

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

Навчально науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра Технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК 621.914.1

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Охріменко О.А.
«__» _____ 2023 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: Визначення методів зменшення вібраційного впливу при
фрезеруванні тонкостінних деталей

Виконав :

студент VI курсу, групи МТ-21мп

Ковтун Валентина Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник:

асистент, Шуплєцов Данило Костянтинович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, піб)

(підпис)

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання, піб)

(підпис)

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

Студент _____

Київ – 2023 рік

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

Навчально науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Охріменко О.А.

«___» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Ковтун Валентині Володимирівні

1. Тема дисертації «Визначення методів зменшення вібраційного впливу при фрезеруванні тонкостінних деталей»

Науковий керівник Шуплецов Данило Костянтинович, асистент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. №5127-с

2. Термін подання студентом дисертації «28» грудня 2023р.

3. Об'єкт дослідження: Технологічний процес обробки деталей з тонкими стінками

4. Вихідні дані: 1) Проблема обробки тонкостінних деталей. 2) Виникнення вібрацій при фрезеруванні лопаток турбін. 3) Обмеження жорсткості ТОС навним верстатом, оснасткою та інструментом. 4) Програмне забезпечення для аналізу даних. 5) Обладнання для вимірювання жорсткості елементів системи та визначення осьових сил різання.

5. Список завдань, які потрібно виконати: 1) Визначити жорсткість заданої ТОС. 2) Визначити ступінь впливу вібрацій на якість оброблюваної поверхні. 3) Розробити експериментальну установку для визначення осьових сил різання. 4) Розробити математичну модель розрахунку частоти роботи актуатора для протидії вібраціям, що виникають в процесі технологічного процесу різання. 5) Провести експериментальне дослідження з використанням розробленої установки та визначити ступінь зменшення вібраційного впливу на отримувану поверхню.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 1) Презентація в паверпоінт. 2) Фотозвіт виконання експериментального дослідження. 3) Графіки впливу.

7. Дата видачі завдання 01 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Визначення проблеми обробки тонкостінних деталей типу іпеліар при фрезеруванні на верстатах з ЧПК	18 жовтня 2023 р.	
2	Визначення ступеню впливу вібраційної складової	28 жовтня 2023 р.	
3	Розробка та адаптація математичної моделі	06 листопада 2023 р.	
4	Проектування експериментальної установки	20 листопада 2023 р.	
5	Проведення експериментального дослідження та підведення результатів дослідження	04 грудня 2023 р.	
6	Розробка та прорахунок стартап проєкту	18 грудня 2023 р.	
7	Представлення дипломного проєкту для попереднього захисту	Згідно графіку захистів	

Студент

Ковтун Валентина Володимирівна

Керівник

Шуплєцов Данило Костянтинівч

РЕФЕРАТ

Структура та об'єм роботи. Магістерська дисертація має 3 розділи, висновки, список літератури що була використана. Робота складається з 97 аркушів, 22 таблиць, 38 рисунків, 23 літературних джерела.

Актуальність теми. Вивчення та розробка методів зменшення вібраційного впливу при фрезеруванні тонкостінних деталей є необхідним напрямком досліджень, спрямованим на оптимізацію технологічних процесів та підвищення якості виробництва. Спершу, вібрації можуть призводити до втрати цільових геометричних параметрів, порушення рівномірності обробки та, в кінцевому підсумку, до дефектів виробів. Ефективні методи зменшення вібрацій допоможуть підвищити надійність обладнання та знизити витрати на його обслуговування. У контексті сучасних вимог до виробництва, де час та ресурси є важливими чинниками, впровадження ефективних методів зменшення вібраційного впливу може покращити продуктивність та скоротити час обробки, що в свою чергу призведе до економії коштів і підвищення конкурентоспроможності підприємства на ринку.

Мета та завдання. Мінімізувати вплив вібрацій під час обробки тонкостінних деталей фрезеруванням.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес обробки деталей з тонкими стінками.

Предмет дослідження. Вплив вібрацій на якість поверхні, що виникають при обробці тонкостінних деталей

Методи. Виконання моделювання експериментів та випробувань за допомогою спеціалізованих програм, використання різноманітних навчальних матеріалів з різних джерел в Інтернеті. Проведення практичних досліджень.

Ключові слова: Фрезерування, Тонкостінні деталі, Вібрації

Новизна результатів.

1. Дослідження, використовуючи програмне забезпечення.

2. Створення математичної моделі, яка вдосконалена завдяки підтвердженням фізичними експериментами характеристиками.

ABSTRACT

Structure and scope of work. The master's thesis consists of 3 chapters, conclusions, and a bibliography of used sources. The work includes 97 pages, 22 tables, 38 figures, and 23 literary sources.

Actuality of theme. The study and development of methods to reduce vibration impact during milling of thin-walled parts is a necessary direction of research aimed at optimizing technological processes and improving production quality. Initially, vibrations can lead to the loss of targeted geometric parameters, disruption of processing uniformity, and ultimately, to defects in products. Effective methods of vibration reduction will help increase the reliability of equipment and reduce its maintenance costs. In the context of modern production requirements, where time and resources are important factors, the implementation of effective methods to reduce vibration impact can improve productivity and reduce processing time, which in turn will lead to cost savings and increase the competitiveness of the enterprise in the market.

Purpose and tasks. To minimize the impact of vibrations during the milling of thin-walled parts.

Object of study. Impact of vibrations on surface quality during machining of thin-walled parts.

Subject of study. Improve the quality of thin walls of parts under conditions of limited resources.

Methods. Conducting simulation of experiments and tests using specialized software, utilizing various educational materials from different sources on the Internet. Carrying out practical research.

Keywords: Milling, Thin-walled parts, Vibrations

The novelty of the results.

1. Research using software.

2. Creation of a mathematical model improved by characteristics confirmed through physical experiments.

Скорочені позначення що будуть використовуватись у дисертації

МСЕ – метод скінченних елементів;

ШПФ (FFT) – швидке перетворення Фур'є (A fast Fourier transform);

ЕПД (ELSE) - енергії пружної деформації (Elastic strain energy);

ОМР – охолоджувально-мастильна рідина;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач;

МЕМС - мікроелектромеханічні системи;

INTEFIX - Інтелектуальні пристосування для виготовлення деталей з низькою жорсткістю (INTElligent FIXtures for the manufacturing of low rigidity components);

САПР (CAD) – Система автоматизованого проєктування (Computer-Aided Design).

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА ВИНИКНЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ	11
1.1 Фізична основа виникнення вібрацій.....	11
1.2 Основні види коливань у контексті системи верстат-інструмент-деталь.	12
1.3 Автоколивання як найпоширеніший вид вібрацій	14
1.4. Вібрації при фрезеруванні.....	16
1.5 Вплив вібрацій на якість обробленої поверхні тонкостінних деталей.....	17
1.6 Способи усунення вібрацій	18
1.7 Використання МСЕ в процесі обробки тонкостінних деталей	21
1.8 Використання простору станів для опису поведінки динамічної системи	22
1.9 Виявлення коливань у моніторингу процесу	24
1.9.1 Часовий діапазон	25
1.9.2 Частотний діапазон	26
1.10 Концепція одного із рішень мінімізації вібрацій.....	27
1.11. Вплив поверхневого демпфера на ударні випробування.....	29
1.12 Вплив поверхневого демпфера на фрезерування	32
1.13 Висновки вищевказаного методу	36
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СТРАТЕГІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	38
2.1 Вимоги виготовлення імелера	38
2.2 Механічна конструкція.....	41
2.2.1 Поступальний пристрій	42
2.2.2 Обертальний пристрій	44
2.3 Експериментальна установка	46

2.4 МСЕ-аналіз поступального пристрою	49
2.5 Розробка моделі	54
2.6 Моніторинг процесу.....	56
2.7. Вплив на процес	56
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТОНКИХ СТІНОК ІМПЕЛЕРА.....	63
3.1 Перевірка в процесі фрезерування	63
3.1.1 Визначення параметрів.....	63
3.1.2 Початкові дослідження.....	67
3.2. Виконання експерименту	71
3.2.1 Процес виконання:	72
3.2.2 Результати та спостереження.....	73
3.3. Висновки та перспективи	80
РОЗДІЛ 4. СТАРТАП-ПРОЄКТ	83
4.1 Опис ідеї проєкту	83
4.2 Аналіз здійсненності проєкту	85
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу	86
4.4 Розробка стратегії стартапу на ринку	91
4.5 Складання маркетингової програми стартапу	94
4.6 Висновок за розділом	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97

ВСТУП

Наразі у промисловості існує ряд факторів, які безпосередньо впливають на ефективність та якість обробки тонкостінних деталей під час фрезерування. Зменшення вібраційного впливу є важливим завданням в галузі виробництва, і особливо в контексті обробки тонких матеріалів воно стає визначальним для досягнення оптимальних результатів.

По-перше, тонкостінні деталі, як правило, вказують на високу точність та вимагають дбайливого обходження під час фрезерування. Вібрації можуть призводити до втрати цільових геометричних параметрів, порушення рівномірності обробки та, в кінцевому підсумку, до дефектів виробів.

По-друге, високий рівень вібрацій може впливати на тривалість служби обладнання, збільшуючи знос і підвищуючи ймовірність поломок. Ефективні методи зменшення вібрацій допоможуть підвищити надійність обладнання та знизити витрати на його обслуговування.

По-третє, у контексті сучасних вимог до виробництва, де час та ресурси є важливими чинниками, впровадження ефективних методів зменшення вібраційного впливу може покращити продуктивність та скоротити час обробки, що в свою чергу призведе до економії коштів і підвищення конкурентоспроможності підприємства на ринку.

Тому вивчення та розробка методів зменшення вібраційного впливу при фрезеруванні тонкостінних деталей є необхідним напрямком досліджень, спрямованим на оптимізацію технологічних процесів та підвищення якості виробництва.

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА ВИНИКНЕННЯ ВІБРАЦІЙ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ

1.1 Фізична основа виникнення вібрацій

Виникнення вібрацій у процесі металообробки, зокрема під час фрезерування, є складною і актуальною проблемою. Вона виникає несподівано і є однією з основних причин відмов при впровадженні технологічних переходів у сфері металообробки. Незважаючи на численні дослідження, автоколивання елементів динамічної системи верстата залишаються значним чинником, що ускладнює створення надійних технологічних рішень.

В умовах сучасного виробництва, верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) оснащені високотехнологічними системами управління вібраціями, які дозволяють до певної міри пригнічувати автоколивання. Проте це не є універсальним рішенням, адже ефективність таких систем не завжди ідеальна, і вони можуть бути недоступні для малих та середніх підприємств. Отже, проблема вібрацій у металообробці залишається важливою та невирішеною.

Машинобудівний сектор приділяє значну увагу вібростійкості верстатів. Це пов'язано з тим, що вібростійкість тісно корелює з жорсткістю обладнання, і обидва параметри визначають його продуктивність. Вібрації обмежують допустимі режими різання під час обробки матеріалів, включаючи швидкість та глибину різання. Вібрації можуть призвести до появи хвилястих або подрібнених поверхонь виробу, збільшення наклепу поверхневих шарів, погіршення точності обробки, нестійкості різального інструменту, порушення роботи верстата та його прискореного зносу. У випадку значних вібрацій часто доводиться припиняти роботу верстата.

При аналізі будь-якого коливального процесу важливо використовувати наукові терміни.

- Частота коливань, вимірювана у герцах, вказує на кількість коливань величини за секунду.
- Період коливань - це час, необхідний для одного повного коливання величини, вимірюваний у секундах.
- Амплітуда коливань визначає максимальне відхилення величини від її середнього положення.
- Розмах коливань - це відстань між крайніми положеннями коливаючої величини, що дорівнює подвоєній амплітуді.

Отже, фізична основа виникнення вібрацій у процесі металообробки полягає у динамічному взаємодії між різальним інструментом, оброблюваним матеріалом та характеристиками верстата, які взаємодіють з цими коливальними параметрами. Управління цими параметрами та їх оптимізація є ключовими для зменшення негативного впливу вібрацій на процес металообробки.

1.2 Основні види коливань у контексті системи верстат-інструмент-деталь

У контексті системи верстат-інструмент-деталь можна виділити основні види коливань, кожен з яких має свої причини:

1. Коливання, що передаються ззовні: Це коливання виникає внаслідок впливу зовнішніх чинників, таких як сусіднє ковальське обладнання, зубонарізні або зубообробні верстати, потужні двигуни та інші. У таких випадках частота коливань, викликаних різанням, співпадає з частотою або кратною частоти збуджуючих коливань. Це явище особливо актуальне при розташуванні верстатів на слабких підкріпленнях, галереях і подібних місцях. Заходами боротьби можуть бути усунення джерела коливань, переміщення верстата, посилення фундаменту та використання віброгасних прокладок.
2. Коливання, спричинені дисбалансом частин верстата: Такі коливання виникають через неврівноважені частини верстата, що обертаються з

високою швидкістю. У цих випадках відцентрова сила змінює напрям, викликаючи коливання. Частота коливань визначається кількістю обертів неврівноваженої деталі за секунду. Засобом боротьби є балансування елементів, які збуджують коливання.

3. Коливання, спричинені дефектами передач верстата: Неправильно нарізані, недостатньо змонтовані або зношені зубчасті колеса можуть призводити до виникнення періодичних сил, що передаються на підшипники, а отже, на шпиндель і станину верстата. Груба зшивка ременів, пульсація рідини в трубопроводах верстата та інші дефекти передач також можуть викликати вібрації. Боротьба полягає у виправленні дефектів передачі.
4. Коливання, викликані змінним перерізом зрізу або уривчастим характером процесу різання: Це коливання може виникати при обробці деталей з неправильними геометричними параметрами, такими як точіння ексцентричних шийок, стругання переривчастих поверхонь.

Для багатьох процесів механічної обробки характерною особливістю є виявлення переривчастого характеру різання. Серед таких процесів можна виділити фрезерування, протягування, довбання, а також роботу шліфувального кола, що нерівномірно затупився по периметру та інші. При цьому частота коливань зазвичай дорівнює або кратна частоті сили, що спричинює різання. Винятковою особливістю цього явища є його ускладнення внаслідок взаємодії цих вимушених коливань з автоколиваннями.

Виникнення коливань може легко пояснитися в усіх розглянутих випадках за наявності періодичної збурюючої сили. Такі коливання класифікуються як вимушені, оскільки вони виникають під впливом зовнішньої сили, яка періодично змушує систему зазнає коливань.

1.3 Автоколивання як найпоширеніший вид вібрацій

Автоколивання визначається як найпоширеніший вид вібрацій, який виникає під час експлуатації металорізальних верстатів. Цей процес, також відомий як "самозбудливе" або "автоколивальне" явище, характеризується можливістю збудження коливань, які не зменшуються в результаті впливу джерела енергії, що не має коливальних властивостей. Зв'язок між коливаним елементом та джерелом енергії визначається терміном "зворотний зв'язок".

У цих випадках зовнішня проява явища полягає в тому, що при обробці повністю врівноваженої деталі на ефективному верстаті з масивним фундаментом можуть виникати значні вібрації. Ці вібрації виникають миттєво з моменту початку різання та зникають при його припиненні. Таким чином, причина вібрацій лежить в процесі різання, і автоколивання виявляються більш частими та легкими при наявності зливної стружки. Значущим є той факт, що частота цих коливань залишається сталою при зміні швидкості різання в обмежених межах.

Початок автоколивань може бути "жорстким" або "м'яким". У випадку "жорсткого" початку коливання виникають внаслідок зміни сили різання, що виникає з різних причин, таких як нерівномірний припуск, наявність твердих включень у металі, нерівномірність руху механізму подачі та інші. Зміна сили різання призводить до виникнення коливань на повну силу, які підтримуються подальшими діями енергії приводу верстата. У випадку "м'якого" початку автоколивань, коливання зростають поступово від нуля, і їх збудження пов'язане з поведінкою металу перед передньою гранню у момент різання, де утворюється пластична "застійна" зона. Розмір та форма цієї зони залежать від ряду факторів та безпосередньо впливають на величину сил різання.

Дослідження вказують на те, що частота коливань не залежить ані від частоти коливань, ані від режиму різання, ані від геометрії інструменту.

Замість цього, вона визначається жорсткістю та масою технологічної системи верстата, зростаючи при підвищенні жорсткості і зменшенні маси. Амплітуда коливань, у відміну від частоти, залежить не тільки від маси і жорсткості коливальної системи, але також від матеріалу, який обробляється, геометричних параметрів інструменту та режимів різання. Постійні частоти та змінність амплітуди коливань при зміні умов різання свідчать про автоколивальну природу коливань.

Додатковим джерелом вібрацій є сліди ріжучих зубів на поверхні виробу. Ці сліди з'являються внаслідок поперечних коливань виробу, іноді мають крок, що рівний кроку протягання. Вібрації, які супроводжують протягування, мають негативний вплив на якість оброблених поверхонь і стійкість інструменту, оскільки унаслідок роботи з вібраціями утворюються кільцеві ризики при внутрішньому та поперечному протягуванні. Кільцеві ризики виникають через те, що протягання в радіальному напрямку має амплітуди, спрямовані в протилежні сторони протягання під час періодичних коливань. Розмір рисок визначається діаметром зубів протягання, розмахом поперечних коливань і опором, який забезпечує коливальне тіло середовищем.

Частота вимушених коливань під час протягування залежить від частоти коливань каретки протяжних верстатів, яка дорівнює їхній власній частоті і визначається масою каретки та жорсткістю гідроприводу. У результаті періодичної зміни навантаження на пружну систему верстата при входженні зубів в метал і виходженні з нього здійснюються відповідні зміщення системи верстата в поздовжньому та радіальному напрямках.

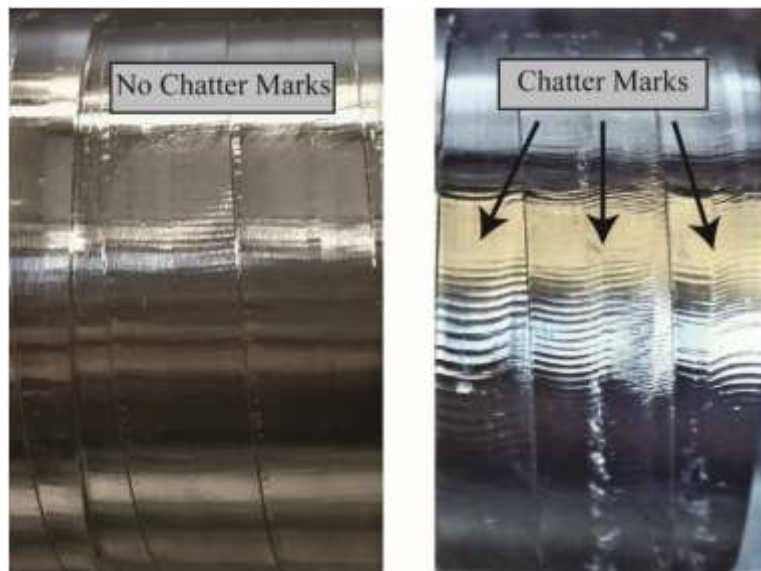


Рис. 1. Поверхня обробки за наявності автоколивань

1.4. Вібрації при фрезеруванні

Під час фрезерування відбувається прояв різноманітних видів вібрацій. Основні серед них - вимушені коливання, обумовлені конструктивними особливостями верстата, та автоколивання, які є домінуючими в процесі фрезерування. Інші види коливань виникають через змінний перетин стружки, варіації припуску, нерівномірну кількість активних зубів інструмента, змінені кути різання та інші фактори.

Автоколивання у системі виникають через випадкові впливи, такі як поштовхи при початковому врізанні фрези чи вирізуванні нерівномірного припуску. Ці впливи порушують рівновагу пружної технологічної системи, що призводить до змін товщини зрізаного шару. Зміна сили різання внаслідок відхилень у товщині зрізу спричиняє автоколивання, які спочатку є власними гаснучими, але з часом перетворюються на неамортизовані. Енергія, що підтримує ці коливання, генерується синхронно, але фазовано відносно сили різання. Це призводить до появи вібраційних слідів на обробленій поверхні, які посилюють систему коливань.

При багатолезовому різанні реальних поверхонь завжди відбувається обробка вже раніше контактованої з іншими ріжучими елементами поверхні.

Інтенсивність коливань зростає значно протягом перших чотирьох-п'яти обертів інструменту, коли поверхня стикається з численними зубами фрези.

Важливим є визначення областей стійкого різання для забезпечення оптимальних умов обробки, що покращують якість оброблюваних поверхонь. Енергія, що підтримує коливання під час роботи на фрезерних верстатах, часто виникає внаслідок переривчастого різання. Частота цих коливань може бути рівною або кратною частоті порушуючих сил. Особливий ризик виникає, коли частота коливань наближається до частоти власних коливань системи або її окремих елементів.

Раціональний вибір режимів різання, геометричних параметрів інструменту та інших технологічних факторів важливий для усунення вібрацій при фрезеруванні. Серед усіх параметрів режимів різання найбільший вплив на інтенсивність автоколивань мають глибина та ширина фрезерування. Зі збільшенням глибини різання зростає кут контакту фрези з оброблюваною деталлю, що призводить до залучення більшої кількості зубів і збільшення загальної ширини шару металу, який зрізається.

1.5 Вплив вібрацій на якість обробленої поверхні тонкостінних деталей

Вплив вібрацій на якість оброблюваної поверхні є значним, особливо при виробництві тонкостінних деталей. Вібрації, викликані процесом обробки або присутні в матеріалі, можуть призводити до небажаних деформацій, особливо в довгих і тонких структурах. Це може включати зміни в розмірах та формі деталі, порушення точності виробництва та погіршення загальної якості поверхні.

Також важливою є деформація виробу через необхідність його затискання і корекцію положення під час обробки. Низька жорсткість тонкостінних деталей може підвищувати ризик нестабільних станів процесу через неконтрольовані вібрації. Ці вібрації, включаючи автоколивання та

зовнішньо викликані, можуть негативно впливати на стабільність процесу і, як наслідок, погіршувати якість поверхні.

У виробництві застосовуються спеціалізовані інструменти, як-от довгі, тонкі фрези з кулястим кінцем, для мінімізації впливу вібрацій. Змінна швидкість різання уздовж ріжучої кромки вимагає точного налаштування швидкості шпинделя. Попереднє моделювання інструменту та параметрів обробки може допомогти у передбаченні результативної поверхні.

Для боротьби з вібраціями та покращення стабільності виробництва, дослідники розробили різні підходи. Це включає використання активних п'єзоелектричних демпферів, пасивний вплив шляхом нанесення віскоеластичного шару, інтеграцію симуляторів у CAD/CAM-системи для врахування гнучкості та порушень поверхні, а також моделювання вібрацій інструменту та регенеративних вібрацій виробу.

Всі ці методи спрямовані на зменшення впливу вібрацій та підвищення точності і якості оброблюваної поверхні, що є ключовим для ефективного виробництва тонкостінних деталей.

1.6 Способи усунення вібрацій

Розглянемо основні стратегії протидії вібраціям типу автоколивань. Всі зазначені стратегії можна умовно класифікувати як технологічні та конструктивні. Технологічні стратегії включають в себе зміну параметрів різання та геометрії інструменту, тоді як конструктивні стратегії полягають у використанні спеціальних пристроїв та підвищенні жорсткості вузлів верстата. Перша група стратегій є більш доступною для реалізації, але інколи пов'язана зі зниженням продуктивності та погіршенням якості поверхні, а також може виявитися недостатньо ефективною. Друга група стратегій є більш трудомісткою, але водночас надає кращі та стійкіші результати.

До технологічних стратегій відносяться:

Зміна швидкості різання: Радикальне збільшення швидкості різання часто дозволяє усунути самозбуджені вібрації. Однак при дуже високих швидкостях можуть виникнути вібрації внаслідок дефектів передачі чи дисбалансу частин, які швидко обертаються, особливо значущих у тонкій розточці та інших методах обробки. У випадках обмежених можливостей інструменту та верстата доводиться знижувати швидкість різання.

Зміна подачі та глибини різання: Підвищення подачі при одночасному зменшенні глибини різання призводить до зниження вібрацій. Це впливає з того, що вібрації виникають легше у ширших і тонших стружках. Збільшення головного кута в плані та зменшення радіуса закруглення вершини різця також допомагають у зниженні вібрацій.

Зміна кутів різання: Підвищення переднього кута γ , спрямоване на зменшення зусиль різання, сприяє більш спокійній роботі. Зменшення заднього кута значно знижує низькочастотні радіальні коливання, але водночас збільшує високочастотні тангенціальні коливання.

Покращення чистоти робочих поверхонь інструментів та використання змащувальних рідин: Ослаблення вібрацій досягається за рахунок зменшення сил різання за допомогою покращеної чистоти робочих поверхонь інструменту та використання змащувальних рідин.

До конструктивних заходів відносяться:

Підвищення жорсткості всіх елементів системи верстат-інструмент-деталь: Збільшення жорсткості в усіх компонентах системи веде до ускладнення виникнення автоколивань та взагалі будь-яких вібрацій. Це обумовлено збільшенням частоти коливань системи та, відповідно, зменшенням інтенсивності (амплітуди) вібрацій. Важливо звертати увагу на усунення зайвих зазорів у підшипниках та напрямних, надійність кріплення деталі в патроні, різця – у різцетримачі, забезпечення малого вильоту інструменту, рівномірне прилягання повідця до хомутика, кулачків люнетів –

до деталі. Також важливий вибір оптимальних напрямів робочих рухів, при яких напрям дії складових зусиль різання буде найбільш сприятливим.

Розсіювання енергії коливань системи (демпфування): Вібрації зменшуються або припиняються, коли при стійкій амплітуді коливань загальна енергія згасання за рахунок приєднання додаткових демпферів переважає енергію збудження. Це практично досягається застосуванням різної конструкції віброгасників, таких як сухе або в'язке тертя, ударна дія або динамічні. Віброгасник або демпфер є пристроєм, який включається до коливальної системи та різко збільшує її згасання.

Оптимізація форми інструмента: Форму ріжучого інструмента можна оптимізувати для зменшення схильності до коливань. Наприклад, модифікація кромки інструмента в формі зубчастої геометрії може скоротити його властивість ковзання по поверхні заготовки.

Використання систем активного управління: Цей підхід включає в себе використання електронних систем керування, які реагують на коливання та автоматично коригують їх. Наприклад, можна встановити датчики для вимірювання коливань і автоматично регулювати параметри обробки з метою зменшення коливань.

Отже, відомі основні методи усунення вібрацій: зниження вібрацій на джерелі їх виникнення; зменшення вібрацій по шляху розповсюдження від джерела. Збільшення жорсткості технологічної системи, як за рахунок підвищення конструктивної жорсткості верстата в цілому, так і за рахунок збільшення жорсткості його окремих вузлів, відбувається під час виготовлення обладнання. Зниження вібрацій на шляху розповсюдження досягається за допомогою використання віброгасильних пристроїв ударної дії, динамічних, фрикційних, гідравлічних тощо, що суттєво зменшує рівень інтенсивності автоколивань. Також вібрацію можна усунути шляхом зміни швидкості або глибини різання, геометрії ріжучої частини інструмента, а

також правильним вибором параметрів різання та матеріалу заготовки, підбором нерівномірності шагу зуба інструмента та покращенням умов сходження стружки.

1.7 Використання МСЕ в процесі обробки тонкостінних деталей

Розбиття системи на скінченні елементи, які пов'язані між собою через визначені взаємозв'язки, є альтернативою складним диференціальним рівнянням та теоріям, що передбачають рішення для всієї системи в цілому. Чисельні засоби дозволяють ефективно виконувати необхідні окремі розрахунки для кожного елемента. Лі [1] та Столарські та ін. [2] описують необхідний підхід для чисельного виконання аналізу за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Процес аналізу структурно-механічної поведінки системи складається з таких етапів:

- Препроцесор:
 - Вибір типу елемента
 - Створення геометрії структури
 - Внесення даних про матеріал
 - Сіткування структури
- Рішення:
 - Розрахунок взаємозв'язків жорсткості між елементами
 - Об'єднання системних взаємозв'язків
 - Введення граничних умов (опори, навантаження тощо)
 - Рішення утвореної системи рівнянь
- Постпроцесор:
 - Розрахунок похідних величин, таких як напруження та деформації
 - Перевірка правдоподібності (графічне представлення та аналіз кількісних результатів)

Ця інформація служить лише для опису основного підходу при аналізі МСЕ. Сфера застосування МСЕ є дуже різноманітною. Наприклад, Леопольд та ін. [4] використовують МСЕ для розробки інтелектуального затискного елемента для оптимізованого виробництва деталей літаків, схильних до деформації. Езель та Алтан [3] застосовують МСЕ для симуляції процесів різання.

Важливість використання МСЕ в процесі обробки тонкостінних деталей полягає в здатності точно моделювати складні структурні взаємозв'язки і динамічну відповідь системи на різні види навантажень і умов. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми, такі як надмірні напруження та деформації, що можуть вплинути на якість та точність виробів. Застосування МСЕ сприяє кращому розумінню впливу процесних параметрів на властивості тонкостінних деталей, дозволяючи оптимізувати процес виробництва для досягнення вищої якості та ефективності.

1.8 Використання простору станів для опису поведінки динамічної системи

Як пояснює Лунце [22], динамічні системи можуть бути описані безпосередньо у часовому діапазоні за допомогою простору станів, як основного методу опису поведінки динамічної системи. Таким чином, не потрібно перетворення в частотний діапазон для розв'язання диференціальних рівнянь динамічних систем у часовому діапазоні та подальше зворотне перетворення у часовий діапазон. Це дозволяє ефективно описувати також нелінійні та часово-змінні системи, а також системи з багатьма змінними.

На відміну від методу частотного діапазону, в якому розглядається лише поведінка передачі між входом та виходом, у просторі станів акцент робиться на внутрішніх станах розглядуваної системи. У механічній системі станові змінні, такі як швидкість та положення, надають інформацію про енергію, що міститься у системі, у будь-який момент часу. У представленні станового простору з диференціального рівняння n -го порядку, яке описує

систему, формуються n диференціальних рівнянь першого порядку. Це дозволяє використовувати векторні диференціальні рівняння, що забезпечує ефективну числову обробку систем високого порядку. Рівняння 1 представляє диференціальне рівняння стану, а рівняння 2 - рівняння виходу.

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{b} \cdot u(t) \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \cdot [u(t)] \quad (1b)$$

, де $\underline{A}$ – матриця системи, $\underline{x}(t)$ – вектор стану, $\underline{b}$ – вектор входу, $u(t)$ – вхідний параметр

$$y(t) = \underline{c}^T \cdot \underline{x}(t) + d \cdot u(t) \quad (2a)$$

$$[y(t)] = [c_1 \dots c_n] \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + [d] \cdot [u(t)] \quad (2b)$$

, де $\underline{c}^T$ – вектор виходу, $\underline{x}(t)$ – вектор стану, d – прохідна величина, $u(t)$ – вхідний параметр

У векторі стану $\underline{x}$ міститься інформація про стани енергетичних накопичувачів у системі, наприклад мас і пружин. Динамічна поведінка системи визначається коефіцієнтами характеристичного рівняння у системній матриці $\underline{A}$. Вхідні параметри, такі як сили, визначені через u і впливають на систему за допомогою вектора входу $\underline{b}$. Результуюча вихідна величина у визначається з вектора виходу $\underline{c}^T$ і станів системи. Диференціальні рівняння n мас механічної системи, здатної до коливань, зв'язані жорсткістю, що вимагає одночасного розв'язання всіх диференціальних рівнянь.

Розв'язання може відбуватися шляхом перетворення в простір станів. Для цього відбувається зміна базису з фізичних до узагальнених координат. Таким чином, опис системи може відбуватися через її моди, які можуть бути ефективно чисельно визначені за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) і модального аналізу. Цей аналіз надає модальну матрицю (3), яка містить переміщення розглянутих вузлів системи для кожної власної частоти.

$$\underline{\Phi} = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

, де n – власні частоти, m – переміщення y_{ij} вузлів

Трансформація в простір станів відбувається шляхом множення транспонованої модальної матриці зверху на масову, демпфуючу та жорсткісну матриці диференційного рівняння руху розглянутої механічної системи. Зворотна трансформація станової моделі, створеної на цій основі, відбувається шляхом множення модальної матриці на її вектор виходу.

1.9 Виявлення коливань у моніторингу процесу

Виявлення коливань та їх розрізнення від бажаної поведінки системи може становити значний виклик, залежно від процесу та його умов. Вимірювання, здійснене за допомогою датчика, повинне дозволяти зробити висновки про стабільність процесу. Важливими чинниками можуть бути:

- Ланцюг вимірювань

Фізичний принцип вимірювання, позиція сенсора, метод та процедура вимірювання визначають характеристики, такі як чутливість, лінійність, частота дискретизації та роздільна здатність. Шляхи передачі, підсилювачі, фільтри та аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є додатковими факторами, які можуть бажано чи небажано впливати на сигнал вимірювання (затримки, мертві часи, зсув фаз, амплітуда тощо).

- Технологічне середовище

У промисловому середовищі, зокрема усередині виробничого обладнання, електромагнітна сумісність (ЕМС) усіх компонентів відіграє важливу роль. Крім зовнішніх перешкод, таких як механічні коливання інших машин, можуть також впливати підшипники, приводи, режими роботи чи заблоковані осі машини. Навіть у двох однакових машинах через знос компонентів або виробничі допуски на виготовлення можуть виникнути різні сигнали.

- Процес

Постійне занурення під час токарної обробки відрізняється в сигналі від, наприклад, переривчастого різання під час фрезерування. Шорстке та точне оброблення, навіть одним і тим самим інструментом, можуть викликати різні сигнали через різні умови втручання та сили різання. Крім того, енергія процесу, позиції осей (тип переміщення, розташування осей), параметри процесу, знос інструменту або використана стратегія фрезерування можуть впливати на сигнал вимірювання.

Задача моніторингу процесу полягає в методі розділення характеристик з отриманого сигналу вимірювання та їх класифікації для оцінки стану процесу. Більшість методів базуються на аналізі зібраних даних у часовому або частотному діапазоні.

1.9.1 Часовий діапазон

У часовому діапазоні зміни амплітуди сигналу вимірювача, такого як датчик сили або мікрофон, можуть дати інформацію про стан процесу. Жорсткі граничні значення використовуються для оцінки змін амплітуди. Мьорінг та ін. [19] постійно відстежують середній квадратичний корінь амплітуд сигналів від датчиків сили та вихрових струмів протягом визначеного часового проміжку, щоб вчасно виявити знос інструменту під час фрезерування. Через переривчасте різання у процесі фрезерування формується періодичний перебіг сигналу (частота зубцевого зачеплення).

Аперіодичні компоненти сигналу можуть бути ознакою нестабільних станів. За допомогою методів кореляційного аналізу можна виявляти ці зміни в сигналі.

При автокореляції, як зазначено в [20], значення сигналу x залежно від часу t порівнюються з попередніми значеннями на визначеній відстані τ . Автокореляційний коефіцієнт ρ визначається наступним чином:

$$\rho_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{T-\tau} (x_{i+\tau} - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^T (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Автокореляційний коефіцієнт ρ_{τ} є мірою схожості двох послідовних частин сигналу і тому підходить для оцінки стабільності процесу. Подібний підхід представили Шмітц та ін. [21]. Тут статистично оцінюється відхилення аудіосигналів від процесу фрезерування під час кожного оберту шпинделя, і при появі аперіодичних компонентів робиться висновок про наявність коливань.

1.9.2 Частотний діапазон

Перетворення сигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) (5) або Лаплас-перетворення (6), як описано у Лунце [22], дозволяє використовувати методи частотного та спектрального аналізу.

$$X(\omega) = F\{x\}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

$$X(s) = \Lambda\{x\}(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt, s \in \mathbb{C} \quad (6)$$

За допомогою ШПФ, яке є модифікацією дискретного перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform - DFT), можна представити стаціонарні періодичні компоненти сигналу з їх відповідними амплітудами по частоті. Таким чином, можуть бути виявлені несподівані або небажані частоти під час виробництва.

Спектрограми додатково дозволяють часове розділення інформації про частотні компоненти в сигналі, отримані за допомогою ШПФ. Наочно

кажучи, ці частотні спектри представляють собою послідовність однаково великих частин сигналу. Це дозволяє візуалізувати зміни частот у часовій послідовності процесу.

Аналогічно до автокореляції в часовому діапазоні (4), у частотному діапазоні Power-Spectral-Density – спектр густини потужності (PSD) надає інформацію про розподіл енергії по частотах.

1.10 Концепція одного із рішень мінімізації вібрацій

Мінімізація вібрацій при обробці тонкостінних конструкцій вимагає розробки та оцінки альтернативних або спеціалізованих рішень для поверхневого демпфування з наступних причин:

- Частоти, які потрібно гасити під час обробки тонкостінного корпусу, не завжди відповідають одному з його резонансних режимів.

Як вивчено [5], домінуючі частоти на тонкостінних деталях під час фрезерування можуть залежати від обсягу видаленого матеріалу (наприклад, радіальної глибини a_e при периферійному фрезеруванні):

- (I) для менших значень a_e основною є власна частота інструмента під час контакту з ріжучим зубцем, тоді як під час періоду неконтакту найголовнішою є власна частота заготовки;
- (II) для більших значень a_e домінуючою є власна частота інструмента.

Таким чином, при фрезеруванні тонкостінних деталей необхідно мінімізувати не лише резонансні вібрації деталі, але й вимушені резонансні вібрації інструмента.

- Діапазон частот, які слід демпфувати під час обробки, зазвичай становить до 10 кГц і залежить від жорсткості динаміки з'єднань [6], тому запропонована система демпфування повинна бути ефективною в широкому діапазоні частот.

Враховуючи вищезазначені фактори, було запропоновано нове рішення для демпфування поверхні, змодельоване та перевірене на тонкостінному корпусі (рис. 1), який повторює деякі особливості справжнього аерокосмічного компонента, як описано в [11].

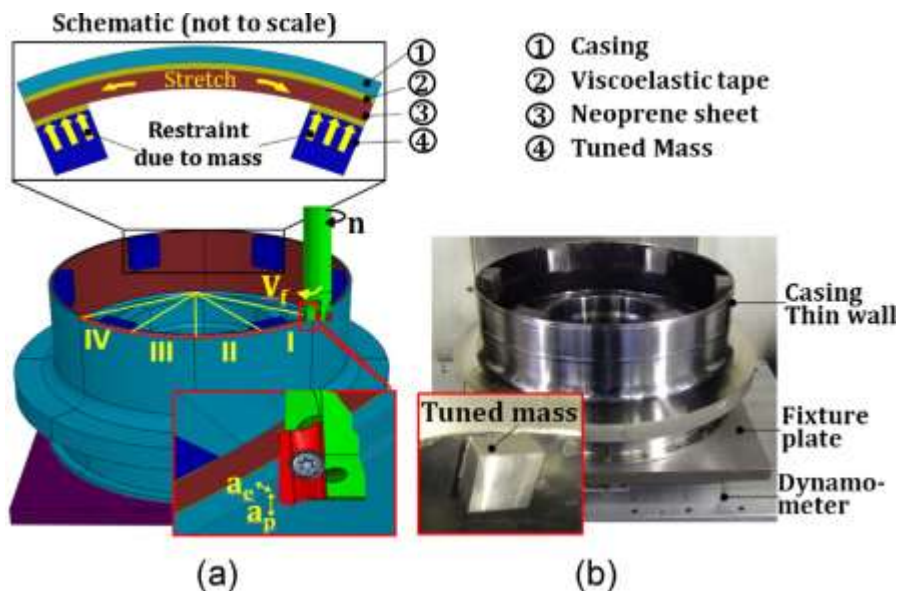


Рис. 2. Концепція рішення демпфування поверхні (а) і тестовий приклад (б).

Запропоноване рішення для зменшення впливу ударів включає гнучкий в'язкопружний шар підкладки, наприклад, виготовлений з неопрену. У конкретних місцях до цього шару прикріплені дискретні маси, які були визначені аналізом результатів випробувань на удар і МСЕ. Функції шару підкладки включають відповідь до будь-якої геометрії деталі та забезпечення амортизації. Цей шар може бути закріплений на тонкостінному корпусі за допомогою в'язкопружної або відповідної клейкої стрічки.

Прикріплені маси не лише додають масу до заготовки, що збільшує інерційні сили, але також закріплюють підкладку в проміжних точках, дозволяючи їй розтягуватися під час вібрацій. Таким чином, вони надають жорсткості заготовці. Це рішення сприяє поліпшенню всіх трьох характеристик системи кріплення (маса, жорсткість і демпфування) і є компактним, що робить його важливим у випадках, коли використання складного кріплення неможливе через особливості деталей.

Ефективність запропонованого рішення демпфера оцінюється за допомогою випробувань на збудження удару і підтверджується відповідними обчислювальними моделями. Для відповіді на вимоги промислової обробки, такі як утворення виступів на тонкій стінці, проводиться периферійне фрезерування на різних секторах корпусу. Це виконується для продемонстрування ефективності запропонованого нового підходу.

1.11. Вплив поверхневого демпфера на ударні випробування

Науково підтверджено [5], що при невеликих глибинах різання в процесі фрезерування тонкостінних структур динамічно визначаються режими заготовки. Оскільки цей аспект розглядається в цьому науковому дослідженні, що стосується чистового фрезерування, демпфуючий підхід для оболонки оцінюється шляхом використання МСЕ та експериментально підтверджується тестуванням ударним молотком. Тонкостінний корпус (зображений на рис. 2), який використовується у цьому дослідженні, виготовлений із Waspaloy і має наступні параметри: товщина стінки - 2,5 мм, висота - 95 мм, зовнішній діаметр - 365 мм. Зазначено, що велика маса в нижній частині корпусу (82 кг) має модальну активність лише у тонкій стінці корпусу (4 кг). Таким чином, в даному дослідженні динамічна відповідь вимірювалася лише для цієї частини тонкої стінки.

Waspaloy — це міцний сплав на основі нікелю, який піддається старінню, має відмінні властивості міцності при температурах приблизно 980°C (1800°F). Інші характеристики Waspaloy включають гарну стійкість до корозії, а також відносно несприйнятливості до окислення, що робить його добре придатним для експлуатації в екстремальних умовах.

Експерименти з ударним молотком були проведені у трьох конфігураціях: без будь-якого демпфування; з використанням в'язкопружинного демпфування, що базується лише на гнучкому еластичному листі (позначено як 2 і 3 – рис. 2а); з посиленням демпфуванням

маси, де на гнучкому листі був закріплений набір мас, налаштованих на домінуючі режими після монтажу листа (позначено як 2, 3 і 4, – рис. 2а). Результати випробувань ударним молотком в цих конфігураціях представлені на рис. 3 (блакитні криві).

Конфігурація 1 – Відсутність демпфування: з рис. 3а можна спостерігати, що корпус без демпфування має значну кількість близько розташованих режимів, які простягаються до вищих частот (15 кГц).

Конфігурація 2 – Демпфування на основі в'язкоеластичної поверхні: фіксація неопренового листа товщиною 3 мм за допомогою стрічки на корпусі має помітний ефект на демпфування високочастотних режимів (рис. 3b); відзначається зменшенням прискорення приблизно на два порядки. Цей ефект демпфування, швидше за все, зумовлений неопреновим листом та, до певної міри, в'язкопружною стрічкою. Тим не менше, низькочастотні режими, які зазвичай частіше збуджуються під час обробки, не були повністю піддані демпфуванню.

Конфігурація 3 – Демпфування з посиленням жорсткості маси: у цьому дослідженні додаткові маси були налаштовані на перший основний режим заготовки (після монтажу неопрену) при 1260 Гц, як видно на рис. 3b. Також можна помітити, що ці маси переважають у сигналі прискорення на рис. 4, отриманому під час фрезерування (як обговорюється далі). Вага кожної маси була адаптована з урахуванням двох аспектів: необхідності гасіння режимів у широкому діапазоні частот та забезпечення достатньої маси для виступів як якоря для гнучкого листа в точках закріплення, тим самим забезпечуючи його розтягування. З урахуванням цих важливих аспектів на тонку стінку було закріплено шість мас по 0,2 кг кожна (5% від віброуючої маси, 4 кг) (рис. 2).

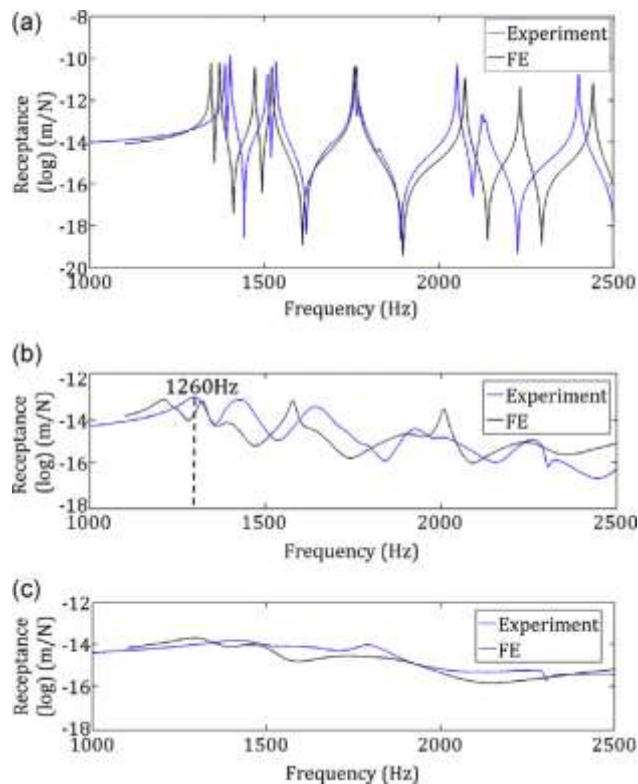


Рис. 3. Результати ударного випробування тонкостінної обсадної труби в порівнянні з прогнозами МСЕ в таких умовах: (а) без демпфування; (б) з неопреновим листом; (с) з неопреновим листом і налаштованими масами.

Динамічний відгук корпусу у конфігурації 3, який включає неопреновий лист та маси, представлений на рис. 3с, демонструє ефективне демпфування всіх сусідніх режимів, крім цільового, завдяки високому відношенню мас демпферів. Також варто відзначити, що основна частота зазнала зсуву через введення додаткової маси. Необхідно відзначити, що вплив на відповідь, спричинений додаванням маси, супроводжується незначним відносним зменшенням амплітуди в порівнянні з використанням одного неопренового листа (Конфігурація 2), ефект відносної зменшення амплітуди в конфігурації 3 був лише на рівні одного порядку. Це пояснюється тим, що вібрація, викликана ізольованим ударом, швидко припиняється завдяки структурній амортизації корпусу та неопрену. Таким чином, вплив жорсткості, зумовлений розтягуванням неопрену, не має значущого значення для виникнення одиночного удару.

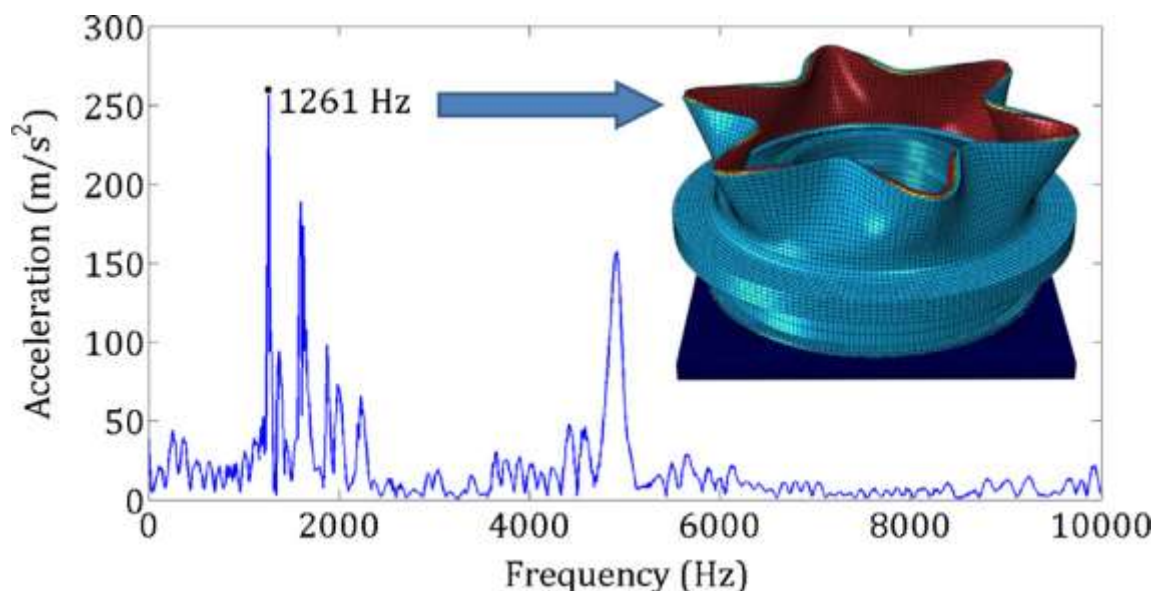


Рис. 4. ШПФ сигналу обробки обсадної труби з неопреном, що показує домінуючий режим і форму для можливості вибору рішення демпфування.

1.12 Вплив поверхневого демпфера на фрезерування

Проведення перевірки запропонованого рішення для демпфування в умовах, що наближаються до промислових, включало периферійне фрезерування тестової тонкостінної оболонки. Одночасно був проведений аналіз частотного вмісту сигналів прискорення, отриманих під час фрезерування, за допомогою перетворення Фур'є для визначення основних режимів, які сприяють вібрації. Параметри фрезерування були вибрані таким чином, щоб відображати промислові умови в діапазоні значень ($a_p = 0,5\text{--}2$ мм; $a_e = 0,5\text{--}2$ мм) за постійної швидкості різання ($V_c = 40$ м/хв) і подачі на зуб ($f_z = 0,1$ мм/зуб). З метою аналізу частотного вмісту сигналу для одного оберту інструменту, прискорення та силу різання одночасно вимірювалися під час обробки в одному квадранті обшивки в чотирьох секторах (див. I–IV, рис. 2). Розділення на чотири сектори було обрано через велику кількість даних з високою частотою дискретизації ($10^6/\text{с}$), що дозволяло отримати більшу частотну роздільну здатність спектру. Зменшення вібрацій під час обробки обсадної труби було кількісно визначено за допомогою

середньоквадратичного значення отриманого сигналу, яке представлено на рис. 5 під час обробки квадранта II для трьох конфігурацій.

Аналіз показав, що зменшення вібрацій на обсадній трубі при застосуванні лише в'язкопружного поверхневого демпфування (Конфігурація 2) виявилось незначним (тільки в 1,63 рази) порівняно з недемпфованою конструкцією (Конфігурація 1). Це може бути пов'язано з тим, що, відмінно від одноразового удару, енергія різання неперервно надходить до заготовки через вимушену вібрацію під час різання інструментом.

У той час, як при використанні мас (Конфігурація 3) вібрація тонкостінної оболонки під час фрезерування зменшилася приблизно в 4,2 рази. Як вже зазначалося, це головним чином пов'язано з ефектом додаткової маси, який поєднується з підвищеною жорсткістю, забезпечуваною розтягуванням шару неопрену між двома масами, доповнюючи демпфування, викликане стисненням самого шару неопрену. Розтягування листа неопрену між двома масами можна спостерігати за енергією пружної деформації, яка моделюється за допомогою МСЕ і розвивається в листі з масами та без них (рис. 6).

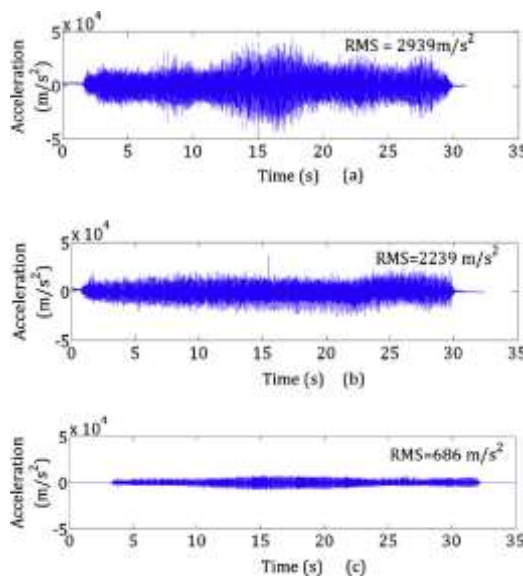


Рис. 5. Приклади вібраційних сигналів при фрезеруванні тонкостінної обсадної труби: (а) незатухаючі; (b) з неопреновим листом; (с) з неопреном і 6 налаштованими масами ($a_p = 2$ мм, $a_e = 0,5$ мм).

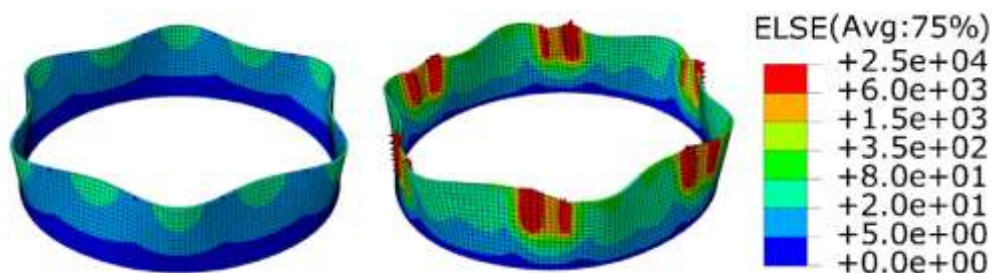


Рис. 6. Карта енергії пружної деформації (ELSE) листа неопрену для форми першого режиму без (ліворуч) і з масами, встановленими на корпусі (праворуч).

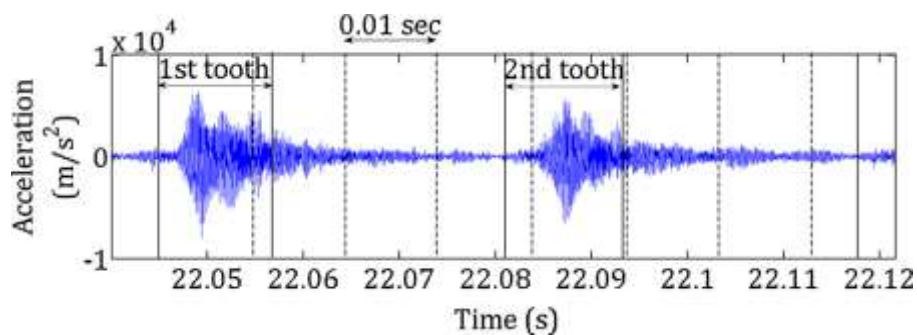


Рис. 7. Секції, на яких ШПФ беруться для сигналу прискорення.

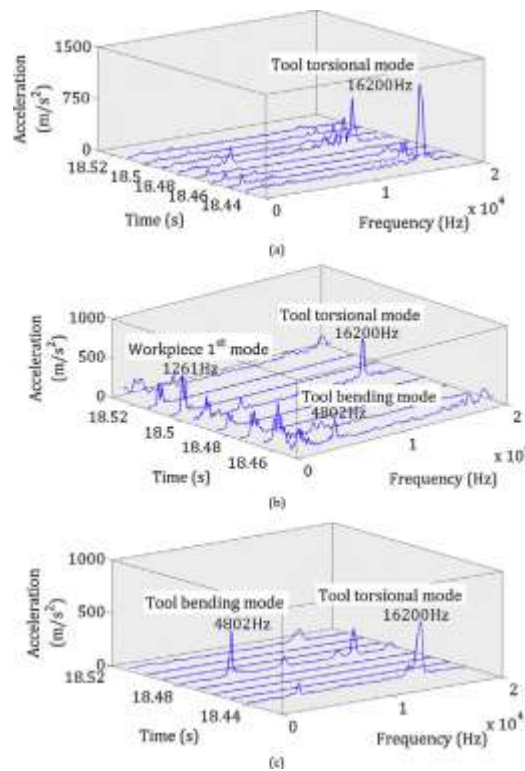


Рис. 8. Частотні спектри для одного оберту інструменту: а – незатухаючий; (b) неопреновий лист; (c) неопреновий лист із 6 налаштованими масами.

Для дослідження вмісту частот в вібраційному сигналі обробки використовувалось ШПФ через рівновіддалені ділянки, як показано на рис. 7, під час одного оберту інструменту. Цей тип частотно-часового аналізу надає більш точне уявлення про зміну частот під час обробки, зокрема, коли зуб зачеплюється та залишає розріз.

На рис. 8а частотні спектри чітко відображають домінуючу присутність торсійного моду інструменту (16 200 Гц), що визначається результатами аналізу МСЕ інструменту. Це переважаюче вібрування інструменту виникає внаслідок вимушеної вібрації, наданої інструментом тонкостінному корпусу. Прикріплення неопренового листа до корпусу (Конфігурація 2) виявилось ефективним у демпфуванні більшості високочастотних режимів заготовки (рис. 8b), залишаючи певні низькочастотні режими заготовки (1260 Гц, як показано на рис. 3b), а також режими інструменту. Викликані інструментом режими зазнали зменшення амплітуди, можливо, завдяки динамічному

співвідношенню мас налаштованої конфігурації. Встановлення шести налаштованих мас (Конфігурація 3) не тільки послабило всі режими заготовки (рис. 8с), але й зменшило амплітуду викликаних інструментом режимів, ймовірно, через високий коефіцієнт мас налаштованих мас. Крім того, жорсткість, яку надає тонкій стінці завдяки доданій масі та жорсткості, робить зв'язок режиму згинання інструменту (4802 Гц) із заготовкою значущим. Це вказує на важливість оптимізації маси та жорсткості для тонкостінної стінки з метою мінімізації вібрацій у нерезонансних ситуаціях (з форсованою частотою інструменту), коли демпфування (наприклад, в'язкопружне та неопренове) виявляється недостатнім.

1.13 Висновки вищевказаного методу

Основними перевагами викладеного методу демпфування є наступне:

- його можливість використання на складних вузлах, таких як загороджувальні частини, наприклад водопровідні лінії;
- можливість монтажу на всій конструкції або на вібруючій панелі;
- відповідність складним геометричним формам;
- швидке нанесення на заготовку без будь-яких механічних або хімічних пошкоджень.

Ефективність запропонованого методу демпфування була вивчена шляхом проведення випробувань на динамічний удар і фрезерування. У першому випадку він був використаний для визначення ефективності демпфування резонансів заготовки, в другому - для оцінки наявності зв'язаних коливань між заготовкою та інструментом.

Виявлено, що гнучкий (неопреновий) лист виявляється ефективним у гасінні високочастотного вмісту вібраційного сигналу через свої динамічні властивості (коефіцієнт втрат), залишаючи низькочастотні елементи незаглушеними. Встановлення мас на гнучкому листі не лише покращує масу конструкції, але також збільшує жорсткість корпусу через розтягування

гнучкого листа. Під час випробувань на динамічний удар, пікова реакція недемпфованої обсадної труби була зменшена на два порядки за допомогою неопренового листа та на один порядок з масами. Зниження ефективності з масами може бути наслідком вже достатньої ефективності демпфування структурного демпфування неопрену під час збудження одиночним ударом.

У реальних випробуваннях механічної обробки запропоноване рішення амортизації виявило значне зменшення вібрації, приблизно в 4,2 рази порівняно з установкою лише гнучкого листа, індикуючи на важливість покращення маси та жорсткості тонкостінних конструкцій у випадках вимушеної вібрації інструменту. Цей випадок важливий для високотехнологічних галузей, таких як авіаційні двигуни, де вимагається обробка тонкостінних корпусів за високими стандартами якості поверхні.

Однак, цей метод гасіння вібрацій у тонкостінних конструкціях, хоча й ефективний у певних умовах, має обмеження. Його ефективність знижується у нерезонансних ситуаціях, де вібрації, викликані обробкою і інструментом, не вдається компенсувати за допомогою традиційних методів демпфування. Вимога точної оптимізації маси та жорсткості ставить під сумнів універсальність цього підходу, особливо у випадках, коли змінні умови обробки вимагають швидкої адаптації. Крім того, збільшення виробничих витрат та ускладнення процесів можуть зробити цей метод менш привабливим для широкого застосування, зокрема в умовах обмеженого бюджету або термінів виробництва.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ТА СТРАТЕГІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1 Вимоги виготовлення імпелера

На Рисунку 9 представлено імпелер, який був досліджений у рамках проекту INTEFIX. Багато досліджень у цьому проекті пов'язані із створенням адаптронної установки, яка виникла з потреби оптимізації виробництва імпелера за допомогою п'яти осевого фрезерування. У Таблиці 1 наведені основні параметри для виготовлення цього імпелера.



Рис. 9а. Імпелер з матеріалу EN AW 7075



Рис. 9б. Доступність та умови затискання

Таблиця 1: Специфікації для виробництва імпелера

Матеріал заготовки	EN AW 7075 (3.4365)
Розміри заготовки	(205 × 205 × 70) мм (Д × Ш × В)
Товщина лопатей	від 0,8 мм до 3 мм
Маса деталі	<3 кг (порожній)
Процес виготовлення	Фрезерування (чорнова, чистова та фінішна обробка)
Виробниче обладнання	П'ятиосьовий фрезерний верстат
Інструмент	Кульова фреза з радіусом від 4 мм до 12 мм (2 - 4 зуба)
Затиск	Муфтова оправка

На Рисунку 9б також показано доступність імпелера для фрезерного інструмента та затискні поверхні, які утворюються в результаті затискання за допомогою муфтової оправки. Таким чином, для інтелектуального держателя заготовки, згаданого у проєкті, виникають такі вимоги:

Підвищення продуктивності

Об'єм обробленого матеріалу за одиницю часу має бути збільшений за допомогою цього пристрою, шляхом виявлення нестабільних станів процесу та активного їх пригнічення або зменшення їх впливу. Будь-яка необхідна зміна параметрів процесу має позитивно впливати на якість виробництва та продуктивність. Весь процес, що складається з чорнового фрезерування, чистового та фінішного оброблення як сухої обробки або з використанням охолоджуючо-мастильної рідини (ОМР), має відбуватися без витрат часу на перезатискання. Процесно-релевантні характеристики, такі як гнучкість системи, не повинні негативно впливати на пристрій.

Сумісність

Пристрій повинен мати можливість утримувати імпелер з характеристиками, перерахованими у Таблиці 1. Він має бути інтегрованим у звичайну п'ятиосеву фрезерну машину для виробництва імпелера. Пристрій

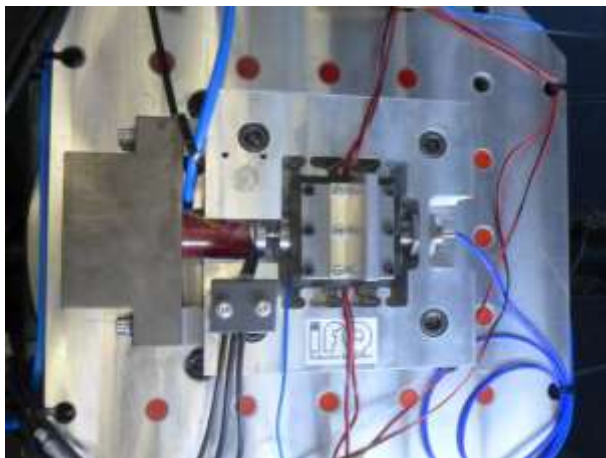
має бути встановлений на стіл машини або на палетну систему. Щоб забезпечити зміну палети з встановленим пристроєм та мінімізувати обмеження робочого простору машини, бажана компактна конструкція, пристосована до класу машини. Крім того, дизайн має бути таким, щоб пристрій виконував функцію часто необхідного для виробництва імелера підстави. Установка пристрою має бути ергономічною та швидкою для оператора машини. За необхідності енергетичне та медійне забезпечення та їх інтерфейси для підключення повинні бути пристосовані до стандартів промисловості.

Гнучкість

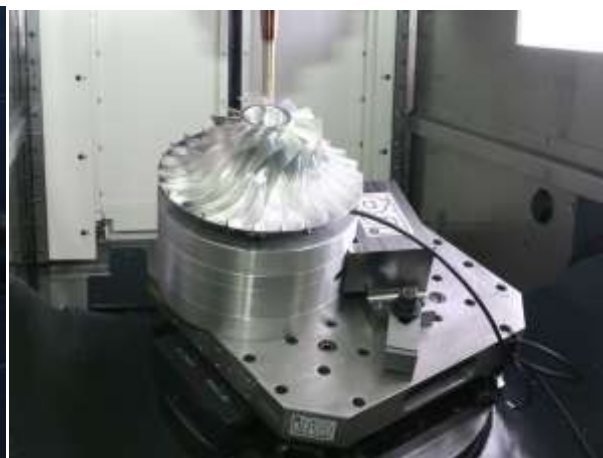
Пристрій має бути розроблений таким чином, щоб забезпечити швидку заміну між різними виробничими установками. Таким чином, додаткові функції та властивості пристрою ефективно доповнюють весь парк машин. Пристрій має бути максимально автономним у забезпеченні та управлінні, інтеграція в систему керування машини є опціональною. Опціональний апаратний та програмний інтерфейс для керування машиною дозволяє оптимізувати налаштування до процесу. Також має бути можливим виробництво інших деталей, типових для класу машини. Зокрема, система сенсорів та її інтеграція мають бути пристосовані до обробки тонкостінних структур. Через малі сили різання під час процесу вимагається висока чутливість для виявлення нестабільних станів та розрізнення їх від фонового шуму.

Ці вимоги стосуються використання інтелектуального держателя заготовок у промисловому середовищі. Різні прототипи та експериментальні установки використовуються для перевірки можливості реалізації та розробки такого пристрою. Нижче представлені найважливіші дослідження двох пристроїв, розроблених у рамках проекту INTEFIX. Конструкції, показані на Рисунку 10, представляють послідовні етапи розвитку. Поступальний пристрій дає можливість ефективно та структуровано

досліджувати процес і функціонування майбутнього пристрою. Обертальний пристрій вже є попереднім етапом бажаного тримача заготовки.



(a) Поступальний пристрій



(б) Обертальний пристрій

Рис.10. Прототипи для тестування функціональності та дизайну інтелектуального тримача заготовки

2.2 Механічна конструкція

Наявність трьох твердотільних шарнірів і опорі без тертя забезпечують відсутність зазору, що дозволяє оптимально використовувати порівняно невеликий хід п'єзоактуатор, приблизно 40 мкм. Підвищення відхилення за допомогою спеціального розташування та розробки твердотільних шарнірів, не реалізовано у перших прототипах. Попередній натяг системи служить для захисту приводу від розтягуючих навантажень і зменшує ефект виникаючого відставання через контактні поверхні та гнучкість у системі. Для уникнення пошкодження приводу від зсувних навантажень використовуються спеціальні підшипники. Через хороші обробні властивості та відносно низьку густину і, відповідно, низьку масу, прототипи виготовлені з алюмінію EN AW 7075.

Необхідний компроміс між високою жорсткістю та динамічними властивостями, адаптованими до процесу, вимагає використання МСЕ для економії часу та ресурсів під час розробки. Наприклад, Рисунок 11 показує перші чотири власні частоти як результат числового модального аналізу

поступального пристрою. Пристрій розроблений так, щоб коливання, внесені процесом, не впливали негативно на його структурно-динамічну поведінку. Третя власна частота при 3926 Гц показує режим, який включає рух пристрою, проте припускається, що ця частота під час виробництва активується з невеликою енергією. Власні частоти при 1365 Гц, 2501 Гц та 5971 Гц показують перші моди згинання та кручення ідеалізованого лопаті імпелера. На Рисунку 12 аналогічно представлені перші дві власні частоти та моди справжнього імпелера.

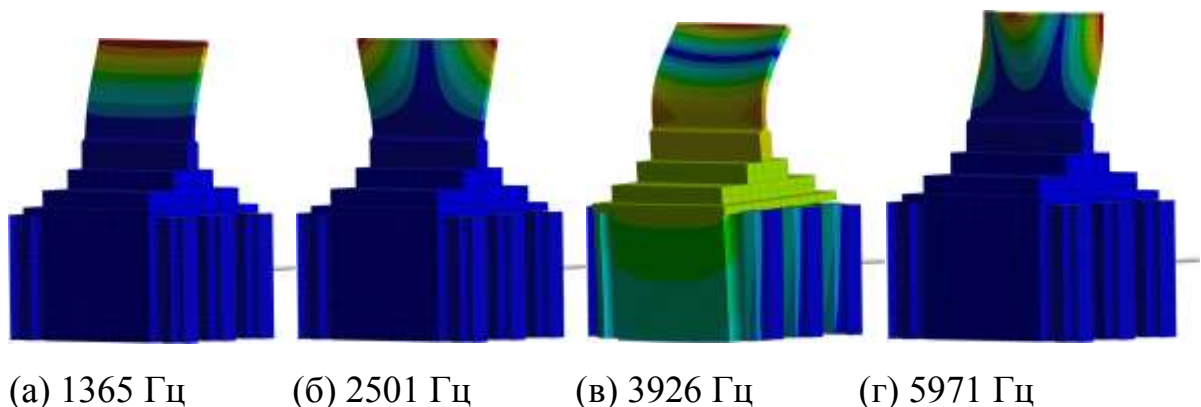


Рис. 11. Перші чотири власні моди поступального пристрою з ідеалізованою лопаттю.

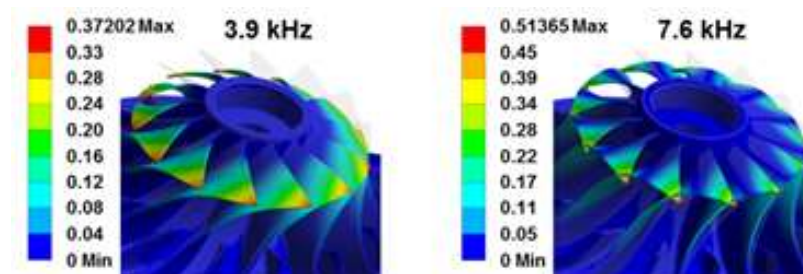


Рис. 12. Перші дві власні частоти імпелера

2.2.1 Поступальний пристрій

В підрозділі 1.5 "Вплив вібрацій на якість обробленої поверхні тонкостінних деталей" описані виклики, пов'язані з їх обробкою. Для того, щоб відокремити збурювальні чинники в процесі виробництва і ефективно тестувати різні стратегії активації, процес спочатку спрощується до виготовлення плити однорідної товщини. Ця ідеалізована лопать імпелера зображена на рисунку 13. Спрощене лезо лопаті монтується на рухомий стіл

пристрою за допомогою гвинтових з'єднань. Між столом і деталлю знаходиться система сенсорів для моніторингу процесу. Додаткова сенсорика використовується для контролю поведінки системи і оцінки процесних сенсорів. Рух столу за допомогою привода здійснюється у напрямку, протилежному основному напрямку руху власних форм коливань лопаті. Привід натягується за допомогою ярма, див. рисунок 14. В цьому одновимірному випадку відмовляються від використання додаткової пружини, яка діє в протилежну сторону до п'єзоактуатора. Відновлення положення рухомого столу здійснюється за рахунок еластичності твердотільних шарнірів, які з'єднані з нерухомою рамою. Рама має отвори на кутах і може бути встановлена на столі верстата у робочій зоні машини.

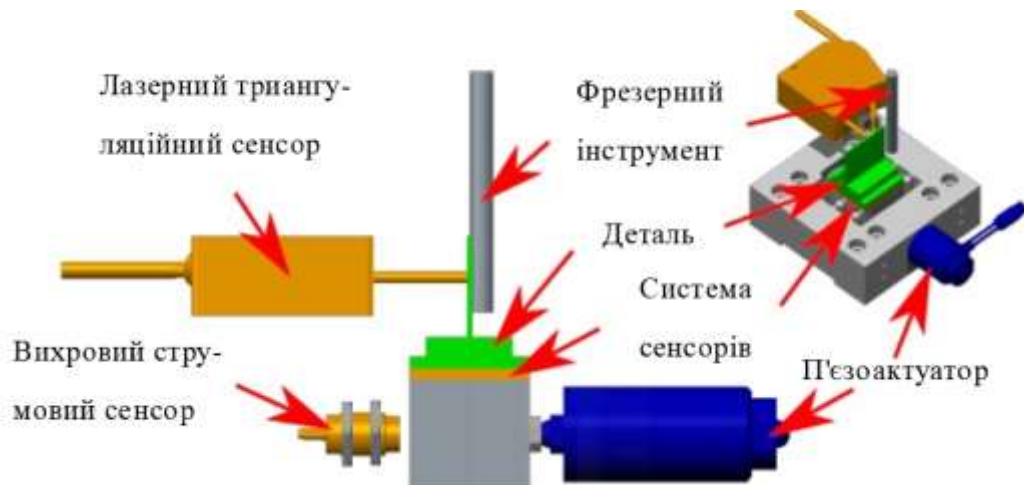


Рис. 13. Структура поступального пристрою

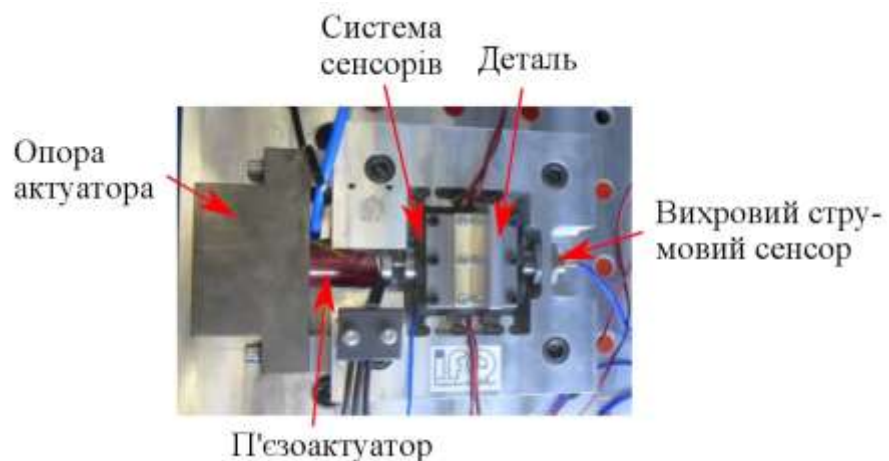
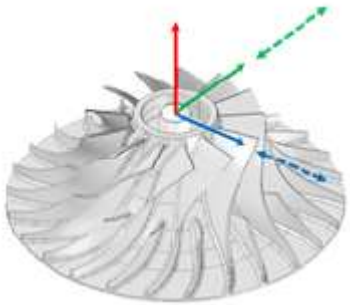
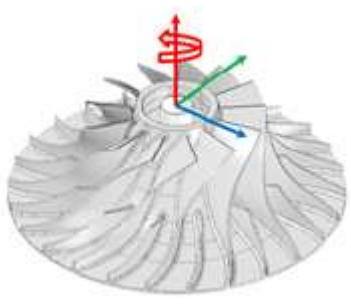
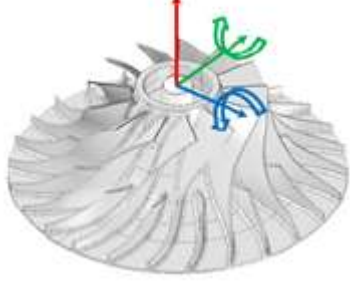


Рис. 14. Поступальний пристрій на робочому столі верстата

2.2.2 Обертальний пристрій

П'ятиосева обробка імпелера призводить до різних ситуацій взаємодії між інструментом та деталлю. Для того, щоб ефективно втручатися в процес у кожній ситуації за допомогою цілеспрямованого руху деталі, поступальний рух тільки в одному ступені свободи може бути недостатнім. На таблиці 2 показані можливі принципи введення в дію імпелера для підтримання стабільного виробничого процесу.

Таблиця 2 - Варіанти приведення в дію імпелера.

		
Поступальний привід з двома ступенями свободи	Обертальний привід з одним ступенем свободи	Обертальний привід (поворот) з двома ступенями свободи

Рух деталі відбувається завдяки нашаруванню дій двох приводів, що діють перпендикулярно один до одного. У обертальному пристрої рух деталі здійснюється лише одним приводом. Це має перевагу, оскільки пристрій може бути компактніше, оскільки потребує менше простору для інтеграції. Крім того, це дозволяє заощадити на додатковому вартісному приводі та необхідному для його роботи обладнанні. Обертальний пристрій також виконує функцію часто необхідного для обробки робочого стола. На рисунку 15 показаний перший етап розробки ротаційного пристрою. Окрема затискна плита, яка кріпиться на обертальному столі, утримує імпелер. Поєднання системи кріплення з нульовою точкою дозволяє швидко змінювати деталь з високою точністю позиціонування, але це також означає додаткову масу. МСЕ показує, що в цьому першому концепті ротаційна вісь пристрою не збігається з основою імпелера.

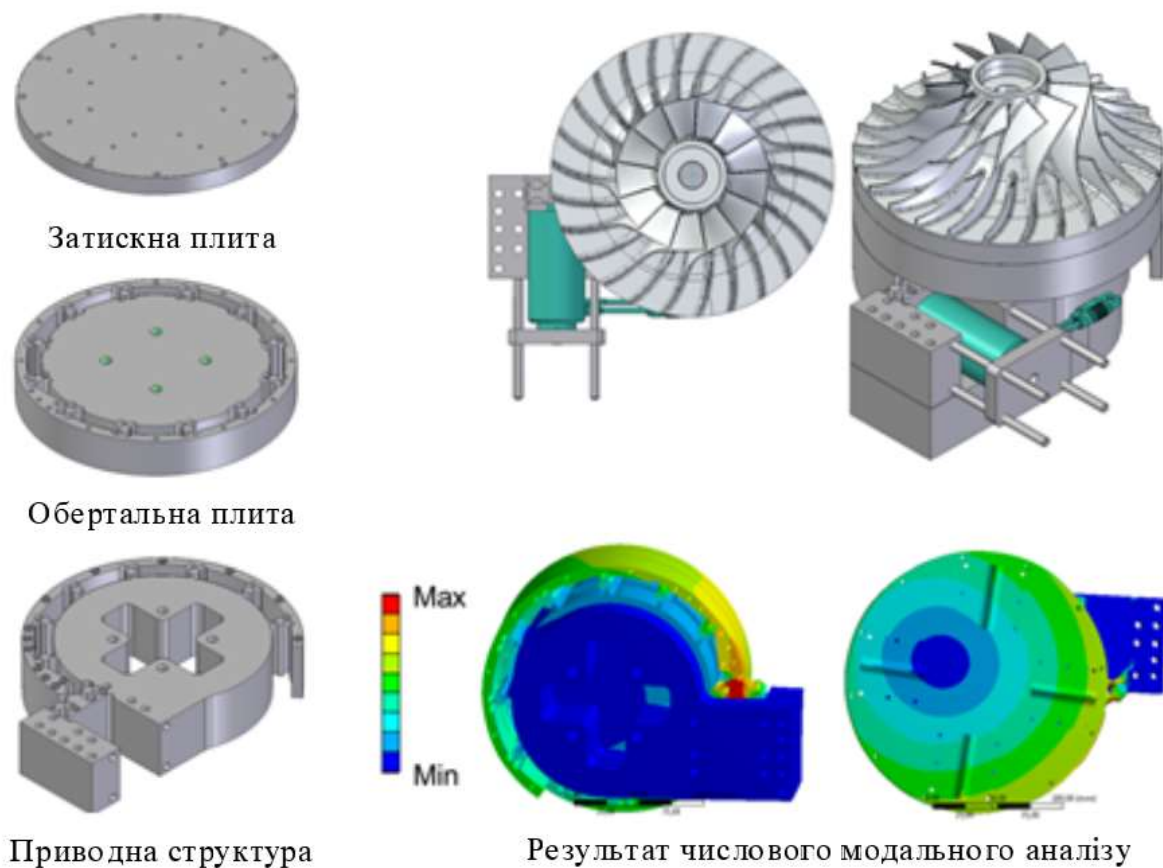


Рис. 15. Перший етап розробки конструкції обертального пристрою

Це призводить до недоліку, що активація не може відбуватися рівномірно по всьому периметру імпелера. Поступова оптимізація механічної конструкції МСЕ призводить до створення пристрою, який зображений на рисунку 16. Імпелер затискається на рухомому столі в центрі пристрою за допомогою втулкового затискача. Рухомі частини конструкції оптимізовані з урахуванням малої маси, але достатньої жорсткості. Обертання через активацію відбувається навколо осі обертання імпелера. У порівнянні з початковим проектом, у фінальному концепті привід максимально інтегрований у структуру пристрою. У реалізованому прототипі розмір необхідного для напруження приводу все ще дуже великий. Це надає гнучкість при необхідності використовувати альтернативні приводи для протидії. Для максимізації доступності для фрезерного інструменту під час виробництва, бажана повна інтеграція приводу у розумний тримач деталі.

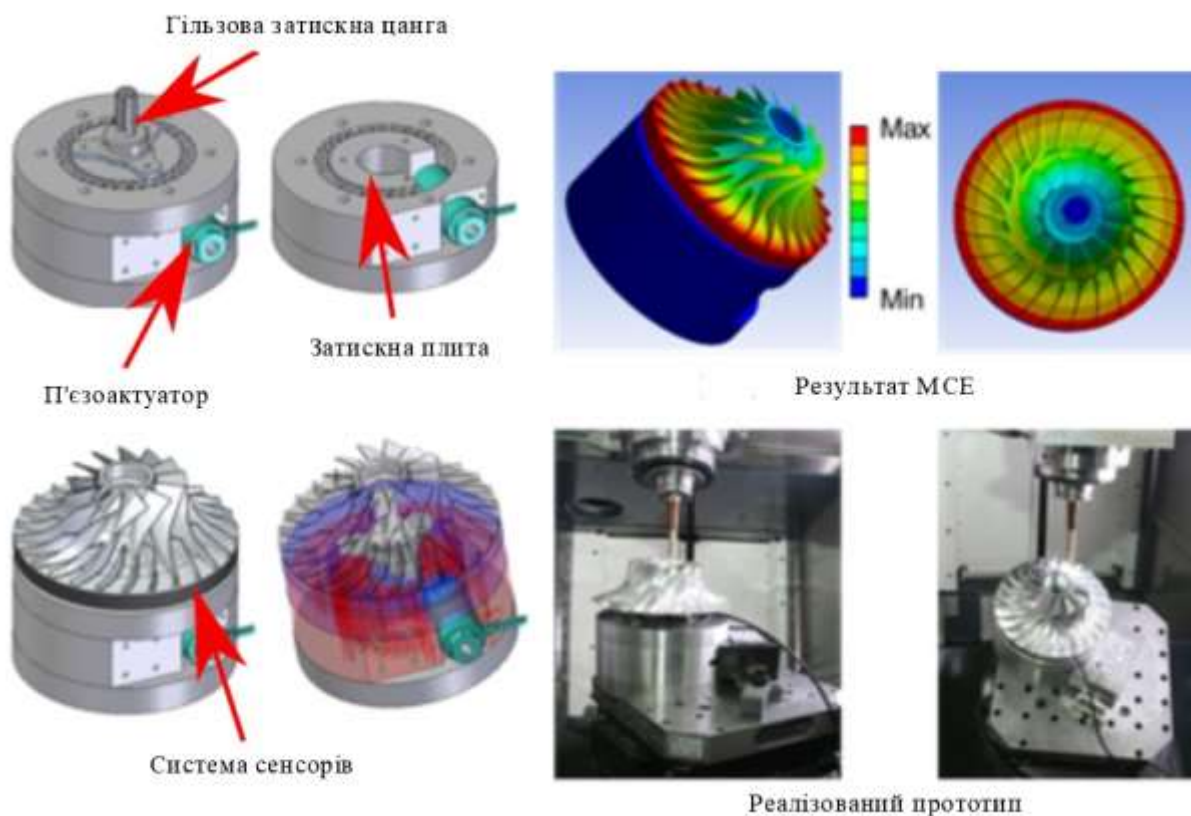


Рис. 16. Остаточна концепція механічної конструкції обертального пристрою

2.3 Експериментальна установка

Вся установка для проведення випробувань описана нижче, див. Рис. 17. Виробничий процес відображається лінійно за допомогою фрезерного верстата DMG Mori HSC 55. Це дозволяє здійснювати високошвидкісну обробку з п'ятьма синхронно керованими осями, спроектованими як лінійні прямі приводи з двома поворотними осями в комбінації "стіл-стіл". Максимальна частота обертання шпинделя потужністю 22 кВт (28 000 об/хв) забезпечує високу швидкість різання навіть при невеликих діаметрах інструменту. Зв'язок і обмін даними з числовим програмним керуванням (ЧПК) і програмованим логічним контролером (ПЛК) можливий за допомогою існуючих інструментів програмування та програмних бібліотек.



(а) Передавальний пристрій на столі верстата (б) Обертальний пристрій на столі верстата

Рис. 17. Інтеграція розроблених пристроїв у фрезерний верстат

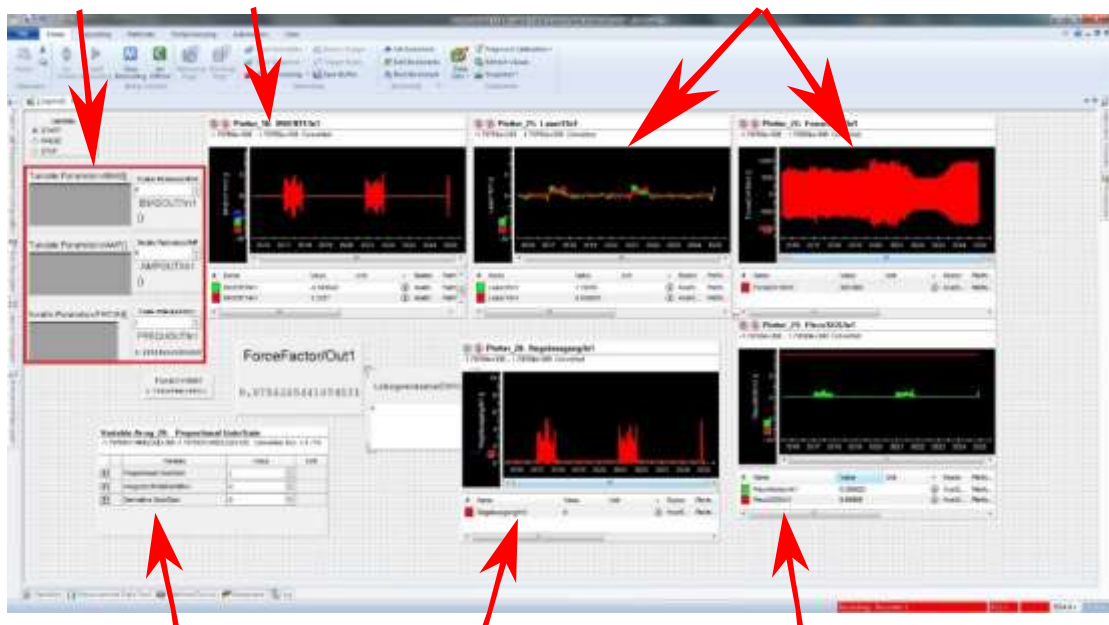
Розроблені пристрої встановлені на столі із системою кріплення з нульовою точкою, завдяки чому їх можна швидко та з точною позицією інтегрувати у робочу зону фрезерного верстата. Для гнучкого розроблення пристроїв та моніторингу досліджень використовуються відповідні лабораторні прилади для забезпечення, обміну даними та обробки даних. Ці прилади розташовані поза дослідною машиною та з'єднані з пристроями усередині відповідно адаптованої фрезерної машини за допомогою ліній для енергії, даних та системи охолодження та блокування повітря. На рисунку 18 грубо накреслений весь вигляд. Зліва схематично зображено поступальний пристрій у розрізі та спрощено до основних компонентів.



Рис. 18. Схематичне зображення обладнання

Енергопостачання окремих компонентів, а також обладнання для кондиціонування сигналу не показано для зручності огляду. Збір та обробка даних відбуваються за допомогою комбінації вимірювального комп'ютера та платформи Rapid Prototyping DS1103 компанії dSPACE. На комп'ютері, наприклад, розробляються структури керування в Simulink і безпосередньо генерується програмний код для Electronic Control Unit – контролера (ECU) системи dSPACE. Це забезпечує можливість реального часу та запуску розроблених алгоритмів для пізніше використовуваних контролерів. За допомогою АЦП відбувається прийом сигналів датчиків та видача керуючих сигналів, як-от сигнал попереднього підсилювача для п'єзоактуатора через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП). Для візуалізації та моніторингу даних датчиків та керування пристроєм використовується Graphical User Interface – графічний інтерфейс користувача (GUI), див. рисунок 19. Цей інтерфейс також дозволяє зберігати дані вимірювань та впливати на параметри, такі як, наприклад, регулятор під час процесу.

Керування актуатором Моніторинг розробленої системи сенсорів Візуалізація додаткової сенсорики



Параметризація Візуалізація Моніторинг актуатора керування/регулювання

Рис.19. Графічний інтерфейс користувача для моніторингу та керування пристроєм

У розумному тримачі деталей передбачені лише площинні перетворювачі як система датчиків для моніторингу процесу. Як показано на рисунку 18, у цьому дослідженні також використовуються вихрострумові датчики, датчики сили, акселерометри, мікроелектромеханічні системи (МЕМС) та лазерні триангуляційні датчики, щоб оцінити поведінку пристрою.

2.4 МСЕ-аналіз поступального пристрою

МСЕ-аналіз поступального пристрою було реалізовано за допомогою програмного забезпечення ANSYS. Для кращого розуміння описано виконані для цього робочі кроки та налаштування програми у розділах препроцесора, рішення та постпроцесора. У підрозділі 1.7 "Використання МСЕ в процесі обробки тонкостінних деталей" ці кроки МСЕ-аналізу детально пояснені.

Перший крок полягає у імпортуванні 3D-моделі, раніше створеної за допомогою CAD системи. Геометрія оптимізована для економії часу та ресурсів під час обробки в ANSYS. Як показано на рисунку 20, поступальний пристрій спрощений до деталі, системи сенсорів, привода, рухомого столу та шарнірних з'єднань. Приєднувальні поверхні шарнірних з'єднань, як інтерфейси до сталої рамної структури пристрою, в програмі визначені як фіксовані опори. Точки контакту між окремими компонентами оголошені як з'єднання. Для аналізу зафіксовані матеріальні властивості кожного компонента, такі як модуль Юнга, міцність на розтяг та коефіцієнти демпфування. У ANSYS можна вказати демпфінг за Релеєм. Демпфінг Релея ґрунтується на тому, що розподіл демпфування схожий на розподіл маси та жорсткості системи. Матриця демпфінгу Релея D_{Ray} визначається, як показано в рівнянні нижче.

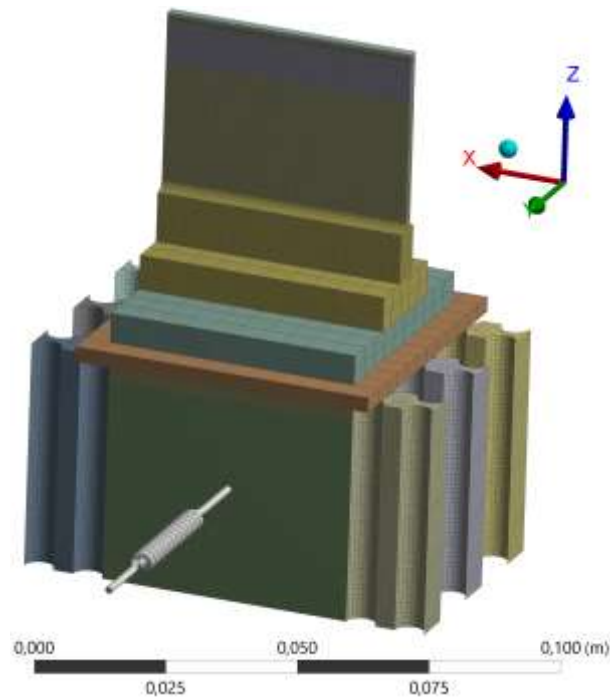


Рис. 20. Оптимізована геометрія з зачепленням

$$D_{Ray} = \alpha_{Ray} * M + \beta_{Ray} * K \quad (7)$$

де матриця маси M та коефіцієнт α_{Ray} описує масопропорційне, зовнішнє демпфування структури
матриця жорсткості K та коефіцієнт β_{Ray} визначає жорсткісно пропорційне, внутрішнє демпфування системи.

Для визначення коефіцієнтів за допомогою експериментального модального аналізу визначаються власні частоти, див. рисунок 21. Їхні ступені демпфінгу ξ визначаються за допомогою методу раціонального дробу полінома. У діапазоні між частотами f_1 та f_2 визначаються коефіцієнти демпфінгу за допомогою рівнянь:

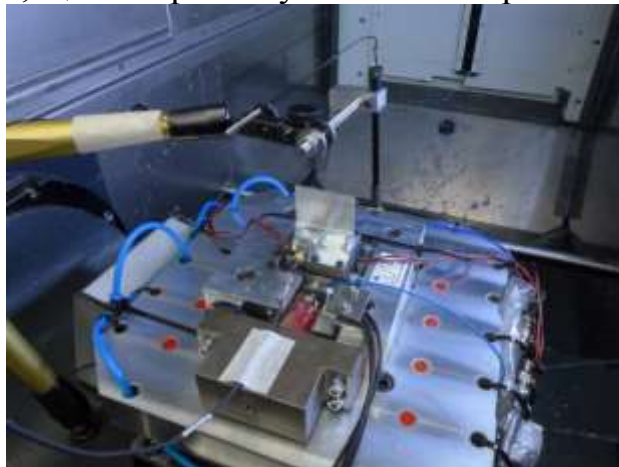
$$\beta_{Ray} = \frac{\xi}{\pi(f_1 + f_2)} \quad (8)$$

$$\alpha_{Ray} = 4\pi^2 f_1 f_2 \beta_{Ray} \quad (9)$$

Дискретизація CAD-моделі в скінченні елементи відбувається за допомогою створення сітки. На рисунку 20 видно відповідні параметри налаштувань – форму елемента та розмір або кількість елементів – у різних збірках. Створення сітки переважно використовує шестигранники.



(а) Імпульсні датчики удару та прискорення, що використовуються на обертальному пристрої



(б) Пусковий пристрій для керованого вхідного імпульсу

Рис. 21. Експериментальний модальний аналіз на розроблених пристроях

Тільки для компонентів із закругленнями використовується комбінація шестигранників та тетраедрів. Кількість елементів, а отже, і розмір елементів, адаптовано до динамічного навантаження або пізніше потрібної роздільної здатності для симуляції руху. Тому сітка в області шарнірних з'єднань та ідеалізованого лопаті імпелера була обрана дрібнішою. Для достатньої сітки необхідна кількість вузлів визначається за допомогою тесту на збіжність. Це робиться на основі результатів симуляції статичного навантаження пристрою. Кількість вузлів поступово збільшується, поки зміна результату не буде менше ніж 3%, і таким чином критерій збіжності задовольняється.

Для моделі важливі вузли, як от позиція використаних датчиків та точка прикладання сили п'єзоактуатора, визначаються вручну.

На рисунку 22 показаний результат статичного відхилення столу з силою привода 2250 Н, що відповідає силі реальних досліджень для

відхилення столу. Актуатор для симуляції в ANSYS визначено як пружину з попереднім натягом. Попередній натяг також відповідає дійсній силі попереднього натягу в пристрої, виміряній за допомогою інтегрованого датчика сили. Еквівалентна жорсткість пружини привода становить 200 Н/мкм за даними технічного паспорту. Статична жорсткість столу поступального пристрою становить 150 Н/мкм.

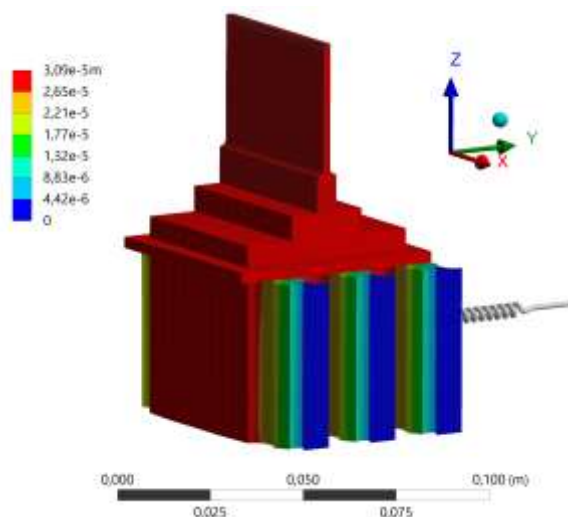


Рис. 22. Результат моделювання статичного навантаження передавального пристрою

Послідовне з'єднання актуатора та столу дає еквівалентну жорсткість пружини 85,7 Н/мкм. Слід враховувати додаткову податливість кріплення актуатора та його болтових з'єднань для правильного розрахунку в ANSYS. Виявлено, що відхилення у симуляції відповідає реально виміряному значенню близько 30 мкм. Результат симуляції також показує, що відхилення відбувається дуже рівномірно, без нахилу або скручування.

Кроки та визначення, описані в препроцесорі, призводять до систем рівнянь, які розв'язуються в ANSYS чисельно. На основі огляду виконаного МСЕ-аналізу, представленого на рисунку 23, цей крок детально пояснюється. Виконаний чисельний модальний аналіз (Modal) та аналіз частотної характеристики (Harmonic Response) базуються на результатах попередньо виконаного статично-механічного аналізу (Static Structural). Для розрахунку статично-механічного аналізу використовується прямий розв'язувач із

розрідженими матрицями. Використання розріджених матриць дозволяє економити пам'ять, тому це також використовується у чисельному модальному аналізі. Гармонічний аналіз, необхідний для валідації простору станів, надає частотну характеристику системи. Для її розв'язку використовуються повні системні матриці. Хоча цей метод вимагає більше пам'яті та обчислювальної потужності порівняно з використанням редукованих матриць або модальної суперпозиції - заснованої на результатах попередньо виконаного модального аналізу - він обіцяє більш точний і надійний результат.

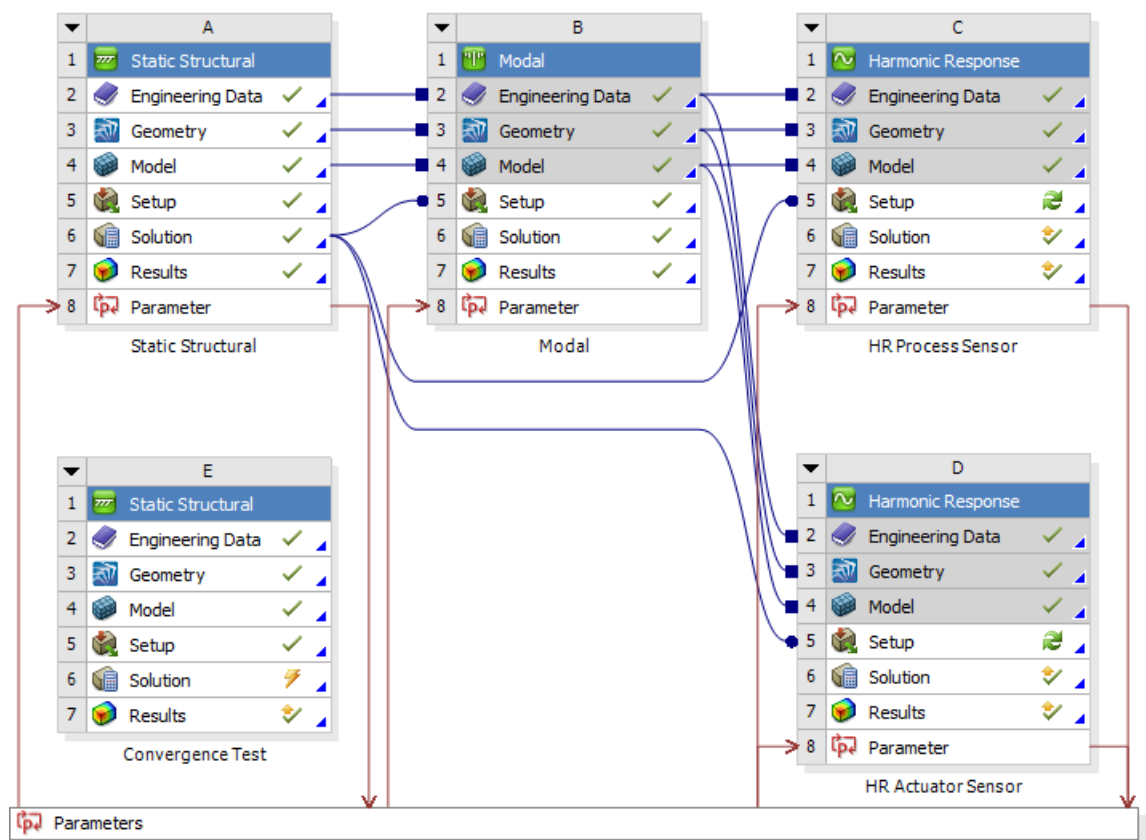


Рис. 23. Взаємозв'язок між інструментами аналізу, що використовуються в ANSYS.

Параметри, які можна виміряти технічно з наближеною точністю, визначені глобально в аналітичному середовищі. Це дозволяє за допомогою методів оптимізації в ANSYS ітеративно знайти потрібний набір параметрів. Крім того, це надає можливість створити ітераційний цикл з зовнішніми

результатами вимірювань або результатами симуляції, наприклад, з моделі простору станів. Таким чином, максимально автоматизовано та ефективно можна чисельно відображати складніші геометрії та процеси.

На цьому постпроцесора доступні розв'язки аналітичних завдань, описаних раніше. ANSYS дозволяє графічно представляти розраховані значення для оптимізованої оцінки та аналізу результатів симуляції, як уже було показано на рисунках 11 і 22. Для моделі станового простору на цьому етапі експортуються необхідні власні значення та власні вектори, тобто власні частоти та відповідні вектори переміщення.

2.5 Розробка моделі

Як уже було описано, система представлена як модель станового простору. Основний опис та додаткова література з цього питання знаходяться в підрозділі 1.8 “Використання простору станів для опису поведінки динамічної системи”. Основою для моделювання в MATLAB і перетворення моделі в модальний простір є результати представленого аналізу MCE в ANSYS. Попередня редукція порядку мінімізує обчислювальний витрат та забезпечує врахування впливу нерозглянутих власних мод. Виконаний модальний аналіз надає n власних значень (власних частот) і масонормовані власні вектори переміщення m вузлів системи, які утворюють $m \times n$ модальну матрицю, див. рівняння 3. Ця матриця множиться на масову, демпфуючу і жорсткісну матриці диференціального рівняння руху системи для трансформації в простір станів. На основі цього будується модель станового простору.

$$\underline{\Phi} = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

, де n – власні частоти, m – переміщення y_{ij} вузлів

Схема блок-діаграми, представлена на рисунку 24, відображає модель станового простору, визначену рівняннями 1а та 2а, і ілюструє принцип вводу/виводу, який є корисним для числового проектування та використання в системах керування або регулювання.

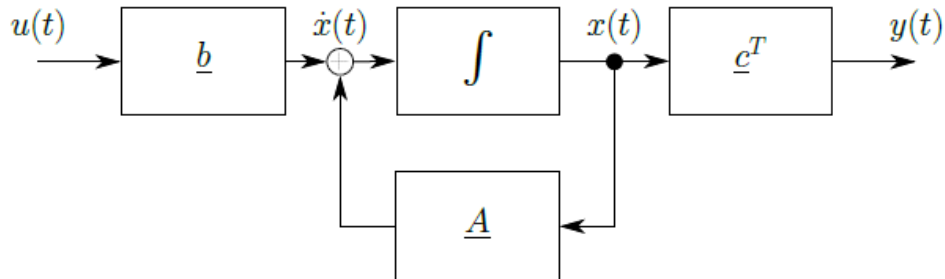


Рис.24. Символічна блокова схема представлення простору станів

Вхідний параметр $u(t)$ представляє фізично діючу силу, яка через процес або активізацію актуаторів впливає на відповідні вузли в системі. За допомогою вектора входу $\underline{b}$ та модальної матриці $\underline{\Phi}$ ці фізичні сили трансформуються в узагальнені сили модального станового простору. Модальна матриця разом із вектором виходу $\underline{c}^T$ використовується для зворотної трансформації з узагальнених координат у фізичні для визначення вихідного параметра $y(t)$. Оскільки енергетичний вміст у системі та, відповідно, станові параметри не можуть змінюватися стрибкоподібно, проміжний параметр d дорівнює нулю. Матриця системи $\underline{A}$ містить коефіцієнти характеристичного рівняння диференціального рівняння руху та тим самим визначає динамічну поведінку системи в становому просторі.

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{b} \cdot u(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = \underline{c}^T \cdot \underline{x}(t) \quad (2a)$$

Вектор стану $\underline{x}(t)$ містить стани системи, тобто зміщення та швидкості m вузлів у момент часу t .

За допомогою розробленої моделі простору станів тепер можна визначити зміщення та швидкості відповідних вузлів як результат впливу сили на інші вузли структури. Таким чином, наприклад, можна визначити рух лопаті внаслідок збудження п'єзоактором. Крім того, тепер можна зробити висновки про параметри процесу на основі відомої передачі поведінки між процесором та сенсорами.

2.6 Моніторинг процесу

Безпечне та своєчасне виявлення нестабільних станів процесу є невід'ємною умовою для ефективного впливу на процес. Для цього потрібні методи, які витягують важливі характеристики з вимірних сигналів та класифікують їх для оцінки стану процесу. Результати дослідження моніторингу процесу у виробництві з використанням різання у розділі 1.8 "Виявлення коливань у моніторингу процесу" показують, що існують різні методи для виявлення небажаної поведінки системи. Запропоновані стратегії можуть бути обмежено застосовані до інших процесів, оскільки багато параметрів у процесі, ланцюзі вимірювань та середовищі процесу впливають на результати. Зокрема, під час обробки тонкостінних структур відхилення від стабільного стану процесу в сигналі вимірювання можуть бути виявлені тільки з певними труднощами через низьку енергію процесу.

Застосовані методи та розроблені процедури аналізу роз'яснюються та оцінюються на прикладі виготовлених поверхонь лопатей. Метою є виявлення критеріїв для класифікації стану процесу під час обробки тонкостінних структур. Основою для цього є методи розділення ознак у часовій та частотній областях.

2.7. Вплив на процес

У наведеному нижче тексті обговорюються можливі стратегії, що служать підтримкою стабільності виробничого процесу. З точки зору

управління в технічних системах, ці стратегії можна поділити на регульовані та контрольовані методи.

Під контролем мається на увазі втручання в процес на основі заданого плану, певної події (наприклад, певного показника сенсора) або послідовності (наприклад, позиції фрези). Важливо, що при керуванні не відбувається зворотного зв'язку щодо впливу керуючого фактора. Іншими словами, система не адаптує свою діяльність відповідно до результатів або змін у середовищі.

Натомість, регуляційні методи включають реакцію системи на керуючий фактор. Це означає, що зворотний зв'язок впливає на визначення керуючого фактора. Таким чином, якщо в системі виникають зміни або відхилення, вона автоматично коригує свої дії, щоб досягти потрібного результату. Це забезпечує більшу точність та адаптивність у роботі системи.

Загалом, основна відмінність між цими двома методами полягає в наявності або відсутності зворотного зв'язку та автоматичної адаптації системи до змін у процесі її роботи.

Щодо розробленої моделі станового простору, слід згадати про використання регулятора стану. Основна перевага такого регулятора полягає в тому, що він підходить навіть для нелінійних, часово-змінних та багатовимірних систем. Це відкриває можливості для розширених підходів у моделюванні та регулюванні. Дотримуючись обмежень пристрою, зокрема щодо керувальної енергії та кінематики, можливо регулювати позицію, швидкість або, включаючи додаткові фізичні зв'язки, інші величини, такі як прискорення, сила або певні частоти в кожному вузлі розроблених пристроїв. Щоб зменшити обсяг досліджень та зосередитися на загальній можливості позитивного впливу на процес за допомогою інтелектуальних пристроїв, валідація в процесі фрезерування обмежується наступними керуючими підходами:

Технічне втілення методів управління:

- Фазово-точна актуація (контроль):

Цей метод використовується для гасіння або підсилення певних частот у процесі або рухах деталі, що обробляється. Для фазово-точної актуації необхідно постійно знати поведінку передачі між місцем дії процесу та системою сенсорів. Зміни у поведінці передачі особливо помітні при неперервному видаленні матеріалу, особливо при виготовленні тонкостінних структур. Можливість реалізації заключається в попередній симуляції на основі моделі процесу, як описано в документі [7].

- Гармонічна актуація:

Використовується для усунення або зменшення впливу вібрацій, які виникають у процесі, наприклад, через власні частоти системи або частоти різання. Такі вібрації можуть викликати нестабільні стани та негативно впливати на якість поверхні оброблюваної деталі. Активні системи часто стимулюються саме цими частотами або їх кратними для мінімізації або зниження небажаних впливів. У літературі ці частоти зазвичай відомі як частоти різання або домінуючі піки у частотному діапазоні сигналу сенсора.

- Підкритична актуація:

Актуація з частотою нижче від частоти, яка викликає ускладнення, має на меті змінити поведінку системи, щоб мінімізувати її негативний вплив. Встановлення взаємозв'язку між частотою завад і актуації, а також визначення підходящих частот стимуляції може бути здійснене за допомогою моделей процесів та фрезерувальних експериментів.

- Надкритична актуація:

Стимуляція системи на частоті вище певного порогу. Основна ідея - змінити поведінку системи, наприклад, збільшити вплив демпфірування системи за допомогою динамічної стимуляції. При виборі частоти актуації необхідно

враховувати температуру Кюрі матеріалу актуатора, оскільки вищі частоти можуть призвести до швидшого нагрівання матеріалу та ризику перегріву.

- Актуація зі змінною частотою:

Цей метод є розширенням стимуляції з гармонічними частотами. Якщо в процесі виникає відома заважаюча або домінуюча частота, то стимуляція має відбуватися в певному діапазоні навколо цієї частоти. Частота стимуляції об'єкта в цьому випадку постійно змінюється між верхньою та нижньою межами в межах діапазону навколо заважаючої частоти.

Особливо для ситуацій з підкритичним, надкритичним та змінночастотним актуванням підходять спеціальні форми сигналів (синус, трикутник, прямокутник тощо) та характери сигналів, наприклад, Sweep (поступове змінення частоти), Burst (короткі імпульси) або шум. Відома передача сигналів між актуатором та сенсорами дозволяє розрізнити складові сигналів процесу та актуаторної збудженості у ході сигналу сенсора.

Якщо поведінка системи інструмент-деталь відома заздалегідь, наприклад, через симуляцію, можливе управління ходом роботи затискача. Орієнтовним показником тут може бути час або позиція фрезерного інструменту. У цьому дослідженні активне втручання у процес відбувається подієво через відхилення актуатора, див. Рис. 25. Подіями тут визначаються нестабільні стани під час обробки. Їх виявляють за допомогою критеріїв, з сигналів інтегрованих сенсорів. Кількісне вираження критерію використовується або як фактор для регульовального параметра, або як порогове значення для включення або виключення актуатора (бінарне управління). Варіація відхилення, амплітуди сили, частоти збудження та форми сигналу як регульовальних параметрів використовуваних актуаторів пропонує різноманітні можливості впливу на процес. Розроблена модель загальної системи – що складається з пристрою, деталі, вібраційного збудження процесом та контр вібрацій актуатором – використовується для

визначення оптимальних діапазонів параметрів для регулювальних параметрів. Збудження від фрезерного інструменту моделюється за допомогою синусоїдального прикладання сили у різних точках лопаті.

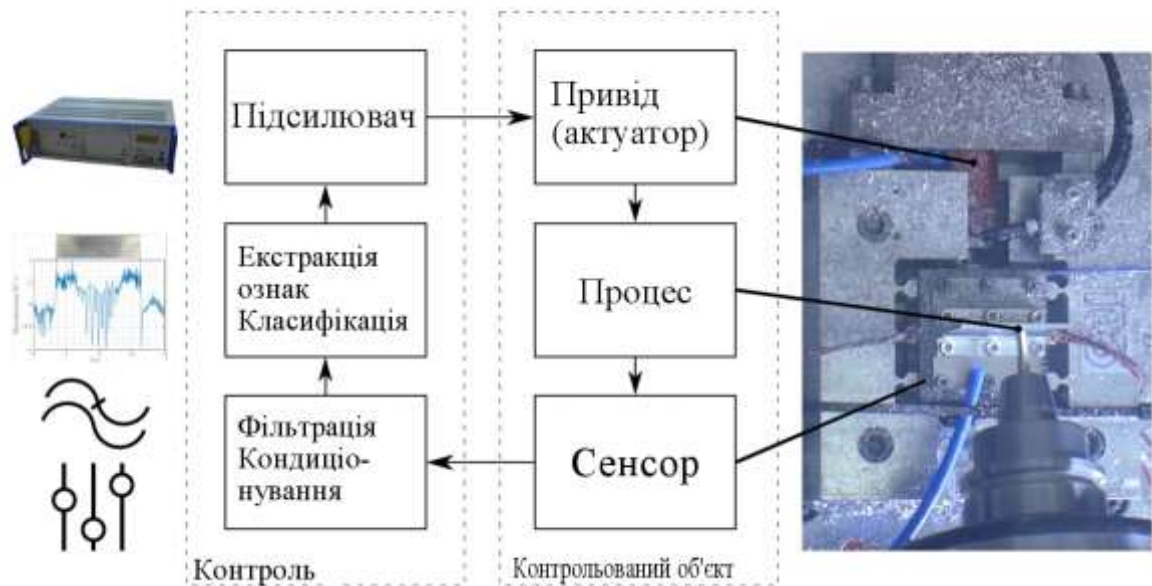


Рис. 25. Структура контролю

Вимірювані під час процесу дані - відхилення різних вузлів лопаті і сигнали вбудованих датчиків - використовуються для налаштування параметрів симуляції, щоб вони відповідали реальному виробництву. Визначення оптимальних значень параметрів - відхилення та частоти актуатора - для активного втручання в процес відбувається за допомогою дискретної глобальної оптимізації. Метою є мінімізація відхилення найвищих вузлів лопаті з акцентом на кутових вузлах. Відхилення та частота актуатора поступово змінюються, а максимальне відхилення кутів лопаті симулюється для кожної комбінації параметрів. Виходячи з припущення, що максимальне відхилення актуатора має найбільший вплив на відхилення лопаті, спочатку встановлюють максимальне відхилення. Збільшення частоти відбувається поступово в діапазоні від 1 Гц до 1000 Гц. Рисунок 26 показує загальний процес ідентифікації параметрів.

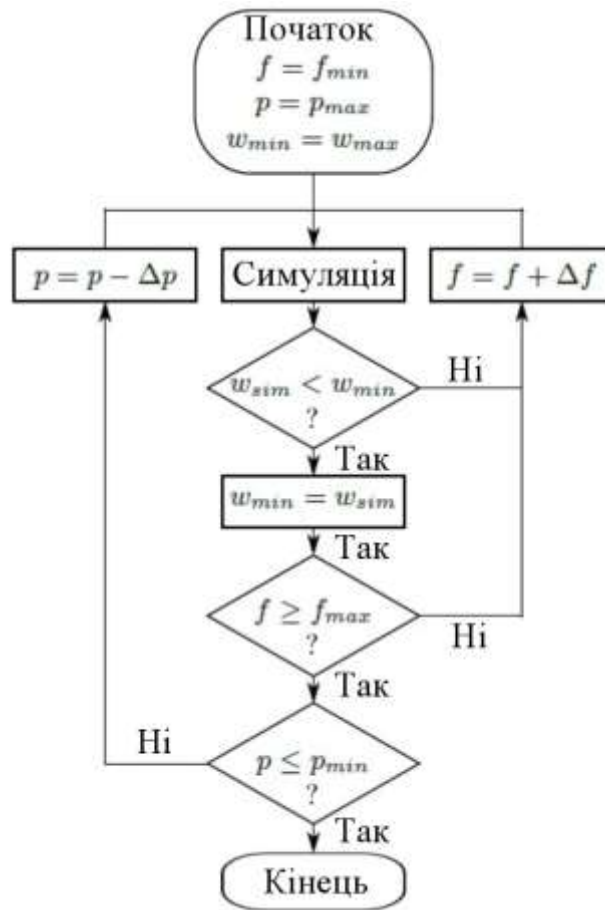


Рис. 26. Блок-схема для визначення керуючих параметрів на основі симуляції - відхилення п'єзоактуатора p і частоти актуатора f - на основі відхилення деталі ω .

Початкові кроки зменшення відхилення п'єзоактуатора $\Delta p = 1$ мкм та збільшення частоти $\Delta f = 10$ Гц спочатку обрані грубо і будуть зменшені у подальших детальних дослідженнях. Багаторазові проходження з різними параметрами процесу (сила, частота, позиція лопаті) показали, що для частоти 150 Гц до 400 Гц та для відхилення від 15 мкм до 20 мкм є оптимальними керуючими параметрами для мінімізації відхилення лопаті під час процесу. Через численні впливаючі параметри та неминучі збурення під час виробництва, визначені діапазони параметрів можуть служити лише як орієнтовні значення, але вони значно зменшують час і витрати на випробування.

Розроблені структури управління і регулювання були імплементовані і перетворені в програмний код для безпосереднього використання на керуючому пристрої експериментального устаткування. Це забезпечує придатність розроблених структур для використання в реальному часі в системах управління. Це служить перевіркою для промислового використання та є основою для швидкого переходу від прототипу до статусу готового продукту.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ ТОНКИХ СТИНОК ІМПЕЛЕРА

3.1 Перевірка в процесі фрезерування

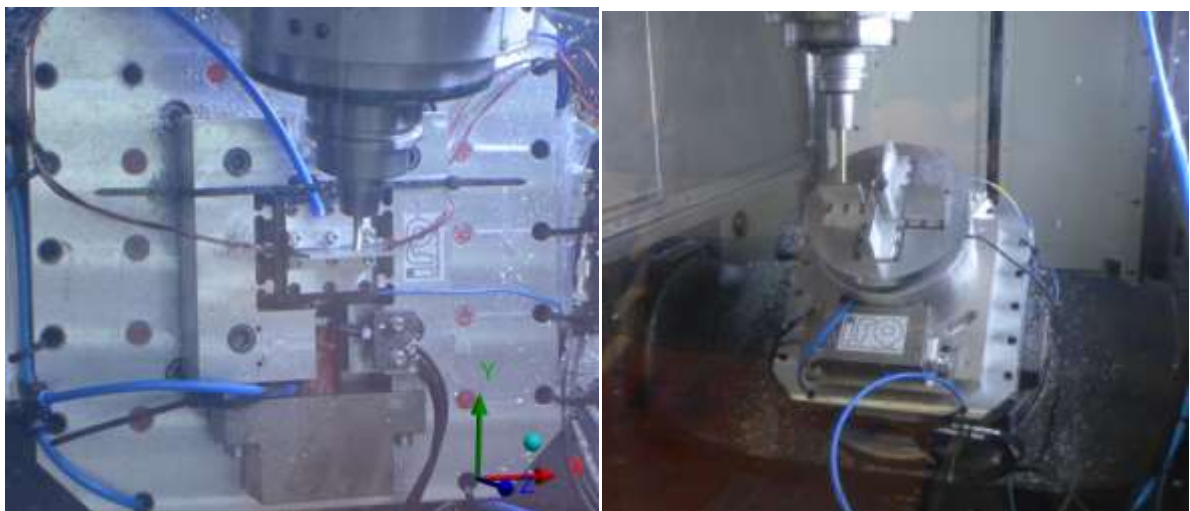
Раніше представлені роботи стосуються розробки інтелектуальних пристроїв та стратегій для моніторингу та впливу на процес, розроблених для їх використання. Функціональність та можливості застосування досліджуваних компонентів і методів були протестовані та перевірені у вступних дослідженнях з дотриманням визначених меж. У цьому розділі відбувається перевірка розроблених пристроїв у виробничому процесі та обговорення результуючих поверхонь і геометрій лопатей.

3.1.1 Визначення параметрів

Для дослідження ефекту пристрою необхідний аналіз та визначення параметрів, які впливають на процес. Для кращого огляду ці параметри призначені відповідно до визначених областей нижче.

Деталь:

На Рис. 27 можна побачити ідеалізовану лопать під час обробки на поступальному чи обертальному пристрої. Для досліджень на обертальному пристрої ідеалізована лопать імелера кілька разів розміщена на периметрі тримача робочої деталі.



(а) Поступальний пристрій

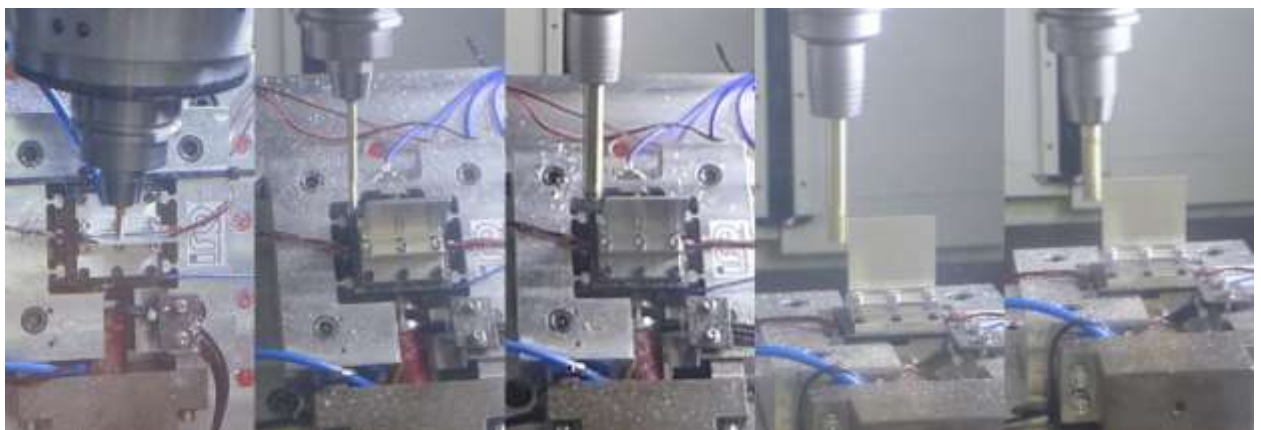
(б) Обертальний пристрій

Рис. 27. Пристрої, інтегровані у робочий стіл верстата

Залежно від призначення, імпелери виготовляються з різних матеріалів. Сировину, необхідну для досліджень, виготовлено з алюмінію EN AW 7075 однієї партії. Обробка цього матеріалу економічніше порівняно з іншими матеріалами, оскільки відповідні інструменти дешевші у придбанні та дозволяють довгі терміни експлуатації через очікуване низьке зношування. Крім того, можлива суха обробка без використання рідкого охолоджувально-змащувального середовища, що абсолютно необхідно для використання ще не закритих прототипних пристроїв. Крім оброблюваного матеріалу, геометрія, яка має бути виготовлена, є вирішальним фактором щодо структурно-динамічних властивостей загальної системи. Ідеалізована лопать має ширину 50 мм та висоту 45 мм. Цільова товщина лопаті становить 2 мм, але для дослідницьких цілей зменшується до 1,5 мм. Це в середньому відповідає товщині лопаті прикладного імпелера, представленого в розділі 2.1 Вимоги виготовлення імпелера.

Інструмент:

Для досліджень використовуються кульові фрези та торцеві фрези різного діаметру та з різною кількістю зубців. Добірка використаних інструментів представлена на рисунку 28.



6мм Z2 6мм Z2 12мм ЗРП Z2 12/1,5мм Торцева Z2 12мм Хвостовик Z4

Рис. 28. Вибірка використаних цільно твердосплавних фрезерних інструментів із покриттям оксиду цирконію-азоту або нітриду титану

Діаметр кульової фрези має вирішальний вплив на утворену поверхню. Оскільки під час остаточної обробки з нахилом фрезерного інструменту часто не вся ріжуча кромка знаходиться в зоні різання, слід враховувати дійсний робочий діаметр інструменту для розрахунку параметрів виробництва.

Геометрія різця, ріжучий матеріал, а також покриття також є важливими факторами виробничого процесу. Кріплення здійснюється за допомогою гідророзтяжних зажимних патронів і термозатискних утримувачів, оскільки вони забезпечують порівняно хорошу кругову точність і високу відтворюваність при закріпленні інструменту. Під час заміни інструменту через знос новий інструмент кріпиться в той самий утримувач з тією ж висотою виступу.

Параметри виробництва:

Виробничі параметри або різальні значення залежать від матеріалу деталі та використаного інструменту, а також від таких умов, як динаміка машини, стратегія обробки, застосування ОМР або умови навколишнього середовища. Оптимальна швидкість різання визначається комбінацією робочої деталі та інструменту. Частота обертання та подача налагоджуються відповідно та утримуються стабільними для досліджень. Подачі a_p у z -напрямку та a_e у y -напрямку варіюються. Остаточна лопать виготовляється шляхом вертикального (z -напрямок) фрезерування. Рух подачі фрезерного інструменту відбувається від лівого до правого кута лопаті (y -напрямок). Під час обробки за допомогою кульової фрези шорсткість поверхні лопаті визначається перекриттям послідовно фрезерованих рядів у z -напрямку. На рисунку 29 наочно зображено кут нахилу кульової фрези щодо поверхні лопаті та відповідне залучення. Для обробки тонкостінних деталей як оптимальні кути нахилу визначено 15° та 45° для досягнення високої якості поверхні. Діапазон від -15° до 15° визначено як оптимальний для забезпечення постійно низьких різальних сил. На основі фрезерувальних

випробувань кути від 10° до 30° призводять до оптимального результату. Початкові випробування фрезерування та порівняння з іншими кутами нахилу підтверджують висновки з літератури. Тому для більшості досліджень з кульовими фрезами використовується кут нахилу 15° . Відсутність зазору в конструкції використовуваної фрезерувальної машини дозволяє застосування однонапрявленого фрезерування. Це має перевагу, що стружка відводиться назад і не може бути затиснутою між ріжучою кромкою та робочою деталлю. Ще однією перевагою однонапрявленого фрезерування є те, що робоча деталь під час різання притягується до інструменту. Це протидіє додатковому відхиленню гнучкої лопаті, яке відбувається під час протилежного фрезерування.

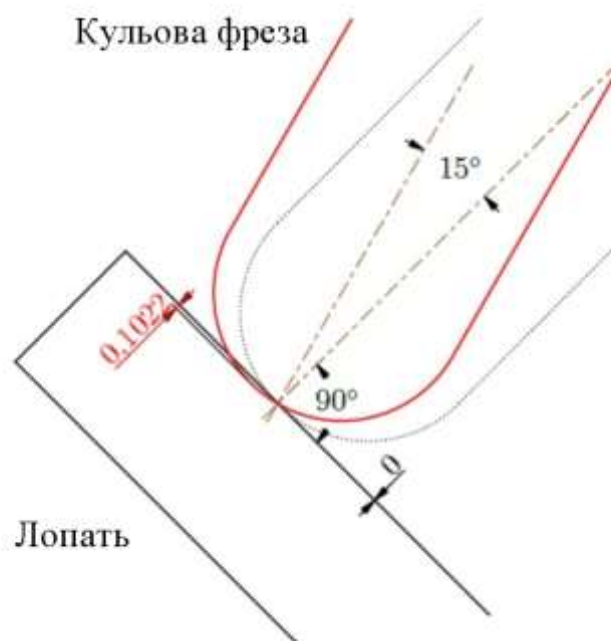


Рис. 29. Умови залучення для 15° кута нахилу між поверхнею робочої деталі та 12 мм кульовою фрезою.

Затиснення осей фрезерувальної машини неможливе, тому осі для всіх досліджень перебувають у режимі регулювання. Наскільки це можливо, усі інші параметри, що мають відношення до процесу, утримуються стабільними протягом усього дослідження.

Пристрій:

Змінні параметри пристроїв стосуються, з одного боку, їх режимів роботи, а з іншого - вибору використовуваних компонентів та механічних параметрів налаштування. Для основної частини досліджень використовується актуатор, оскільки завдяки порівняно високій температурі Кюрі його п'єзоматеріалу він дозволяє найвищу робочу температуру і тому найкраще підходить для тривалого збудження та високочастотної активації. Актуатор в усіх дослідах заздалегідь натягнуто на 4 кН. Кріплення робочої деталі здійснюється за допомогою адаптивної пластини між сенсорною платою та робочою деталлю. Це означає, що незважаючи на зміну робочих деталей, позиція та натяг сенсорної системи не змінюються в ході досліджень. З'єднання лопатей здійснюється рівномірно з однаковим моментом натягування.

Процесно важливі параметри визначені або адаптовані, для того, щоб можна було дослідити реальний вплив пристрою на виробничий процес. Для того, щоб зменшити обсяг досліджень, аналізований простір параметрів у наступному розділі додатково зменшується за допомогою початкових випробувань фрезерування.

3.1.2 Початкові дослідження

Як описано у розділі 2.2 Механічна конструкція, пристрої розроблені таким чином, що рух робочої деталі за допомогою п'єзоактуатора є можливим, але при цьому необхідна гнучкість не впливає негативно на стабільність процесу. Щоб перевірити це, проводяться фрезерувальні випробування з різними інструментами та параметрами як базовий еталон на традиційних системах затиску, див Рисунок 30. Порівняння поверхні та результуючої геометрії лопатей, які виготовлені з використанням традиційної фіксації та розробленого пристрою (без активації), не виявляє помітних відмінностей. Той самий набір параметрів (різальні значення, умови навколишнього середовища тощо) на обох системах фіксації призводить до

порівнянних результатів. Таким чином, розроблені пристрої підходять для виробництва навіть без активного втручання в процес. Постійна активація тому не є необхідною, а ймовірний збій системи не додатково погіршує виробництво та може бути легко компенсований.

У рамках проєкту INTEFIX попередня симуляція служить основою для стратегії фрезерування та активації пристрою. Для валідації результатів симуляції використовуються торцеві та кульові фрези, як показано на рисунку 28. Виготовлені поверхні в основному відповідають результатам симуляції і мають марки вібрації у тих самих позиціях. Результати подальших досліджень з цими фрезерними інструментами представлені на Рисунку 31. Видно дві типові поверхні для поетапного фрезерування тонкостінної лопаті за допомогою периферійного фрезерування. Хоча подача в z — напрямку на ряд лежить у діапазоні всього від 0,5 мм до 3 мм, через рух лопаті частково відбувається залучення всієї довжини різця. На вже оброблених поверхнях

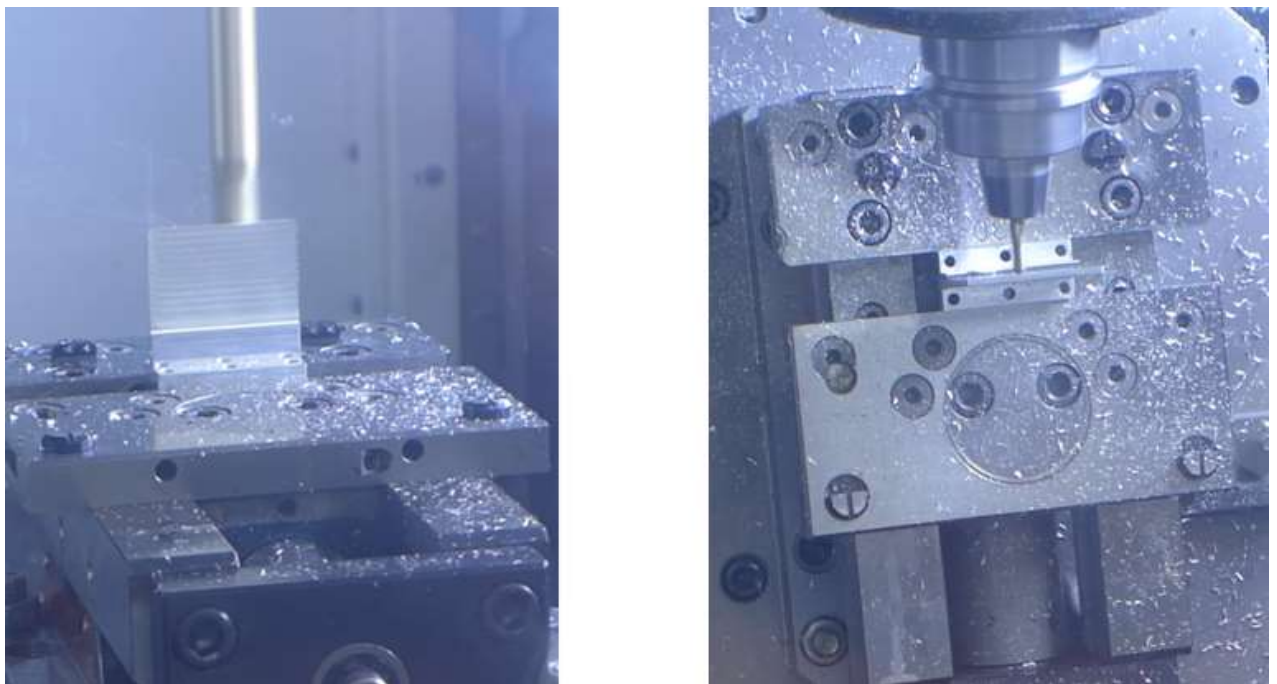
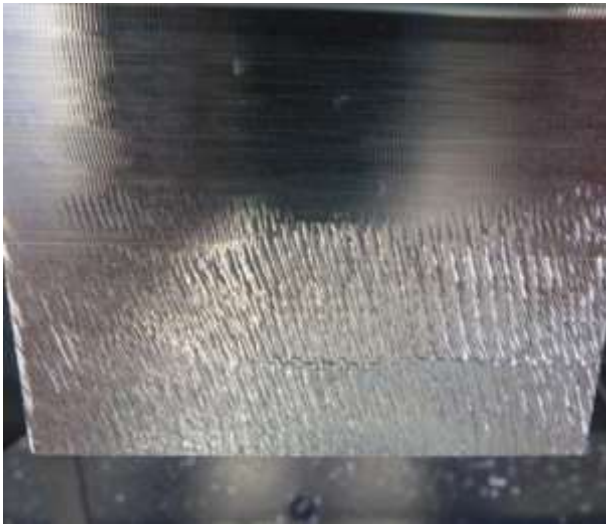


Рис. 30. Еталонні дослідження за допомогою традиційних затискних пристроїв

це призводить до повторного видалення матеріалу, що в свою чергу може призвести до поганої якості поверхні та відхилень від заданої геометрії. У випадку, коли обробка гладких поверхонь з вільною формою за допомогою циліндричних фрез не є звичною, використовуються спеціальні кульові фрези для проведення основних досліджень. На Рисунку 32 можна побачити два характерні приклади такого виду виробництва.

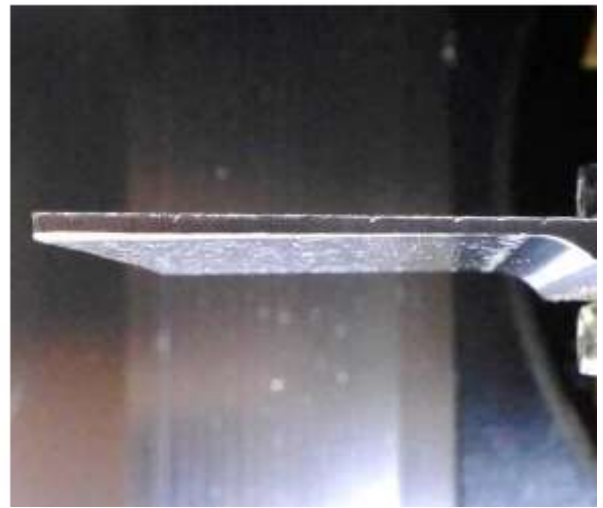
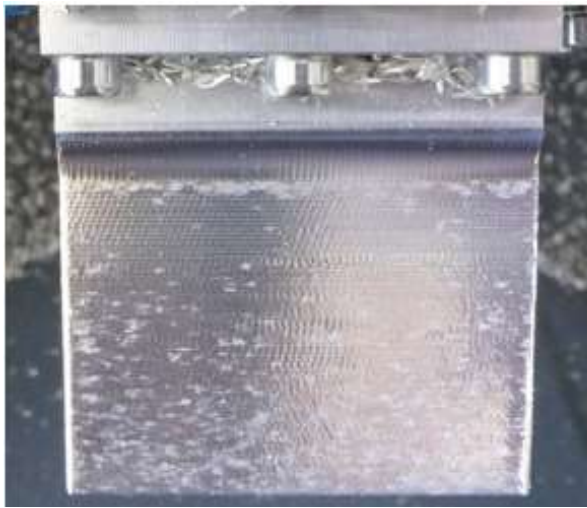


(а) Співбіжне фрезерування. Фреза частково "зчепилася" по всій довжині ріжучої кромки.



(б) Протибіжне фрезерування. "Хвилеподібна" структура завдяки відносному руху між заготовкою та інструментом.

Рис. 31. Порівняння співбіжного і протибіжного фрезерувань на прикладі поверхонь лопаті, оброблених 12мм кінцевою фрезою



(а) Поверхня лопаті вкрита затисненою стружкою

(б) Нерівномірна товщина лопаті через відхилення заготовки

Рис. 32. Наслідки, які можуть виникати під час використання кульових фрез для обробки лопатей в рамках досліджень

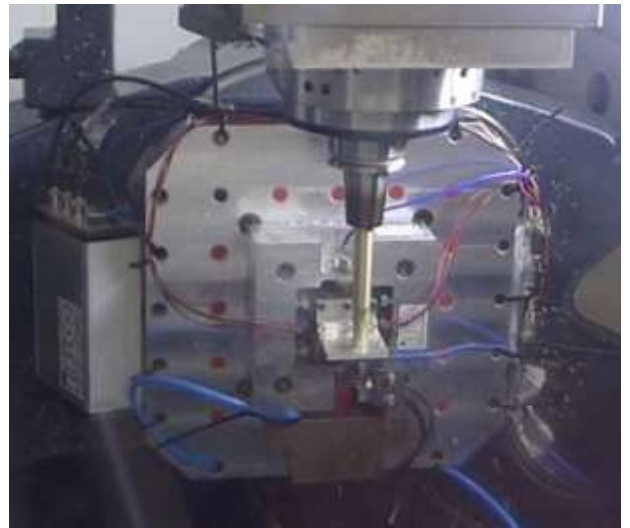
Оскільки на цьому етапі розробки пристрої ще не мають капсулювання, дослідження проводяться без використання ОМР. Внаслідок цього стружка не видаляється автоматично і частково залишається на поверхні заготовки або прилипає до інструменту. Результатом цього, як показано на Рисунку 31.а, є затиснута стружка на поверхні лопаті. Оскільки наявна система стисненого повітря не призначена для постійного використання в якості охолодження фрезерного верстата, видалення стружки здійснюється за допомогою зовнішнього та точкового подавання стисненого повітря, як видно на рисунку 27. Результат відхилення заготовки можна побачити на Рисунку 32.б, де верхня частина лопаті товща, оскільки у цій області відбувається найбільше відхилення делікатної структури, і менше матеріалу було видалено.

Первісні дослідження також показують, що стан поверхні лопаті перед фінальною обробкою істотно впливає на кінцеву якість поверхні. Через відносно високу податливість лопаті навіть невеликі нерівності на поверхні призводять до значних проблем зі стабільністю, як показано на Рисунку 33.а. Таким чином, стан поверхні є ще одним фактором, що визначає кінцеву якість поверхні. Для кращої відтворюваності результатів дослідження вплив

цього фактора мінімізується за допомогою попереднього фрезерування, як видно на Рисунку 33.б.



(а) Погана якість поверхні лопаті викликана неоднорідністю поверхні перед кінцевою обробкою



(б) Чорнове фрезерування поверхні для кращого порівняння результатів

Рис. 33. Мінімізація впливу структури поверхні на результуючу якість поверхні лопаті

3.2. Виконання експерименту

На основі аналізу параметрів і знань, отриманих з первинних фрезерних випробувань, проводяться дослідження щодо можливостей використання інтелектуальних пристроїв. Більшість експериментів виконується за допомогою поступального пристрою. Стратегія фрезерування та вибір параметрів різання базуються на звичайному виробництві імелера. Загальна методика передбачає, що певні параметри – такі як глибина занурення, подача або швидкість обертання – стабільного процесу поступово змінюються до тих пір, поки не з'являться недоліки на поверхні деталі через нестабільні стани процесу.

Цілеспрямоване активування заготовки за допомогою розроблених пристроїв має компенсувати збурюючі фактори та таким чином забезпечити стабільність процесу.

3.2.1 Процес виконання:

- Увімкнення всього ланцюга вимірювань – приблизно за 60 хвилин до початку випробувань (нагрівання компонентів тощо).
- Кріплення лопаті (товщиною від 4мм до 6мм) – рівномірно та з визначеним моментом затягування за допомогою болтових з'єднань.
- Перевірка на усадку та пошкодження механічної конструкції пристрою – п'єзоактуатор кілька разів виводиться у максимальне відхилення та залишається в крайньому положенні приблизно на 10 секунд.
- Вимірювання геометрії лопаті – за допомогою зонда фрезерного верстата та NC-програми.
- Підготовка заготовки – фрезерування по периметру з передньої та задньої сторони лопаті для мінімізації впливу виробничих допусків заготовки та результируючих невизначеностей щодо позиціонування заготовки через затиск.
- Фрезерування лицьової поверхні лопаті – для мінімізації впливу конфігурації поверхні на кінцеву якість поверхні лопаті, оскільки якість поверхні при фрезеруванні по периметру занадто варіюється.
- Перевірка та вимірювання геометрії лопаті – за допомогою зонда фрезерного верстата та NC-програми.
- Фрезерний режим роботи:
 - Фрезерування з визначеним набором параметрів.
 - Робота пристрою з визначеним набором параметрів.
 - Документація – реєстрація вимірювань.
- Фінішна обробка:
 - Квалітативна оцінка якості поверхні – фотографування.

- Вимірювання геометрії лопаті – за допомогою зонда фрезерного верстата, NC-програми та штангенциркуля.
- Запис спостережень під час виробничого процесу.
- Реєстрація вимірювань (частота дискретизації, вимірювальні прилади, версії програмного забезпечення тощо) та процесу (параметри різання, налаштування машини, стан інструменту тощо).
- Кількісна оцінка якості поверхні.

Особливо при обробці алюмінію, вміст тепла від виробничого процесу може бути ще одним фактором впливу. Для зменшення впливу різних умов нагрівання чи охолодження, описаний вище процес проводиться згідно з визначеним часовим графіком. Для статистичного підтвердження результатів, експерименти проводяться кілька разів (5-10 повторень). Первісні фрезерні випробування показують, що процес чутливо реагує на зміни впливаючих параметрів. Тому для виготовлення делікатної лопаті необхідна ретельна документація всіх значущих для процесу розмірів, щоб можна було відокремити вплив керованих та регульованих факторів.

3.2.2 Результати та спостереження

Для зручності огляду результати та спостереження розподілені на категорії: "Процес виготовлення", "Поведінка пристрою" та "Вплив пристрою".

У категорії *«Процес виготовлення»* зосереджено увагу на спостереженнях, пов'язаних із розглянутою технологією виробництва. Пояснення, отримані в ході аналізу, можуть бути застосовані також до обробки тонкостінних структур у загальному випадку.

У категорії *«Поведінка пристрою»* акцент робиться на вплив зміни певного параметра або компонента на поведінку пристрою. Розглядаються можливі шляхи поліпшення механічної конструкції та оцінка обраних компонентів для розумних затискачів.

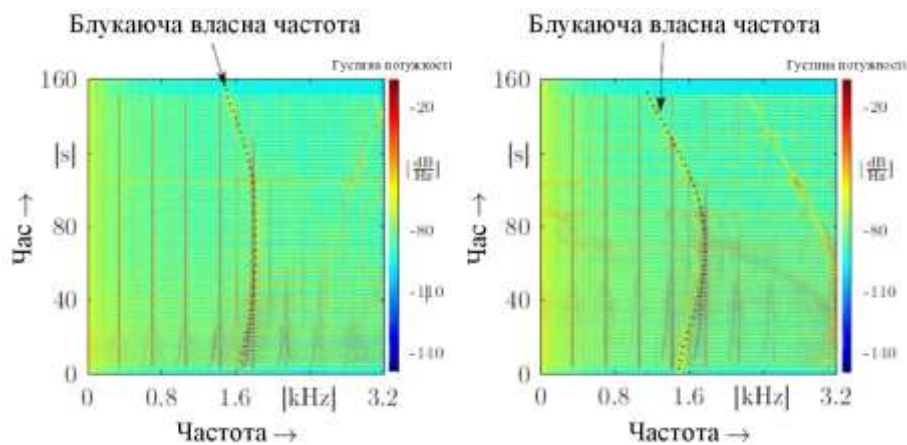
У категорії «Вплив пристрою» описані результати активного використання досліджуваного пристрою. На основі цього можна визначити потенційні сфери застосування інтелектуальних затискачів.

Процес виготовлення

Дослідження показують, що два основні фактори відповідають за нерівномірну товщину лопаті, як це представлено на Рисунку 31.б. По-перше, лопаті, виготовлені фрезою з діаметром 12 мм, мають більшу товщину на верхньому кінці порівняно з тими, що виготовлені інструментом з діаметром 6 мм, якщо порівнювати довжину інструменту. Причиною цього може бути несприятлива комбінація гнучкості інструменту та заготовки. У цьому виробничому сценарії інструмент з меншою жорсткістю, здається, є більш вигідним.

Іншим фактором, що впливає на однорідність товщини лопаті, є вибір між фрезеруванням у режимі співбіжного та протибіжного рухів. Лопаті, виготовлені протибіжним фрезеруванням, товщі на верхньому кінці, оскільки ріжуча кромка відштовхує заготовку, тоді як при співбіжному фрезеруванні ріжуча кромка врізається в матеріал, тим самим притягуючи заготовку до інструменту.

Під час обробки тонкостінних структур також відзначається, що домінуючі частоти постійно змінюються під час процесу. На Рисунку 34 представлені спектрограми виробництва лопатей різної товщини (кінцевий розмір 3,05 мм та 2,05 мм), умови різання однакові (кінцева фреза 12 мм Z2, $a_e = 1$ мм, $S = 10\ 600$ об/хв, $v_F = 3710$ мм/хв). На Рисунку 34.б чітко видно дугоподібні частотні характеристики. Оскільки частота дискретизації для цього дослідження обмежена використаною вимірювальною конфігурацією і фільтрація свідомо зведена до мінімуму, на рисунку 34.б видно лише один дугоподібний хід. Другий хід з'являється як спотворене та дзеркальне відображення в кінці частотного діапазону.



(а) Товщина лопаті: 3,05 мм.

(б) Товщина лопаті: 2,05 мм.

Рис. 34. Блукаюча власна частота загальної системи при виготовленні лопатей різної товщини

Отже, для порівняння наводяться лише перші домінантні частотні характеристики обох спектрограм. Через їх меншу жорсткість домінантна власна частота тонкої лопаті спочатку знаходиться на рівні 1489 Гц, що нижче, ніж домінантна власна частота товстої лопаті, яка становить 1635 Гц. При цій геометрії менша жорсткість тонкої лопаті має більший вплив на структурну динаміку, ніж менша маса. У обох спектрограмах частота мінлива зі збільшенням прогресу обробки. Під час фрезерування до середини лопаті частота спочатку зростає, а потім падає. У випадку тонкої лопаті, зростання та падіння частоти більш виражені через порівняно більше зниження жорсткості деталі. Дугоподібний хід частот не лише відображає власну частоту деталі чи інструмента, але й власні частоти загальної системи. Позиція та ситуація втручання інструмента схожим чином впливають на цей перебіг, як зміна жорсткості та маси лопаті. Одне з можливих пояснень полягає в зміні структурної динаміки загальної системи. Позиція фрези постійно змінюється, зокрема замінна жорсткість та замінна маса моделі системи маса-пружина-демпфер, а отже, і виникаючі власні частоти.

Під час обробки часто можна помітити акустичні особливості, які вказують на якість виготовленої лопаті, оскільки навіть незначна енергія процесу достатня для того, щоб змусити тонкі структури деталі вібрувати та

випромінювати звукові хвилі, що можуть бути чутними. Початкові вимірювання щодо можливого використання повітряних звукових сенсорів для досліджень у цій роботі показують, що в порівнянні з використаними сенсорами вони не пропонують значних переваг.

Критичними фазами виробничого процесу є моменти входу та виходу фрези з деталі. Хоча вібрації лопаті після виходу фрези не впливають на процес, перший контакт і пов'язаний з ним час встановлення вібрації є визначальним фактором для якості обробленої поверхні лопаті. Часто кути лопаті на вході фрези товщі, ніж на виході.

Загалом дослідження показують, що навіть невеликі зміни одного з параметрів, описаних у розділі 3.7.1 «Визначення параметрів параметрів», можуть мати значний вплив на кінцеву якість поверхні лопаті. Важко простежуванні або непередбачувані перешкоди, такі як ті, що викликані наростанням різальної кромки, істотно спотворюють результати дослідження.

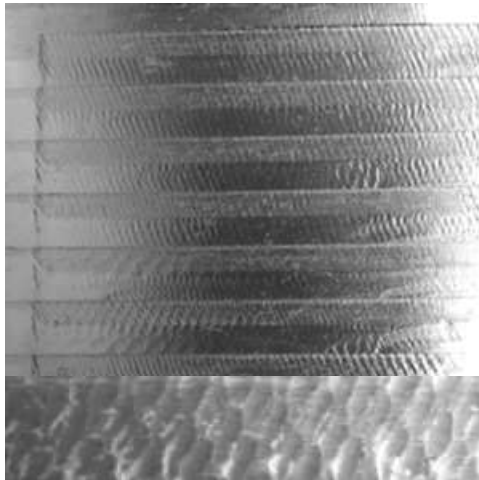
Поведінка пристрою

Амплітуда сигналу використовуваної сенсорної системи залежить від попереднього натягу п'єзосенсорів. Занадто низький попередній натяг призводить до того, що коливання не можуть або передаються недостатньо, оскільки можливі точки контакту діють як демпфуючі інтерфейси. Визначена та можливо адаптивна структура (з регульованою піддатливістю та змінними сейсмічними масами) матеріалу навколо сенсорів може допомогти налаштувати чутливість.

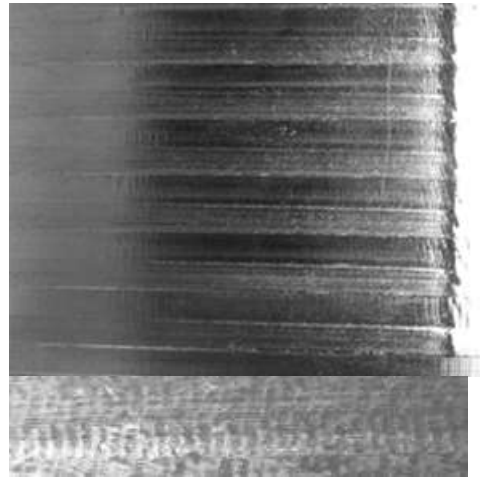
Недостатній попередній натяг актуатора також негативно впливає на ефективність використання пристрою. Причиною, серед іншого, є необхідність опори актуатора та пов'язана з нею піддатливість між контактними поверхнями різних матеріалів. Це зменшує максимально можливе відхилення столу оброблюваної деталі, особливо при динамічній роботі.

Вплив пристрою

Вплив на систему з постійною частотою під час виробництва має різний вплив на результати виробництва. На Рисунку 35 зображено приклад результату виробництва на поступальному пристрої без втручання та з втручанням на частоті 350 Гц при максимальному відхиленні.



$Ra = 1.806 \text{ мкм}$



$Ra = 0.562 \text{ мкм}$

(а) Без активного втручання (б) З постійним втручанням 350 Гц.
пристрою

Рис. 35. Порівняння оброблених поверхонь лопаті кінцевою фрезою 12 мм

$Z2, a_e = 1 \text{ мм}, S = 10\ 600 \text{ об/хв}, v_F = 3710 \text{ мм/хв}$

Встановлена частота базується на результатах попередніх симуляцій у проєкті INTEFIX та на порівнянні різних частот та відхилень під час первісних фрезерних випробувань з оптимальними діапазонами керувальних величин, які були визначені раніше в розділі 2.6. «Вплив на процес». Лопать з втручанням виявляє вищу якість поверхні. Частота втручання відповідає частоті зубцевого зачеплення процесу. Загально позитивний вплив збудження частотою зубцевого зачеплення не може бути виявлений при використанні інших наборів параметрів. Аналогічні дослідження на обертальному пристрої, як показано на Рисунку 36, також демонструють позитивний вплив постійного збудження деталі на утворення поверхні.

При втручанні з постійною частотою виникають подальші особливості. Рисунок 37 показує різницю між виготовленими поверхнями лопатей з постійним втручанням та без нього під час виробництва. На рисунку 37.а – виготовлено без втручання – видно явні ознаки коливання в області кутів лопаті. Рисунок 37.б показує результат з втручанням в процес на 350 Гц. Кутова область виглядає більш гармонійно. Проте середина лопаті має додаткові нерівності. Таким чином, чистий вплив з постійною частотою протягом усього виробничого процесу в цьому випадку є менш придатним.

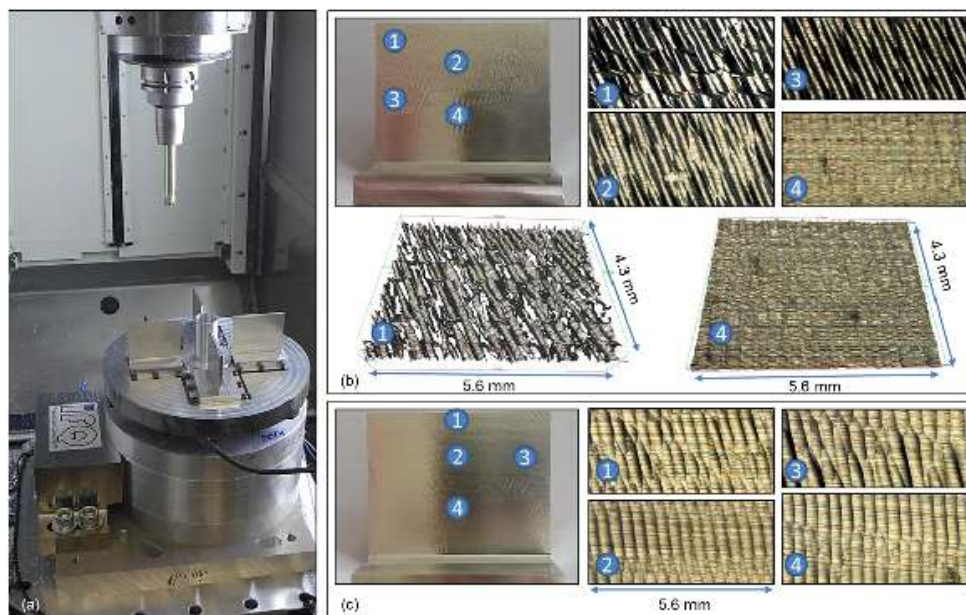
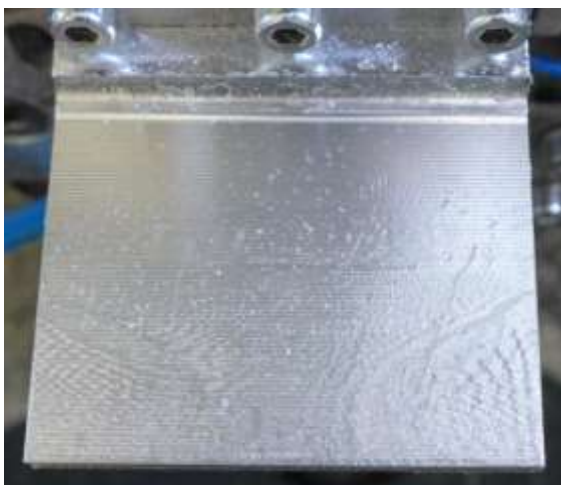


Рис. 36. а) Дослідження з використанням постійного втручання на обертальному пристрої. б) без втручання с) з втручанням.



(а) Без втручання – стан кутової області гірший, ніж всередині лопаті.



(б) З втручанням – кути лопаті кращі, але всередині лопаті з'являються сліди коливань

Рис. 37. Порівняння оброблених поверхонь лопаті, товщиною 2,58 мм, виготовлених без втручання, кульовою фрезою 6 мм Z2, $a_e = 0,2$ мм,
 $S = 12\ 000$ об/хв, $v_F = 2000$ мм/хв

Дослідження, проведені на розроблених пристроях, також показують позитивний вплив активного впливу на геометрію деталі. Без втручання відбувається відхилення заготовки, що призводить до неоднорідної товщини лопаті, як видно на рисунку 32.б. Особливо при випробуваннях з низькочастотним втручанням, в діапазоні від 30 Гц до 180 Гц, цей ефект пом'якшується. На рисунку 38 показано гармонічний приклад, створений завдяки постійному руху лопаті з частотою 31 Гц.



Рис. 38. Цілеспрямована структуризація поверхні за допомогою впливу на деталь, як додаткова можливість використання розроблених пристроїв

3.3. Висновки та перспективи

Зростаючі вимоги до якості поверхні та допусків виробництва деталей при постійно високій або підвищеній продуктивності вимагають оптимізації кожного окремого компонента, який бере участь у виробничому процесі. Метою цієї роботи є розробка інтелектуального затискача як компонента з інтегрованими датчиками та актуаторами для оптимізованого виготовлення делікатних деталей. Необхідні етапи розробки демонструються на прикладі фрезерування тонкостінних лопатей. Дослідження в цій роботі обмежуються обробкою з відривним різанням, але запропоновані методи та підходи можуть бути застосовані до інших проблем і виробничих методів.

На основі існуючого стану знань та вимог, які виникають з виробництва імпелера як прикладу застосування, робота показує розробку та створення інтелектуальних затискачів та вибір і інтеграцію необхідних компонентів для їх роботи, а також перевірку бажаних властивостей системи. Якщо поведінка системи відома в будь-який момент часу, наприклад, через попередню симуляцію або вимірювання, достатньо порівняння поточного та очікуваного значень для втручання у процес. Однак, як показує література та проведені дослідження, при обробці тонкостінних структур фактори, такі як зношування інструментів, допуски геометрії деталей після попередньої чорнової обробки, а також постійна зміна структурно-динамічної поведінки через безперервне видалення матеріалу та постійно змінювану ситуацію зачеплення, мають більший вплив, ніж при обробці більш жорстких деталей. Належне врахування всіх параметрів вимагає складної симуляції або широкого діапазону допусків всіх результуючих вихідних параметрів. Представлений у цій роботі підхід дозволяє аналізувати та описувати поведінку системи як основу для швидкої адаптації до змінних умов виробництва. Аналіз поведінки системи проводиться за допомогою методу скінченних елементів у ANSYS та первісних фрезерних випробувань. Опис поведінки системи служить основою для подальшої розробки моніторингу та впливу на процес. Інтегровані в пристрої датчики підходять для моніторингу

виробничого процесу. Нестабільні стани під час обробки відображаються із чіткими ознаками у сигналах датчиків та можуть бути витягнуті за допомогою різних методів. Постійне вивчення сигналів датчиків дозволяє якісно прогнозувати результуючу якість поверхні лопаті. Кількісне прогнозування можливе на основі кореляції зареєстрованих значень з результатами поверхонь подальших фрезерних випробувань. Інтегровані п'єзоактуатори роблять розроблені пристрої придатними також для реалізації різних режимів роботи. Статичний режим використовується для позиціонування деталі. Необхідне налаштування позиції деталі під час обробки, зумовлене зростаючим зношуванням інструментів або як компенсація відхилення деталі чи інструменту, може відбуватися у квазістатичному режимі. Динамічний режим дозволяє безпосередньо впливати або адаптувати структурно-динамічні властивості системи для підтримки стабільного стану системи. Рух деталі дозволяє, залежно від фрезерного інструменту та впливу, цілеспрямовано структурувати виготовлену поверхню. За допомогою втручання в процес виготовлення деталі можна досягти позитивного ефекту на результуючу якість поверхні та геометрію деталі.

Представлені прототипи служать для перевірки реалізації концепції інтелектуальних пристроїв для оптимізованого виробництва тонкостінних деталей та для визначення придатності певних компонентів для цієї мети. Використання в промисловому середовищі вимагає подальшої розробки цих пристроїв, включаючи їх захист від контакту з рідинами для охолодження, забезпечення промислових інтерфейсів для обміну інформацією та енергією, а також концепцію охолодження актуаторів. Дослідження показують, що п'єзоактуатори швидко перегріваються навіть з повітряним охолодженням, тому слід розглянути можливість використання води або олії як охолоджувальних середовищ. Оскільки перегрів відбувається переважно при високочастотній роботі, можливе використання послідовного або паралельного з'єднання декількох актуаторів, які працюють по черговому.

Що стосується концепції сенсорів, існують додаткові можливості для оптимізації. Цілеспрямоване структурування матеріалу носія навколо сенсора може служити для ослаблення або посилення певних частотних складових та для налаштування чутливості сенсора. Регульована піддатливість та адаптивні маси доповнюють цей підхід додатковими параметрами налаштування. Нестабільні стани проявляються особливо сильно у певних вузлах системи, тому цілеспрямоване розміщення та орієнтація сенсорів пропонують додаткові можливості щодо розділення та екстракції ознак. Аналіз сигналів кількох визначено розподілених сенсорів і знання про поведінку сигналу між сенсорами дає змогу зрозуміти місце та причину виникнення порушення процесу. Крім того, використані п'єзопатчі також підходять як актуатори для безпосереднього впливу на процес.

Подальші дослідження щодо використання деталей, на які відбувався вплив з постійною частотою, виглядають обнадійливими. Крім структурування поверхні деталі, слід також дослідити цілеспрямований вплив на прилеглу зону.

Моніторинг процесу виробництва тонкостінних деталей та стратегія обробки делікатних структур мають великий потенціал для розвитку. Моніторинг процесу має бути чутливим до нестабільних умов, проте невразливим до змін параметрів процесу чи несуттєвих впливів. Тому необхідні всебічні дослідження всіх параметрів, що беруть участь у процесі, та їх взаємодії. Знання, засновані на таких підходах, як нечітка логіка або штучні нейронні мережі для моніторингу процесу, та навчання та адаптивні системи для регулювання інтелектуальних пристроїв, підходять для оптимізації та подальшого розвитку запропонованої концепції.

РОЗДІЛ 4. СТАРТАП-ПРОЄКТ

Розділ розроблення стартапу впроваджений для оцінки конкурентоспроможності ідеї та впровадження її у роботу підприємств. Крім того, процес розробки стартапу допомагає окреслити концепцію ідеї і проєкту, їх перспективи для майбутньої реалізації на ринку [23].

Мета: оцінка інноваційності проєкту та можливостей впровадження у роботу підприємств

Завдання: Проведення аналізу

- Техніко-економічних показників
- Перспективи
- Конкурентоспроможності

4.1 Опис ідеї проєкту

Розробка інтелектуального затискного пристрою для обробки тонкостінних деталей дає змогу покращити якість оброблюваних деталей за рахунок зменшення вібрацій та поліпшення точності обробки, що в кінцевому результаті може призвести до зниження витрат на інструмент та підвищення продуктивності обробки [23].

Таблиця 4.1 Ідея проєкту

Зміст	Область застосування	Вигода для виробника
Розробка інтелектуального затискного пристрою	Автомобільна, аерокосмічна та енергетична промисловість	Покращення якості оброблюваних деталей Зниження витрат на інструмент Підвищення продуктивності обробки

Аналіз переваг ідеї з техніко-економічного боку [23]:

Таблиця 4.2 Аналіз сильних, нейтральних та слабких сторін проєкту

№	Техніко-економічні показники	Проєкт	Сильна сторона	Нейтральна сторона	Слабка сторона
1	Вартість впровадження	Розробка інтелектуальних пристроїв для моніторингу та впливу на процес фрезерування	+		
2	Простота впровадження			+	
3	Час впровадження		+		
4	Аналог				+
5	Новизна		+		
6	Діапазон застосування			+	
7	Рентабельність проєкту		+		

Таблиця 4.3 Аналіз сильних, нейтральних та слабких сторін конкурентського проєкту

№	Техніко-економічні показники	Проєкт	Сильна сторона	Нейтральна сторона	Слабка сторона
1	Вартість впровадження	Конкурентський проєкт			+
2	Простота впровадження		+		
3	Час впровадження			+	
4	Аналог				+
5	Новизна			+	
6	Діапазон застосування		+		
7	Рентабельність			+	

	проєкту				
--	---------	--	--	--	--

Проведений аналіз дає розуміння про сильні, нейтральні та слабкі сторони проєкту та можливість конкурувати на ринку послуг [23].

4.2 Аналіз здійсненності проєкту

Наступний крок у розвитку стартапу полягає в оцінці методів імплементації, через які буде втілюватись концепція проєкту [23].

- Яким чином буде здійснюватися процес впровадження для втілення концепції проєкту?
- Чи вже існують необхідні технології, або вони потребують створення чи вдосконалення?
- Чи мають розробники проєкту доступ до потрібних технологій?

Таблиця 4.4 Аналіз здійсненності проєкту

№	Ідея проєкту	Шлях реалізації	Наявність засобів	Доступність засобів
1	Доступ до необхідного програмного забезпечення (ПЗ)	Закупівля ліцензій	Існує	Окрема стаття бюджету виробництва
2	Впровадження датчиків	Навчання співробітників	Існує	Кваліфікований спеціаліст
3	Випробування	Проведення експериментів із зразками	Існує	Територія для проведення випробувань

Як ми бачимо з аналізу, проєкт можна реалізувати.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартапу

Дослідження потенційних ринкових перспектив, які могли б сприяти успішному впровадженню проекту, а також можливих ризиків, котрі можуть перешкоджати прогресу стартапу, надає основу для розробки стратегії розвитку, що враховує попит ринку, потреби клієнтів та конкурентне середовище [23].

Маркетинговий аналіз виявив, що аналогічні технології не використовуються на виробництвах, що відкриває перспективи для конкурентної переваги запропонованої ідеї [23].

Таблиця 4.5 Характеристика потенційного ринку

№	Потреба	Споживач	Вимоги
1	Покращення якості оброблюваних деталей Зниження витрат на інструмент Підвищення продуктивності обробки	Автомобільне машинобудування Аерокосмічна промисловість	Простота впровадження Рентабельність

Наступним кроком після визначення груп потенційних клієнтів є аналіз ринку: формування таблиць факторів, котрі сприяють та перешкоджають реалізації проєкту [23].

Таблиця 4.6 Позитивні фактори

№	Фактори	Опис можливостей	Ймовірна реакція
1	Технологічні інновації	Покращення якості оброблюваних деталей	Підвищення інтересу з боку виробничих

			галузей, залучення інвестицій.
2	Ринковий попит	Новизна та ефективність продукту можуть стимулювати високий попит.	Розробка маркетингової стратегії, адаптація продукту під ринкові потреби.
3	Запит на універсальність	Розширення спектру деталей на замовлення	Автоматизація типових процесів

Таблиця 4.7 Негативні фактори

№	Фактори	Опис загрози	Ймовірна реакція
1	Регуляторні обмеження	Потенційні обмеження, пов'язані з патентами, стандартами безпеки та екологічними нормами.	Юридична підготовка, здійснення досліджень для відповідності стандартам.
2	Технічні ризики	Можливі проблеми з надійністю або ефективністю технології під час впровадження.	Розробка плану управління ризиками, проведення випробувань і тестувань.
3	Конкуренція на ринку	Наявність конкурентів з аналогічними або	Аналіз конкурентів,

		замінними технологіями.	розробка унікальних продажних пропозицій.
--	--	-------------------------	--

Аналіз пропозиції ринку: характеристика рис конструкції на ринку

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конструкції на ринку

Особливості конкурентного середовища	Прояв вказаної характеристики	Вплив на провадження діяльності компанією
Тип конструкції: - Монополістична - Чиста - Монополія - Олігополія	Олігополія	Інноваційність для вітчизняного ринку
Конкурентні переваги: - Цінові - Не цінові	Цінова	Збільшення собівартості виготовлення
За інтенсивністю: - Марочна - Не марочна	Не марочна	Набуття репутаційного імені
Конкурентна боротьба: - Національна - Локальна	Національна	Вихід на міжнародний ринок
Галузева ознака: - Міжгалузева - Внутрішньогалузева	Міжгалузева	Підвищення якості виготовлених виробів
Товарна конкуренція:	Товарно-видова	Конкуренція між

- Товарно-видова - Товарно-родова - Між бажаннями		виробництвом
---	--	--------------

За характеристикою конкуренції необхідно провести детальний аналіз умов конкуренції. Аналіз проводимо за моделлю п'яти сил Портера (табл. 4.9) [23].

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції за М. Портером

Одиниці аналізу	Постачальники	Прямі конкуренти	Клієнти	Потенційні конкуренти	Аналоги
	Постачальник датчиків	Конкуренти на вітчизняному ринку	Вузькогалузеві	Конкуренти, що запронують схожу методику	Відсутні

Підсумки	Економія додатковій обробці	Відсутні	Клієнт робить вибір найкращого технічного рішення	Відсутні	
----------	-----------------------------------	----------	---	----------	--

Пропозиція матиме попит на ринку та конкурентоспроможна на міжнародному [23].

Таблиця 4.10 Обґрунтування конкурентоспроможності

№	Фактор	Обґрунтування
1	Простота у застосуванні	Розширення клієнтської бази
2	Збільшення часу виготовлення	Підвищення якості
3	Ринковий розвиток	Організація піар-акцій та інформаційних кампаній
4	Розвиток	Проведення автоматизації типових процесів та модернізації

Таблиця 4.11 Оцінка факторів

№	Фактор	Бали 1-20	Рейтинг продукції конкурентів						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	Простота у застосуванні	-1			+				
2	Зменшення часу виготовлення	+3							+
3	Ринковий розвиток	+1					+		
4	Розвиток	+2						+	

Кінцевим пунктом аналізу ринкових можливостей є проведення SWOT-аналізу (матриця Strength-Weak-Troubles-Opportunities (Сильних-Слабких-Загроз-Можливостей) на основі визначених загроз та можливостей ринку, його негативних і позитивних сторін (табл. 4.12) [23].

Таблиця 4.12 SWOT-аналіз стартапу

+	S Ринковий розвиток Зменшення часу виготовлення	O Збільшення попиту
-	W Регуляторні обмеження Технічні ризики	T Конкуренція на ринку Підвищення вартості

4.4 Розробка стратегії стартапу на ринку

Розробка стратегії стартапу на ринку передбачає визначення охоплення ринку, а саме прогнозування груп потенційних споживачів (табл. 4.13) [23].

Стратегія розвитку буде охоплювати один сегментів застосування, адже область використання переважно застосована у вузькій спеціалізації [23].

Таблиця 4.13 Потенційні споживачі

№	Профіль потенційних клієнтів	Готовність впровадження ідеї	Приблизний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота початку співпраці
1	Автомобільний завод	Висока	Високий	Не висока	Висока
2	Аерокосмічний завод	Висока	Середній	Не висока	Середня
3	Орієнтовані малосерійні виробництва	Середня	Середній	Середня	Не висока

Даний стартап матиме найбільший успіх у 1 та 2 групі клієнтів. Перед співпрацею необхідно розробити стратегію розвитку вказаного сегменту [23].

Таблиця 4.14 Стратегія розвитку

№	Стратегія розвитку стартапу	Шлях охоплення ринку	Базові позиції для конкуренції	Базова стратегія розвитку стартапу
1	Вихід на міжнародний ринок	Концентрований маркетинг	Досягнення попиту	Стратегія спеціалізації

Визначаємо конкурентну поведінку

Таблиця 4.15 Стратегія конкурентної поведінки

№	Чи є ідея «піонером» на внутрішньому ринку	Чи буде стартап копіювати характеристики пропозиції конкурента?	Чи буде проводитись пошук нових клієнтів?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Ні	Так	Стратегія лідера

Далі розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.16) на основі вимог клієнтів, вибраної базової стратегії розвитку (табл. 4.14) та конкретної поведінки (4.15). Ми формуємо ринкову позицію, за якою клієнти маються розпізнати проєкт [23].

Таблиця 4.16 Вибір стратегії позиціонування

№	Базова стратегія розвитку стартапу	Вимоги до товару від клієнтів	Конкурентні позиції стартапу	Тематичні асоціації стартапу
1	Стратегія спеціалізації	Простота у застосуванні Собівартість Швидкість виробництва	Іноваційність Скорочення часу виготовлення	Ціна Швидкість Унікальність

4.5 Складання маркетингової програми стартапу

Першим кроком є розробка маркетингової концепції пропозиції, яку отримає клієнт. Для цього підсумуємо отримані завчасно результати аналізу конкурентоспроможності товару [23].

Таблиця 4.17 Ключові переваги потенційної пропозиції

№	Потреба	Пропозиція	Переваги над конкурентами
1	Ціна	Собівартість	Менша ціна
2	Технологічність	Час обробки	Варіативність

Далі формується трирівнева маркетингова модель пропозиції: розкривається сутність ідеї, її складові та особливості [23].

Таблиця 4.18 Три рівні моделі пропозиції

Рівні пропозиції	Сутність та складові
I. Пропозиція за задумом	Підвищення якості оброблювальних деталей
II. У реальному виконанні	Собівартість
	Час обробки
	Універсальність
III. Пропозиція із підкріпленням	Після продажу: Гарантія і консультації
	До продажу: Опція тестової одиниці

Далі йде визначення оптимальної системи збуту, за якою приймаються подальші кроки:

- проведення збуту самотужки чи з залученням посередників;

- вибір посередників;
- вибір та обґрунтування каналу збуту [23].

Таблиця 4.19 Система збуту

№	Закупівельна поведінка клієнтів	Обов'язкові функції збуту	Оптимальна система збуту	Глибина каналу збуту
1	Повернення товару для переробку	Реалізація та переробка власними силами	Структурована	Вітчизняна

Формування концепції маркетингових комунікацій є останнім пунктом маркетингової програми, для цього використовується завчасно обрана основа для позиціонування та визначена специфіка поведінки цільової аудиторії [8].

Таблиця 4.20 Маркетингові комунікації

№	Канали комунікацій клієнтів	Специфіка поведінки клієнтів	Задача піар повідомлення	Ключові позиції	Ідея рекламного звернення
1	Інтернет оголошення Рекомендації інших клієнтів Виставки	Пошук пропозицій конкурентів	Залучення інвесторів Інноваційність	Швидкість Ціна Доступність	Технологічність Універсальність

4.6 Висновок за розділом

За розділом розроблення стартапу було встановлено, що проект, орієнтований на створення інтелектуального затискного пристрою, демонструє конкурентоспроможність на ринку Німеччини. Основні переваги та можливі виклики для цього проекту були також визначені, з особливим акцентом на унікальності і інноваційності його концепції. Важливим аспектом для успіху цього стартапу є його інноваційна ідея, особливо враховуючи відсутність прямих конкурентів на локальному ринку. Це надає проекту з розробки затискного пристрою, який використовує п'єзоелектричні датчики в конструкції з вуглецевого волокна для виявлення та активного гасіння критичних вібрацій при обробці тонкостінних елементів, значні шанси на реалізацію та успіх.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lee, H.-H.: *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench* 12. Mission Kansas USA: SDC Publications, 2010. ISBN: 9781585036042
2. Stolarski, T.; Nakasone, Y. und Yoshimoto, S.: *Engineering analysis with ANSYS software*. Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN: 0080469698
3. Özel, T. und Altan, T.: *Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 40, Nr. 5 (2000), S. 713–738. ISSN: 0890-6955. DOI: 10.1016/S0890955(99)00080-2
4. Leopold, M.; Hense, R.; Möhring, H.-C. und Kersting, P.: *Intelligente Werkstückspannsysteme für die verzugsfreie Fertigung dünnwandiger Aluminiumbauteile*. In: *12. Magdeburger Maschinenbautage*. Magdeburg, 2015
5. Kolluru, K., Axinte, D.,(2013): *Coupled interaction of dynamic responses of tool and workpiece in thin wall milling*, *Journal of Material Processing Technology*, In Press, <http://dx.DOI.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.018>
6. Budak E, Ertürk A, Öüzgüven HN (2006) *Modeling Approach for Analysis and Improvement of Spindle-Holder-Tool Dynamics*. *Annals of CIRP* 55(1):369–372.
7. Tuysuz, O. und Altintas, Y.: *Frequency Domain Updating of Thin-Walled Workpiece Dynamics Using Reduced Order Substructuring Method in Machining*. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Bd. 139, Nr. 7 (2017), S. 071013. ISSN: 1087-1357
8. Siebrecht, T.; Odendahl, S.; Hense, R. und Kersting, P.: *Interpolation Method for the Oscillator-Based Modeling of Workpiece Vibrations*. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual Machining Process Technology*. Calgary, Canada, 20.5.-23.5.2014
9. Möhring, H.-C.; Lerez, C. und Wiederkehr, P.: *Aktive Schwingungskompensation bei der Bearbeitung dünnwandiger Bauteile*. In: *4SMARTS*. Hrsg. Von Wiedemann, M. 2016

10. Föllinger, O.; Dörrscheidt, F. und Klittich, M.: *Regelungstechnik. Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*, überarbeitete Auflage. Bd. 1.1994
11. Kolluru, K., Axinte, D.,(2013): *A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface*. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. ISSN: 1755-5817. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.136
12. Li, B.; Jiang, X.; Yang, J. und Liang, S. Y.: *Effects of depth of cut on the redistribution of residual stress and distortion during the milling of thin-walled part*. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 216 (2015), S. 223–233. ISSN: 0924-0136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.09.016
13. Sveda, J.; Kolar, P.; Koubek, J. und de Dios, J.: Case Study 3.1: *Fixture System for Workpiece Adjustment and Clamping with/without its Pre-deformation*. In: *Intelligent Fixtures for the Manufacturing of Low Rigidity Components*. Hrsg. von Möhring, H.-C.; Wiederkehr, P.; Gonzalo, O. und Kolar, P. Springer, 2018
14. Lai, G. J. und Chang, J. Y.: *Stability analysis of chatter vibration for a thin-wall cylindrical workpiece*. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Bd. 35, Nr. 3 (1995), S. 431–444. ISSN: 0890-6955. DOI:10.1016/0890-6955(94)E0011-7
15. Dutschke, W.: *Fertigungsmesstechnik*. Stuttgart: Teubner, 1990. ISBN: 3519063220
16. Bickel, W.: *Frässpindel mit motorintegrierter aktiver Dämpfung*. Dissertation. Hannover: Leibniz Universität, 2015.
17. Denkena, B. und Hollmann, F.: *Process machine interactions: prediction and manipulation of interactions between manufacturing processes and machine tool structures*. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN: 3642324487

18. Merz, L. und Jaschek, H.: *Grundkurs der Regelungstechnik: Einführung in die praktischen und theoretischen Methoden*. 13. Aufl. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1196. ISBN: 3486237748
19. Möhring, H.-C.; Nguyen, Q. P.; Kuhlmann, A.; Lerez, C.; Nguyen, L. T. und Misch, S.: *Intelligent Tools for Predictive Process Control*. In: *Procedia CIRP*, Bd. 57 (2016), S. 539–544. ISSN: 2212-8271
20. Goli, G.; Fioravanti, M.; Marchal, R.; Uzielli, L. und Busoni, S.: *Upmilling and down-milling wood with different grain orientations—the cutting forces behaviour*. In: *European journal of wood and wood products*, Bd. 68, Nr. 4 (2010), S. 385–395. ISSN: 0018-3768
21. Schmitz, T. L.; Medicus, K. und Dutterer, B.: *Exploring once-per-revolution audio signal variance as a chatter indicator*. In: *Machining Science and Technology*, Bd. 6, Nr. 2 (2006), S. 215–233. issn: 1091-0344. doi: 10.1081/MST-120005957
22. Lunze, J.: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 1. Aufl. Bd. 1. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996
23. О. А. Гавриш, С. О. Солнцев, В. В. Дергачова, О. В. Зозульов – К. Розроблення стартап-проєкту: методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей. НТУУ «КПІ», 2016.