \Phi_{o.zn} \cdot (1 + K_{\text{доод}}) \cdot (1 + K_{\text{соц}}),$$

$$\Phi_{zn} = 540000 \cdot (1 + 0,10) \cdot (1 + 0,22) = 724680 \text{ грн.}$$

Накладні витрати складають:

$$B_{\text{нак}} = \Phi_{o.zn} \cdot K_{\text{накл}} = 540000 \cdot 0,6 = 324000 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію приміщення. Виходячи з площі робочого місця технолога 4,0 м² і вартості 1 м² – 365 грн., розраховуємо витрати на амортизацію:

$$B_{\text{ам.нр}} = S_m \cdot C_n \cdot N_{\kappa} \cdot H_{\text{ам.нр}} = 4,0 \cdot 365 \cdot 20 \cdot 0,05 = 1460 \text{ грн.}$$

де S_m – площа робочого місця технолога, м²;

$H_{\text{ам.нр}}$ – норма амортизації будівель, %;

C_n – вартість 1 м² приміщення, грн.

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{утр.нр}} = B_{\text{нр.}} \cdot S_m \cdot N_{\kappa} = 780 \cdot 4,0 \cdot 20 = 62400 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на виконання усього обсягу технологічних розрахунків базовим методом:

$$B_{\text{баз}} = \Phi_{\text{зн}} + B_{\text{нак}} + B_{\text{ам.пр}} + B_{\text{утр.пр}} = 724680 + 324000 + 1460 + 62400 = 312080 \text{ грн.}$$

4.3. Розрахунок разових капітальних витрат

Капітальні витрати на впровадження програмного модуля визначаємо за формулою:

$$K = K_{nn} + K_{m.z},$$

де K_{nn} – витрати на придбання, налагодження, генерацію прикладного модуля;

$K_{m.z}$ – залишкова вартість діючих засобів, що використовуються у даному проекті.

$$K_{nn} = B_{n.z} + B_{n.inf} + B_{opr},$$

де $B_{n.z}$ – витрати на придбання програмних засобів та їх генерацію;

$B_{n.inf}$ – витрати на придбання носіїв інформації;

B_{opr} – витрати на організацію підготовчих робіт по впровадженню програмного модуля. Визначається на основі трудомісткості виконання організаційно-підготовчих робіт та середньо-годинної заробітної плати інженера-програміста:

$$B_{opr} = H_{o.eom} \cdot Z_{год.пр} = 16 \cdot 181,82 = 2909,12 \text{ грн.}$$

де $H_{o.eom}$ – час на організаційні роботи, год.;

$Z_{год.пр}$ – середньогодинна зарплата інженера-програміста, грн./год.

$$K_{mn} = 25500 + 920 + 2909,12 = 29329,12 \text{ грн.}$$

Визначимо вартість технічних засобів у розрахунку на даний програмний модуль:

$$K_{т.з} = B_{eom} + B_{м} + B_{кон} + B_{инв},$$

де B_{eom} – вартість комп'ютерної техніки, грн.;

$B_{м}$ – вартість матеріалів, грн.;

$B_{кон}$ – вартість кондиціонеру, грн.;

$B_{инв}$ – вартість господарського інвентарю, грн.

У розрахунку вартості технічних засобів необхідно врахувати коефіцієнт завантаження даним програмним модулем.

Коефіцієнт завантаження ЕОМ даного прикладного модуля:

$$K_{зав} = \frac{N_d \cdot t_{eom}}{F_{eom}},$$

де t_{eom} – час, витрачений на нормування робіт за допомогою ЕОМ, що виконуються на токарних верстатах.

$$K_{зав} = \frac{1800 \cdot 0,6}{1800} = 0,6$$

$$K_{т.з} = (36000 + 630 + 21200 + 3600) \cdot 0,6 = 36858 \text{ грн.}$$

$$K = 29329,12 + 36858,0 = 66187,12 \text{ грн.}$$

4.4. Витрати на експлуатацію програмного модуля

Витрати на експлуатацію програмного модуля розраховуємо за формулою:

$$B_{np} = \sum B_i,$$

де $B_{зн.п}$ – витрати на основну та додаткову заробітну плату програміста з урахуванням єдиного соціального внеску (ЄСВ), грн.;

$B_{ам.тз}$ – витрати на амортизацію технічних засобів, грн.;

$B_{ел}$ – витрати на електроенергію технічних засобів САПР, грн.;

$B_{рем}$ – витрати на технічне обслуговування та ремонт, грн.;

$B_{ам.пр}$ – витрати на амортизацію приміщення, грн.;

$B_{ін}$ – інші витрати, грн.;

B_n – накладні витрати, грн.

Заробітна плата програміста:

$$B_{зн.п} = O_n \cdot (1 + K_{дод}) \cdot (1 + K_{соц}) \cdot Ч_n,$$

де $Ч_n$ – чисельність програмістів для роботи з даною програмою, чол.

$$Ч_n = \frac{N_d \cdot t_{еом}}{F_{ч.пр}} = \frac{1800 \cdot 0,6}{1864} = 0,58 \text{ ос.},$$

Приймаємо $Ч_n = 1$ особу.

$$B_{зн.п} = 32000 \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot 12 = 515328 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію технічних засобів:

$$B_{ам.тз} = \frac{B_{еом} \cdot H_{ам.еом}}{100} = \frac{36000 \cdot 25}{100} = 7200,0 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію:

$$B_{ел} = N_k \cdot Ц_{ел} \cdot F_{еом} \cdot K_{зав} = 0,25 \cdot 18,1 \cdot 1800 \cdot 0,6 = 4887,00 \text{ грн.}$$

Витрати на технічне обслуговування та ремонт:

$$B_{рем} = B_{р.еом} \cdot K_{зав} = 3825 \cdot 0,6 = 2295,0 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію приміщення:

$$B_{ам.пр} = S_{еом} \cdot \Pi_n \cdot H_{ам.пр} \cdot K_{зав} = 4,0 \cdot 365,0 \cdot 0,05 \cdot 0,6 = 43,80, \text{ грн.}$$

Інші витрати (освітлення, кондиціонер, електроенергія на кондиціонер):

$$B_{ін} = [(\Pi_{кон} \cdot N_{кон}) \cdot H_{ам.кон} + (\Pi_{ел.ен} \cdot F_{еом})] \cdot K_{зав},$$

де $H_{ам.кон}$ – норма амортизаційних відрахувань на реновацію кондиціонера, %.

$$B_{ін} = [(21200 \cdot 1/10) \cdot 0,25 + (18,1 \cdot 1800)] \cdot 0,6 = 19866,00 \text{ грн.}$$

Накладні витрати (0,6 від заробітної платні програміста):

$$B_{накл} = O_n \cdot K_{нак} = 32000 \cdot 12 \cdot 0,6 = 230400 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на виконання усього обсягу робіт з розробки технічної документації зведемо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Загальні витрати на виконання робіт з розробки технічної документації

№ п/п	Стаття витрат	Умовне познач.	Величина, грн
1.	Витрати на основну та додаткову заробітну плату програміста з урахуванням ЄСВ	$B_{зн.п}$	515328,0
2.	Витрати на амортизацію технічних засобів	$B_{ам.тз}$	7200,0
3.	Витрати на електроенергію технічних засобів САПР	$B_{ел}$	4887,0
4.	Витрати на технічне обслуговування та ремонт	$B_{рем}$	2295,0
5.	Витрати на амортизацію приміщення	$B_{ам.пр}$	43,8
6.	Інші витрати	$B_{ін}$	19866,0
7.	Накладні витрати	B_n	230400,0
Загальна сума		$B_{пр}$	780019,8

Річна економія від зниження експлуатаційних витрат:

$$E = B_{\text{баз}} - B_{\text{пр}} = 1112540 - 780020 = 332520 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від використання програмного модуля:

$$E_p = E - E_n \cdot K = 332520 - 0,16 \cdot 66187,12 = 321930 \text{ грн.}$$

Строк окупності капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E} = \frac{66187,12}{332520} = 0,2 \text{ року} = 2,4 \text{ міс.}$$

Використання програмного модуля на відміну від базового варіанту, в якому технологічний процес проектують безмашинним методом, дозволяє досягти річного економічного ефекту у розмірі 321930 грн. при окупності капітальних витрат протягом 2,4 місяців.

Доцільність використання програмного модуля дозволяє швидко, якісно та наочно підібрати необхідні режими різання, які найбільше будуть підходити для досягнення заданої точності.

4.5. Результати розрахунку економічної ефективності використання програмного модуля

Результати розрахунку зведено до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Показники економічної ефективності використання програмного модуля

Показник	Одиниця виміру	Варіант	
		базовий	проектний
1	2	3	4
Трудомісткість виконання технологічних розрахунків	н-год	20,5	0,6
Кількість деталей на рік, на які необхідно підготувати конструкторську документацію	шт./рік	1800	1800
Потреба у виконавцях для розрахунків режимів різання	осіб	20	1

Продовження табл. 4.3

1	2	3	4
Поточні витрати на виконання комплексу робіт із проектування техпроцесу	грн.	1112540	780020
Річна економія від зниження експлуатаційних витрат	грн.	-	332520
Додаткові капітальні витрати з врахуванням коефіцієнта завантаження ЕОМ даним програмним модулем	грн.	-	66187
Річний економічний ефект	грн.	-	321930
Строк окупності додаткових капітальних витрат	міс.	-	2,4

ВИСНОВКИ

Встановлено, що технологічна спадковість, яка істотно впливає на формування точності деталі, визначається не лише частотними характеристиками верстата. Важливу роль відіграють також параметри технологічної обробної системи, що змінюються залежно від положення інструменту за координатою формоутворювального руху вздовж заготовки.

Особливо актуальним це стає за умов підвищення швидкості різання. У такому разі зростає ймовірність посилення впливу динамічних характеристик ТОС, які змінюються вздовж координати поздовжньої подачі, на прояв технологічної спадковості та, відповідно, на точність обробки.

Урахування впливу на технологічну спадковість формоутворюючої координати отримана приведена до вершини різця динамічна модель з параметрами жорсткості, що є функціями повздовжньої координати. Отримані статичні залежності для визначення приведених жорсткостей C_y і C_z у функції від поточної координати x з урахуванням жорсткості деталі для двох способів встановлення заготовки: перший – у патроні та другий – у патроні з підтисканням заднім центром.

Запропонований метод та алгоритм попереднього обрахунку форми технологічної спадковості заготовки у поперечному перерізі у функції повздовжньої координати. Суть методу у застосуванні частотних характеристик технологічної системи при точінні другого роду, за допомогою яких відбувається фільтрація кожної гармоніки збурення форми припуску перед перетворенням її на відповідну гармоніку похибки форми у поперечному перерізі деталі.

В результаті проведених досліджень можна констатувати, що технологічна спадковість залежить не тільки від збурення, яким є припуск, а й від динамічних властивостей ТОС і частоти обертання шпинделя під час токарної обробки.

Розроблена тримасова динамічна модель, що ураховує конструктивно відокремлені вузли верстату – різцетримач, супорт і шпиндель, які взаємодіють між собою тільки через процес різання покладена в основу математичної моделі

ТОС з процесом різання, що покладена в основу вивчення технологічної спадковості деталі у поперечному перерізі.

Для реалізації запропонованої методики оцінки технологічної спадковості деталі у поперечному перерізі рекомендується використовувати спеціальну прикладну програму. Проведене моделювання підтвердило теоретично встановлену залежність похибки форми у поперечному перерізі від частоти обертання заготовки при точінні.

Проведене моделювання технологічної спадковості у поперечному перерізі деталі за повздовжньою координатою формоутворення. Отримана форма віртуальної деталі і моделюванням доведено, що у залежності від способу установки на верстаті, звичайні форми (бочкоподібність при установці у патроні і задньому центрі, конусність – при установці у патроні) мають значне викривлення, яке залежить від режиму точіння, зокрема, швидкості різання.

Використання програмного модуля на відміну від проектування технологічного процесу безмашинним методом, дозволяє досягти річного економічного ефекту у розмірі 321930 грн. при окупності капітальних витрат протягом 2,4 місяці. Доцільність використання програмного модуля дозволяє швидко, якісно та наочно підібрати необхідні режими різання, які будуть найбільш підходящими для досягнення заданої точності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Частина III. Агрегатно-модульне технологічне обладнання нового покоління, його оснащення та інструментальне забезпечення. /Під заг. ред. Ю.М. Кузнєцова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003. – 507 с.
2. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування : навч. посібник для студ. вищих техн. навч. закладів / С.Г. Бондаренко. – Львів : Магнолія, 2007. – 567 с.
3. Данильченко Ю., Довбуш Ю. Автоматизована обробка круглограм конструктивних і технологічних елементів шпиндельного вузла // Вісник Тернопільського приладобудівного інституту.– 1996.– № 2.– С. 72-75.
4. Данильченко Ю.М., Петров С.В. Детермінована математична модель вихідної точності шпиндельного вузла на опорах кочення // Вісник Тернопільського державного технічного університету.– 2002.– Т.7.– № 3.– С. 53-60.
5. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
6. Дослідження технологічної спадковості шорсткості поверхні титану під час двостадійного оброблення методами торцевого фрезерування та фемтосекундного лазерного текстурування / С. С. Добротворський, Є. В. Басова, Б. О. Алексенко, Д. В. Трубін, П. Завадзький, М. Кошцінський. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2024. № 2(57). С. 67–77. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2\(57\)-67-77](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2(57)-67-77)
7. Дядюра К. О., Юнак А. С. Зниження негативної технологічної спадковості виготовлення деталей енергетичного обладнання на основі синергетичного підходу // Сучасні технології в промисловому виробництві:

матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції.– Суми: Сум ДУ, 2012. – С. 60-61.

8. Економічні та організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. Навчальне видання / Укладачі: Скляренко І.В., Лебедева Л.В., Романюк Л.М.– Кіровоград: КДТУ, 2001.– 36 с.

9. Заблоцький В. Ю. Формування показників якості поверхонь деталей машин в контексті технологічної спадковості // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2015 року – Тернопіль: ТНТУ, 2015 – Том 1.– С. 140-141.

10. Залога В.О., Дядюра К.О., Нагорний В.В. Спадкові принципи формування якості складних машинобудівних виробів при самоорганізації процесів проектування, виготовлення та експлуатації: монографія.– Суми: Сумський державний університет, 2012. – 347 с.

11. Кузін О. А., Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів // Technology Audit and Production Reserves. 2015. Т. 1, № 1(21). С. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37678>

12. Ламнауер Н. Ю. Забезпечення високої точності лінійних розмірів деталей на основі ймовірносно-статистичних методів оцінки якості обробки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І. Я. Новосад. – Харків, 2018. – 36 с.

13. Ламнауер Н. Ю. Управління якістю технологічного процесу обробки деталей за параметром точності лінійного розміру ймовірносно-статистичними методами // Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, (29 червня – 1 липня 2017 р.): Матеріали конференції.– Київ: 2017. – С. 243-245.

14. Лиман Ф. М., Власенко В. Ф., Петренко С. В. Вища математика : навчальний посібник. Стереотип. вид. Суми : Університетська книга, 2025.– 616 с. ISBN 978-966-680-230-9.

15. Лисенко О. В. Автоматичне управління процесами обробки : метод. реком. до викон. практ. робіт для студ. освітнього рівня «Магістр» спеціальності 131 "Прикладна механіка" / [уклад. О. В. Лисенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. - Кропивницький : ЦНТУ, 2020. - 64 с.

16. Лисенко О. В. Динамічна модель технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням компенсуючого пристрою // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. - Кіровоград: КНТУ, 2011. - Вип. 24, ч. 2. - С. 131-136.

17. Лисенко О. В. Модульні системи адаптації // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КІСМ. - Кіровоград : КІСМ, 1998. - Вип. 4. - С. 181-185.

18. Лисенко О. В. Підвищення точності обробки за допомогою модульних систем адаптації // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КДТУ. - Кіровоград: КДТУ, 2000. - Вип. 6. - С. - 38-40.

19. Лисенко О. Підвищення точності обробки різанням за допомогою модульних систем адаптації // Зб. наук. пр. КДТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, 2000. – Вип. 6. – С. 38-40.

20. Лисенко О., Рижиков С. Підвищення динамічної якості технологічної оброблювальної системи при точінні / Збірник праць молодих науковців ЦНТУ. – Вип. 8. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018. – С. 81-86.

21. Лисенко О.В. Розробка динамічної моделі технологічної оброблювальної системи точіння з урахуванням багатомасовості // Зб. наук. пр. КДПУ ім. м. Остроградського.– Кременчук, 2008.– Вип. 6. Частина 1.– С. 74-76.

22. Лисенко О.В., Петраков Ю.В. Прогнозування технологічної спадковості при токарній обробці // Вісник СумДУ. Технічні науки.– Суми, 2003.– № 2 (48).– С. 91-95.

23. Лисенко О. В., Ігнат'єв Є. С. Розробка інструментальних систем з адаптивним управлінням процесом обробки методом морфологічного аналізу // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. - Кіровоград: КНТУ, 2012. - Вип. 25, ч. 1. - С. 252-257.

24. Мельничук П. П. Технологія машинобудування : підручник / П. П. Мельничук, А. І. Боровик, П. А. Лінчевський. – Житомир : ЖДТУ, 2005. – 882 с.

25. Онкалюк О. І. Методи підвищення якості і продуктивності обробки деталі на багатоцільових верстатах / О. І. Онкалюк, Р. Ю. Муха, С. С. Заєць // Збірник тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 17-18 листопада 2016 року – Тернопіль: ТНТУ, 2016.– Том I.– С. 294-295.

26. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Ю.Є. Паливода, А.Є. Дячун, Р.Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

27. Петраков Ю. В., Лисенко О. В. Управління динамічними характеристиками технологічної оброблювальної системи при точінні (тези доповіді) // Машинобудування та металообробка – 2003 : тези доповідей Першої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Кіровоград, 17-19 квіт. 2003р. – Кіровоград : КДТУ, 2003.– С. 179-181.

28. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного управління в металообробці: Навч. посібник.– К.: ІЗМН, 1999.– 212 с.

29. Петраков Ю. В., Лисенко О. В. Управління динамічними характеристиками технологічної оброблювальної системи при точінні // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. КДТУ.- Кіровоград: КДТУ, 2003. - Вип. 12. - С. 41-48.

30. Петраков Ю. В., Лисенко О. В. Моделювання динамічних характеристик процесу токарного точіння // Зб. наук. пр. КДТУ. Техніка в с/г

виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, 2002.– Вип. 11.– С. 257-263.

31. Петраков Ю.В., Лисенко О.В. Моделювання частотних характеристик технологічної оброблювальної системи токарного верстата // Вестник НТУУ "КПИ", Машиностроение, 2002.– Вып. 43 – С. 79-83.

32. Колісніченко Я., Лисенко О. Моделювання та прогнозування впливу технологічної спадковості форми заготовки на якість точіння деталей // Збірник тез доповідей здобувачів вищої освіти LVII науково-технічної конференції, «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2026» 22-23 квітня 2026 року. Кропивницький: ЦНТУ, 2026. – С. 101-103

33. Стецько А. Забезпечення формування якості робочих поверхонь деталей машин механічною обробкою // Комп'ютерні технології друкарства. – 2014.– № 31.– С. 108-115.

34. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки: Підручник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612 с.

35. Струтинський В.Б., Даниленко О.В. Визначення динамічних властивостей пружної системи супорта токарного верстату за допомогою стохастичної математичної моделі // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту.– 1999.– № 10.– С. 22-27.

36. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів: монографія.– Житомир: ЖІТІ, 2002.– 570 с.

37. Технологія машинобудування : навчальний посібник для студ. спец. : 133 «Галузеве машинобудування», 015 «Професійна освіта (машинобудування)» та 131 «Прикладна механіка» / І. І. Назаренко, М. М. Ручинський, О. П. Дєдов, Є. О. Міщук. - Київ : Ямчинський О. В., 2024. - 164 с.

38. Швець, А. І. Технологічна спадковість при виготовленні деталей машин // Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 24–25 листопада 2021 р.). – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. – Т. 1. – С. 61.

39. Black J. T., Kohser R. A. DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing. 13th ed. Hoboken : Wiley, 2019.

40. Borchers F., Clausen B., Ehle L. C., Eich M., Epp J., Frerichs F., Hettig M., Klink A., Kohls E., Lu Y. та ін. The Influence of Former Process Steps on Changes in Hardness, Lattice and Micro Structure of AISI 4140 Due to Manufacturing Processes // Metals. 2021. Vol. 11, No. 7. Article 1102. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11071102>.

41. Brinksmeier E., Klocke F., Lucca D. A., Sölter J., Meyer D. Process Signatures – A New Approach to Solve the Inverse Surface Integrity Problem in Machining Processes // Procedia CIRP. 2014. Vol. 13. P. 429-434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.073>.

42. Brinksmeier E., Meyer D., Heinzl C., Lübken T., Sölter J., Langenhorst L. та ін. Process Signatures – The Missing Link to Predict Surface Integrity in Machining // Procedia CIRP. 2018. Vol. 71. P. 3-10.

43. Groover M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 7th ed. Hoboken : Wiley, 2021.

44. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing Engineering and Technology. 9th ed. Pearson, 2025.

45. Maximov J., Duncheva G., Anastasov K., Ichkova M., Daskalova P. Influence of Previous Turning on the Surface Integrity Stability of Diamond-Burnished Medium-Carbon Steel // Machines. 2025. Vol. 13, No. 9. Article 864. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13090864>.