МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

_____Машинобудівний факультет_____
(повне найменування факультету)

_____Технологія машинобудування_____
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
_____другий (магістерський)_____
(ступінь вищої освіти)

на тему___«Дослідження формоутворення обробленої поверхні при кінцевому фрезеруванні у IV швидкісній зоні коливань»__

Виконав: студент(ка) _II курсу, групи_М-113м

Спеціальності _131 «Прикладна механіка»_
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
___«Технології машинобудування»_____

_____КАРАМУШКА Д.Р._____
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник __ДЯДЯ С.І._____
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент_ФРОЛОВ М.В._____
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет_Машинобудівний_____
Кафедра__«Технологія машинобудування»_____
Ступінь вищої освіти ___другий (магістерський)_____
Спеціальність ___131 «Прикладна механіка»_____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація)____«Технології машинобудування»_____
(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ___Сергій ДЯДЯ_____
_____
«_____» _____2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

_____КАРАМУШКА Дарія Романівна _____
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)__Дослідження формоутворення обробленої поверхні при кінцевому фрезеруванні у IV швидкісній зоні коливань_____
_____

керівник проєкту (роботи)_к.т.н ., доц. ДЯДЯ Сергій Іванович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29»_10_2024_року № 443_____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи)__07.12.2024 р._____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи)_ Дослідити формоутворення обробленої поверхні у четвертій швидкісній зоні коливань_____
_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)__1. Огляд літературних джерел 2. Методика проведення досліджень 3. Результати досліджень та їх аналіз 4. Визначення залежності кроку та висоти хвилястості на профілограмі від періодичності коливань деталі при різанні 5. Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів 6. Охорона праці_____

5. Перелік графічного матеріалу _Графічна частина виконана у вигляді презентації, що включає слайди теми роботи, її мети, наукової новизни, практичної цінності, прикладів деталей з тонкостінними елементами, методики досліджень на експериментальному стенді, результатів досліджень та їх аналіз, висновків_____
___кількість слайдів – 13_____
_____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4, 6	ДЯДЯ С.І., доцент		
5	ПУХАЛЬСЬКА Г.В., доцент		
нормоконтроль	ДЯДЯ С.І., зав. каф.		

7. Дата видачі завдання_____02.09.2024 р.___

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел	27.09.2024	
2	Методика проведення досліджень	03.10.2024	
3	Проведення досліджень та обробка отриманих результатів	30.10.2024	
4	Визначення залежності кроку та висоти хвилястості на профілограмі від періодичності коливань деталі при різанні	12.11.2024	
5	Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів	20.11.2024	
6	Охорона праці	22.11.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	29.11.2024	
8	Нормоконтроль	03.12.2024	
9	Рецензія	13.11.2024	
10	Захист дипломного проєкту	17.12.2024	

Студент(ка) _____ _Дарія КАРАМУШКА_
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ __Сергій ДЯДЯ____
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: с.79, рис.10, табл.20, джерел 23, додатків 20.

ВЕРСТАТ, ФРЕЗА, РЕЖИМИ РІЗАННЯ, КОЛИВАННЯ, КРОК ХВИЛЯСТОСТІ, ВИСОТА ХВИЛЯСТОСТІ

Об’єкт дослідження – процес кінцевого фрезерування.

Предмет дослідження - формування обробленої поверхні при кінцевому фрезеруванні.

Метою дипломного проекту є дослідження формоутворення обробленої поверхні при швидкісному кінцевому фрезеруванні в умовах дії вимушених коливань.

Методи дослідження – експериментально - аналітичний.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше для дослідження формоутворення обробленої поверхні використовуються фрагменти осцилограм, на яких записано параметри, що характеризують закон руху деталі при різанні. Практична цінність роботи полягає в визначенні технологічних умов для забезпечення сталого кінцевого фрезерування при швидкісному різанні за умови дії вимушених коливань.

В магістерській роботі виконано дослідження формоутворення обробленої поверхні після зустрічного та попутного фрезерування в четвертій швидкісні зоні коливань. Для цього визначено методику проведення експериментів, обрано оснащення, визначені режими різання. Встановлено, що між профілограмами оброблених поверхонь та параметрами коливань деталі при різанні існує залежність. Для визначення сталості процесу фрезерування розглядається використання відношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань. Але це положення потребує додаткових досліджень.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні познаки 7
Вступ 8
1 Теоретичний аналіз проблем 10
1.1 Аналіз літературних джерел 10
2 Методика проведення досліджень 19
2.1 Опис стенду для дослідження коливань 19
2.2 Методика оцінки основних характеристик процесу різання 20
2.3 Вихідні данні для досліджень 22
3 Експерементальне дослідження на основі теоретичних викладок 23
3.1 Розробка плану експерименту 23
3.2 Аналіз результатів, отриманих в ході дослідження 23
4 Дослідження залежності кроку та висоти хвилястості на профілограмі від періодичності коливань деталі при різанні 36
5 Оцінка очікуваної економічної ефективності заходів 41
6 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях 51
6.1 Техніка безпеки при роботі на фрезерних верстатах 51
6.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях 53
Висновки 55
Перелік джрел посилання 56
Додаток А Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=2400 об/хв .. 58
Додаток Б Результати досліджень попутного фрезерування при n=2400 об/хв 59
Додаток В Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3000 об/хв ...60
Додаток Г Результати досліджень попуного фрезерування при n=3000 об/хв 61
Додаток Д Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3268 об/хв .. 62
Додаток Е Результати досліджень попутного фрезерування при n=3268 об/хв 63
Додаток Ж Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3429 об/хв ..64
Додаток И Результати досліджень попутного фрезерування при n=3429 об/хв 65

Додаток К Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3660 об/хв ...66
Додаток Л Результати досліджень попутного фрезерування при n=3660 об/хв 68
Додаток М Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3700 об/хв ..70
Додаток Н Результати досліджень попутного фрезерування при n=3700 об/хв 71
Додаток П Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=4183 об/хв .. 72
Додаток Р Результати досліджень попутного фрезерування при n=4183 об/хв 73
Додаток С Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=4655 об/хв ...74
Додаток Т Результати досліджень попутного фрезерування при n=4655 об/хв 75
Додаток У Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=6000 об/хв .. 76
Додаток Ф Результати досліджень попутного фрезерування при n=6000 об/хв 77
Додаток Х Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=8000 об/хв .. 78
Додаток Ц Результати досліджень попутного фрезерування при n=8000 об/хв 79

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БФО - базовий фрагмент осцилограми

ВС - визначальне співвідношення

МОТС - мастильно-охолоджуюче технологічне середовище

ППР - положення пружньої рівноваги

ТЕД - тонкостінний елемент деталі

ЧВК - частота вільних коливань

ВСТУП

У сучасних умовах раціональне використання ресурсів набуває особливого значення, що сприяє зростанню популярності виготовлення тонкостінних деталей та елементів. Для таких операцій найчастіше застосовується кінцеве фрезерування. Однак цей метод обробки супроводжується негативним явищем – вібраціями. Для зручності визначення видів коливань при кінцевому фрезеруванні виконано розподіл за швидкісними зонами коливань. Всього їх п’ять. Границі кожної зони визначаються по співвідношенню часу різання до періоду вільних коливань деталі.

Визначення закономірностей виникнення коливань при різанні [1], використання при кінцевому фрезеруванні швидкісних зон коливань [2] дозволяє передбачати види коливань, що будуть діяти за певних режимів різання. Дослідження різання в першій, другій та третій швидкісних зонах коливань дозволили виявити вплив на формоутворення оброблених поверхонь супроводжуючих вільних коливань [3], які утворюють хвилясту поверхню різання, що у вигляді спадковості переноситься на оброблену поверхню. Це є несприятливою закономірністю, від якої треба уходити. У четвертій швидкісній зоні коливань супроводжуючі вільні коливання не виникають через малий час різання. В ній при різанні діють тільки вимушені коливання. Сучасні верстати з ЧПК та різальні інструменти за своїми технічними характеристиками дозволяють працювати в цій зоні.

Актуальність теми дослідження та необхідність її розробки полягає у тому, що на теперішній час формоутворення у четвертій швидкісній зоні коливань є малодослідженим, а кінцеве фрезерування на сучасних верстатах з ЧПК найчастіше відбувається саме в ній.

Метою роботи є дослідження формоутворення обробленої поверхні при швидкісному кінцевому фрезеруванні в умовах дії вимушених коливань.

Предмет дослідження: формування обробленої поверхні при кінцевому фрезеруванні.

Об’єкт дослідження: процес кінцевого фрезерування.

Метод дослідження: експериментально - аналітичний.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше для дослідження формоутворення обробленої поверхні використовуються фрагменти осцилограм, на яких записано параметри, що характеризують закон руху деталі при різанні.

Практична цінність роботи полягає в визначенні технологічних умов для забезпечення сталого кінцевого фрезерування при швидкісному різанні за умови дії вимушених коливань.

1 ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ

1.1 Аналіз літературних джерел

Процес різання металів турбує дослідників ще з часів початку використання металів. Перші досліди та роботи на цю тему були опубліковані в 1848 році, а їх автором був Кокільє, який визначив сили опору різанню, що виникають при свердлінні стволів гармат із кованого заліза [4]. Наряду з ним у 1896 році свої роботи опублікував Ф. Тейлор. Одна із них - “Мистецтво різати метали”, де вперше розглядаються питання зносу і стійкості різального інструменту, пропонуються емпіричні формули ступеневого типу, що зв'язують швидкість різання з подачею і глибиною різання [4]. Ці роботи дали поштовх для більш глибокого вивчення процесу різання. Згодом почалось заснування наукових шкіл, проведення наукових досліджень процесу різання, але незважаючи на стрімкий розвиток з 1991 року почалось зниження наукової діяльності в даній області [4]. Проте, у цей час в Україні продовжуються роботи з дослідження фізики процесу різання, вивчення напруженого стану різального інструменту, застосування екологічно чистого МОТС, створення теоретичних моделей зносу різального інструменту, вивчення і практичного використання процесів абразивного і алмазного оброблення і т.д.[4].

Значний вплив на процес різання мають вібрації, які виникають в результаті обробки. Вони викликають підвищене спрацювання деталей і вузлів верстата, збільшують спрацювання різального інструменту, погіршують чистоту обробленої поверхні, знижують точність обробки, обмежують продуктивність роботи верстата і т.д. [5].

На думку Tlusty [6] інтенсивність вібрації залежить від ширини зрізаємої стружки. При її невеликій ширині процес є стабільним, але при збільшенні процес стає нестабільним і відбувається посилення вібрацій. Також автор зазначає, що ці коливання є самозбуджуючими та характеризує їх як “chatter”.

Chatter - коливання, які мають дуже велику амплітуду, і супроводжуються такими явищами, як брязкіт, гуркіт та стукіт.

Процес “chatter” вивчався з метою створення, по-перше, правил, за допомогою яких можна здійснювати вибір умов різання, і, по-друге, правил для проектування верстатів з більшою стабільністю [6].

Згідно роботи [6] було розглянуто три групи параметрів, що впливають на появу “chatter”:

1) параметри процесу різання;

2) параметри вібраційної системи;

3) параметри орієнтації процесу різання відносно вібраційної системи машини.

Крім самозбуджуючих коливань, або автоколивань, при різанні діють вимушені та вільні коливання [7-9]. Кожен з цих видів має свої ознаки.

Якщо зовнішнє джерело енергії збуджує коливання, а потім це джерело зникає, то в результаті виникають вільні коливання [9]. За відсутності неконсервативних сил вільні коливання підтримують самі себе і є періодичними [9].

Якщо коливання відбуваються за наявності зовнішнього джерела енергії, то такі коливання називаються вимушеними [9]. Вони можуть виникати через два види джерела енергії:

- зовнішні джерела (наприклад, поруч працююче обладнання) - їхній вплив враховується при проектуванні верстатів;

- внутрішні джерела (наприклад, сила удару інструмента об заготовку в процесі різання, дисбаланс шпинделя).

Крім вільних і вимушених коливань також виникають автоколивання. Самозбуджені вібрації - це тип вібрації, при якому їх ресурс знаходиться всередині системи [3].

Існує три види самозбуджених вібрацій:

Перша – це, за дослідженнями Арнольда, залежність сили різання від швидкості, яка зменшується при її збільшенні [9].

Друга форма відома як регенеративна, що виникає при обробці за попереднім хвилястим слідом. Зростаючі вібрації збільшують сили різання і призводять до неякісної та хвилястої обробленої поверхні [2], [9].

Третя форма вібрації зумовлена зв'язком режимів різання, геометрії інструменту та його жорсткості, що створюють координатні зв’язки рухів при обробці. Це призводить до одночасних коливань у двох напрямках [9] і математично описано Вірсігрохом [1], [9].

В таблиці 1.1 наведена класифікація нестабільності при обробці різанням [9].

Таблиця 1.1 - Нестабільність обробки [9].

	Самозбуджуючі вібрації (автоколивання)			Випадкові та вільні коливання			Вимушена вібрація
	Регенеративний (домінантний)	Фрикційний	Зв'язок режимів	Залежно від інструменту	Залежно від заготовки	Залежно від навколишнього середовища	Залежно від компонентів верстата
1	2	3	4	5	6	7	8
Місце знаходження	Між ріжучою кромкою та заготовкою	Передня поверхня інструменту	У напрямках різання і сили тяги	Передня поверхня інструменту	Зона різання	Весь процес різання	Весь процес різання
Причини	Зсув фаз коливань	Тертя на боковій поверхні	Тертя на передній і задній гранях; Зміна товщини стружки; Коливання кута зсуву.	Знос і поломка інструменту.	Розм'якшення та затвердіння матеріалу; Інші дефекти	Порушення навколишнього середовища	Порушення балансу рухомих компонентів, таких як шпиндель

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Метод усунення	Вибрати відповідну глибину різання та частоту обертання шпинделя відповідно до графіка регенеративної стійкості	Вибрати правильний зазор і кути нахилу граней	Змінти траєкторію інструмента; Вибрати правильні режими різання	Вибрати високоякісні матеріали інструменту та правильні параметри різання	Вибрати відповідний ріжучий інструмент і параметри різання	Якщо потрібно, ізолювати верстат	Добре збалансувати рухомий компонент у верстатах

В таблиці 1.2 наведені заходи щодо усунення виникаючих коливань.

Таблиця 1.2 - Заходи щодо усунення коливань [10]

	Верстат		Заготовка/інструмент	Процес різання
Діяльність	Умови праці	Спрямована орієнтація		
1	2	3	4	5
	Підвищення статичної жорсткості	Вибір режимів різання: 1. Результуюча сила різання Нормаль до площі зрізу	Опора гнучких заготовок	Вибір матеріалу заготовки
	Жорсткий фундамент або ефективні амортизаційні опори		Мала маса заготівки	Негативний передній кут
	Вибір оптимального положення елементів конструкції (розташування салазок, балок)		Жорстке закріплення заготівки	Притуплення ріжучої кромки

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
	Модуляція швидкості для зменшення ефекту регенеративних вібрацій	Перпендикулярно до напрямку найбільшої динамічної піддатливості	Демпфуючий ефективних засіб	Вибір низьких або дуже високих швидкостей різання, щоб уникнути мінімальної стабільності
	Підвищення амортизації: -активні амортизатори; -пасивні амортизатори; -амортизаційний підшипник; -амортизаційний виступ;		Невелика вага інструменту	Використання фрез з нерівномірним кроком

При проектуванні технологічного процесу дуже важливо знати, які коливання будуть виникати та наскільки система буде стійкою. Для цього використовують пелюсткові діаграми сталості.

Самою ранньою діаграмою була експериментальна схема Тобіаса [11], що підтвердила існування пелюсток сталості [12].

Існує декілька методів побудови таких діаграм [13]:

1. Аналітичний метод.

2. Числовий метод.

3. Експериментальний метод.

Завдяки пелюстковій діаграмі математичним шляхом можна обрати ті режими різання, при яких процес різання буде сталим, і коливання, що можуть виникнути, не будуть мати сильного впливу на формування поверхні різання. Основні параметри, якими контролюється процес та ведеться розрахунок, є швидкість обертання шпинделя та ширина шару, що зрізається.

На рисунку 1.1 показано взаємозв’язок частот обертання шпинделя та регенеративних коливань[13].

Цікавим аспектом в роботі Мануа є розподіл коливань, що виникають при різанні, на зони [14], критерієм якої є коефіцієнт k. Він визначається відношенням власної частоти коливань деталі до зубцевої частоти і характеризує кількість хвиль коливань між врізанням зуба при холостому ході.

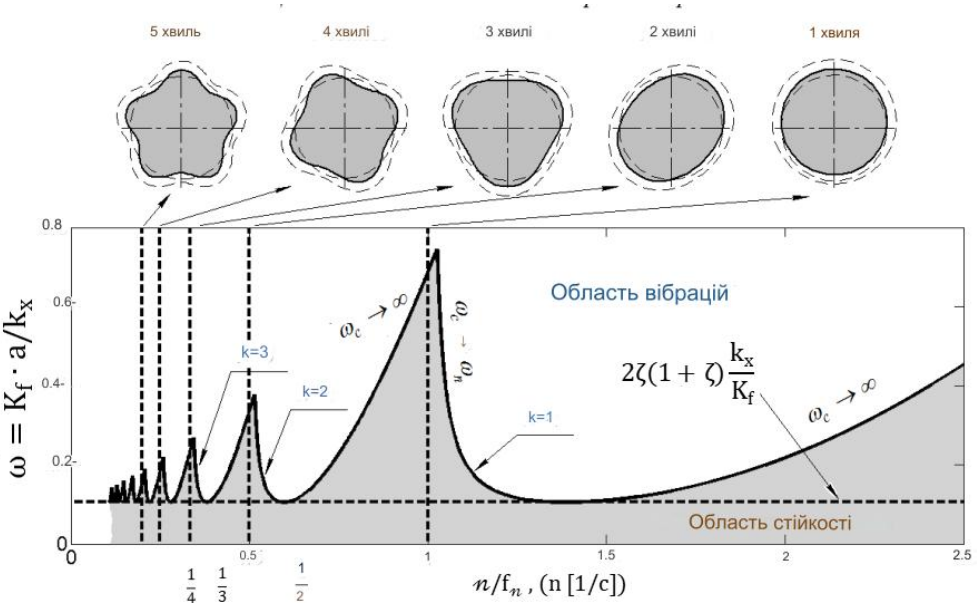


Рисунок 1.1 – Пелюсткова діаграма в безрозмірних координатах та відповідні частоти регенеративних коливань w_c [15]

Зона A: зона демпфування процесу (> 10)

У цій зоні важливе значення має демпфування процесу. Високе підвищення стабільності досягається за рахунок тертя між бічною поверхнею інструменту та поверхнею різання. У цій зоні при низькій швидкості шпинделя висока межа стійкості [14].

Зона B: проміжна зона (10> k> 3)

В ній межа стійкості близька до межі абсолютної стійкості у всьому діапазоні швидкостей шпинделя за рахунок високих значень демпфування [14].

Зона C: зона високої швидкості (3> k> 0,5)

У цій зоні стабільність може бути значно збільшена за рахунок вибору швидкості шпинделя, що збігається з одним зі стабільних гнізд [14].

Зона D: надвисокошвидкісна зона (0,5> k)

Стабільність може бути покращена за рахунок збільшення швидкості шпинделя, через те, що частота проходження зуба в кілька разів вища, ніж на власній частоті і режими різання вже не можуть спричинити проблеми з коливанням [14]. Але межі оброблюваності і потужність двигуна верстата у поєднанні з наявністю режимів на більш високих частотах обмежують цей перспективний варіант.

У монографії [16] за результатами досліджень запропоновано розподіл на зони коливань за відношенням часу різання $t_{різ}$ до періоду вільних коливань тонкостінного елемента деталі (ТЕД) $T_{ВКЕ}$. Авторами роботи було введено поняття «визначальне співвідношення» (ВС).

– I швидкісна зона (дуже низькі швидкості до 100 об/хв). Виникають лише вимушені коливання ТЕД. Визначальне співвідношення для цієї зони ВС > 10 [16].

– II швидкісна зона (низькі швидкості: від 100 об/хв до 200 об/хв). Виникають вимушені коливання і вільні загасаючі коливання ТЕД після закінчення різання. Визначальне співвідношення - 7 < ВС < 10. (З'являються перші ознаки коливального процесу при різанні з амплітудою, меншою 0,02мм) [16].

– III швидкісна зона (традиційні швидкості від 200 об/хв до 700 об/хв). Виникають вимушені коливання, регенеративні автоколивання і вільні затухаючі коливання. Визначальне співвідношення цієї зони – 1 ≤ ВС < 7 [16].

- IV швидкісна зона (підвищені швидкості від 700 об/хв і вище). Виникають вимушені коливання і вільні загасаючі коливання. Автоколивань повністю відсутні. Визначальне співвідношення цієї зони ВС < 1 [16] при співвідношенні часу холостого ходу до періоду вільних коливань ТЕД більше 1.

- V швидкісна зона (зона надшвидкісних частот). Виникають тільки вимушені коливання, так як при такій обробці відсутній холостий хід.

Концепція високошвидкісної обробки була розроблена доктором Карлом Соломоном під час серії експериментів з 1924 по 1931 рік. Це задокументовано в німецькому патенті № 523594 від 27 квітня 1931 року [15]. В ньому були показані криві швидкостей різання, які залежали від температури при різанні. Експеримент

проводився з використанням таких матеріалів як бронза, мідь, алюміній. Автор стверджував, що температура різання досягала піку при заданій швидкості різання; однак, при подальшому збільшенні швидкості різання температура знижувалася (рис.1.2) [15].

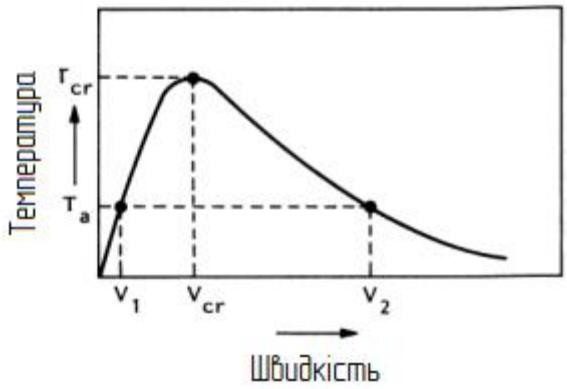


Рисунок 1.2 – Вплив високої швидкості різання на температуру [15].

При порівнянні даних робіт [14] та [16] бачимо різницю у підході до виділення даних зон.

Згідно роботи [14] положення нестійкого процесу визначається відношенням k між частотою вільних коливань f_c та зубцевою частотою f_z, яка залежить від швидкості обертання шпинделя n та кількості зубів z на інструменті. Якщо звернутися до роботи [16], то вводиться поняття визначальне співвідношення (ВС). В роботі [14] сам процес різання не розглядається. Визначення сталості фрезерування визначається по кількості цілих хвиль при холостому ході. В роботі [16] ВС залежить від часу різання та періоду власних коливань, тобто розглядається скільки хвиль коливань деталі вкладається в час різання.

Деякі дослідники [17] відмічають, що спочатку виникають вільні коливання системи, які затухають. Вони називають їх власними коливаннями технологічної системи.

В зв’язку з цим актуальним є визначення закономірності виникнення коливань при різанні. Тому були проведені дослідження [18], згідно яких вид коливань залежить від часу різання під час фрезерування. В першій швидкісній зоні виникають тільки вимушені коливання, у другій та третій швидкісній зоні на вимушені коливання накладаються супроводжуючі вільні коливання. У четвертій та п’ятій зоні діють тільки вимушені коливання, так як час різання замалий для виникнення інших видів коливань.

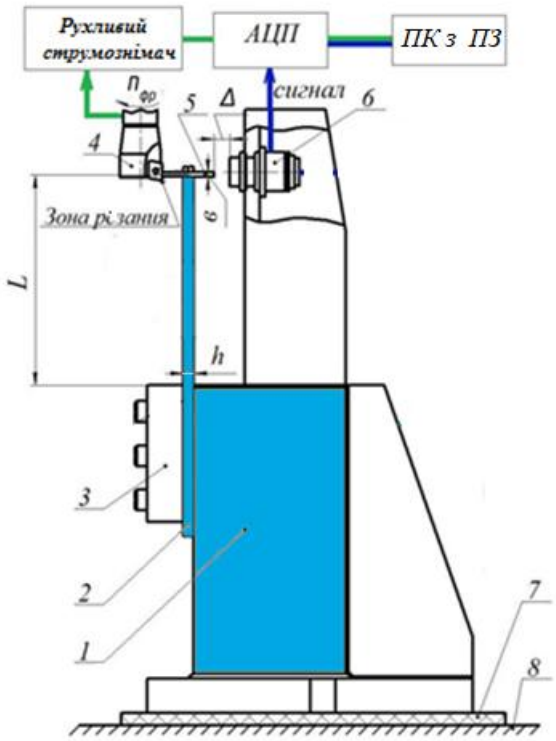
Незважаючи на те що в четвертій і п’ятій зоні при різанні виникає тільки один вид коливання, ці зони відрізняються тим, що в п’ятій зоні відсутній холостий хід, на відміну від четвертої зони. Основні роботи, де досліджується обробка при високошвидкісному фрезеруванні, розглядають п’яту швидкісну зону коливань, при цьому четверта зона залишається найменш дослідженою. Тому метою магістерської роботи є дослідження коливань у цій зоні та визначення їх впливу на якість обробленої поверхні.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Опис стенду для дослідження коливань

Експериментальні дослідження проводились на стенді, конструкція якого дозволяє моделювати обробку деталей з різних матеріалів та з різними динамічними характеристиками [16].

Схема стенду показана на рис. 2.1.



1 - масивна основа; 2 - тонкостінна пластина; 3 - притиск; 4 - кінцева фреза; 5 - зразок з оброблюваного матеріалу; 6 - датчик переміщення; 7 - електроізолятор; 8 - стіл фрезерного верстата

Рисунок 2.1 – Схема стенду для дослідження механічних коливань при фрезеруванні [16]

Він складається з масивної основи 1, встановленої на столі 8 фрезерного верстата, через електроізолятор 7. Тонкостінна пластина 2, що моделює тонкостінний елемент деталі (ТЕД), жорстко кріпиться до основи 1 притиском 3. На торці пластини 2 гвинтами закріплюється зразок 5, який обробляється кінцевою фрезою 4. В процесі фрезерування під дією сили різання тонкостінна пластина 2 пружно згинається і змінює величину зазору Δ, який вимірюється датчиком переміщення 6 (індуктивний проксиметр XS1M18AB120). Сигнал датчика оцифровується за допомогою аналогово - цифрового перетворювача (АЦП) і записується до персонального комп'ютера (ПК) з використанням програмного забезпечення (ПЗ). Для відмічання на осцилограмі часу різання використовується рухомий струмознімач, за допомогою якого замикається контакт між інструментом і деталлю при фрезеруванні [16].

2.2 Методика оцінки основних характеристик процесу різання

Для аналізу процесу різання при кінцевому фрезеруванні використовують осцилограму, яку поділяють на базові фрагменти (БФО), що охоплюють час різання та час холостого ходу (рис.2.2).

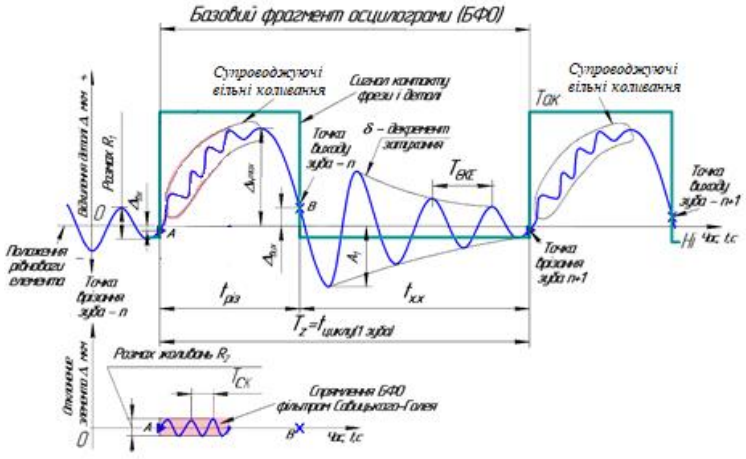


Рисунок 2.2 – Приклад базового фрагменту осцилограми та характеристики процесу різання деталі при кінцевому фрезеруванні [16]

Параметри, що характеризують процес різання при кінцевому фрезеруванні включають 12 параметрів [16]:

1. Розмах вільних загасаючих коливань ТЕД перед врізанням зуба фрези в припуск - R_1, мм [16].

2. Точка А врізання зуба фрези – $\Delta_{вр}$, мм - визначає величину відхилення точки врізання фрези від положення рівноваги [16].

3. Розмах супроводжуючих вільних коливань технологічної системи – R_2, мм - характеризує рівень коливань при різанні [16].

4. Період супроводжуючих вільних коливань ($T_{СК}$) у процесі зрізання припуску зубом фрези, с. Частота супроводжуючих вільних коливань $f_{СК} = \frac{1}{T_{СК}}, Гц$ [16].

5. Період зубцевої частоти (T_z) – час між врізанням сусідніх зубів інструменту, с. Зубцева частота - $f_z = \frac{1}{T_z}, Гц$ [16].

6. Час різання одним зубом фрези ($t_{різ}$) - визначає час між врізанням зубу фрези в припуск та його виходом з зони різання, с. [16].

7. Час холостого ходу ($t_{х.х}$) – визначає час між виходом зуба фрези з зони різання до врізання в припуск наступного зуба, с. [16].

8. Максимальне відхилення ТЕД у результаті дії змушуючої сили (Δ_{max}) - визначає максимальне відхилення ТЕД від положення рівноваги у період різання одним зубом, мм. [16].

9. Точка В виходу зуба фрези – $\Delta_{вих}$ – визначає відхилення від положення рівноваги ТЕД при виході зуба фрези, мм. [16].

10. Амплітуда першої хвилі вільних згасаючих коливань ТЕД (A_1) - характеризує відхилення від положення рівноваги ТЕД після виходу зуба фрези із зони різання, мм. [16].

11. Період вільних коливань ТЕД ($T_{ВКЕ}$) – час між сусідніми однойменними точками на осцилограмі коливань деталі поза зоною різання, сек. Частота вільних згасаючих коливань ТЕД $f_{ВКЕ} = \frac{1}{T_{ВКЕ}}, Гц$ [16].

12. Логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань ТЕД (δ) - характеризує інтенсивність дисипації коливальної енергії у пружній системі ТЕД [16].

При дослідженнях з'ясовувалося, які з перерахованих параметрів діють у четвертій швидкісній зоні коливань і як вони впливають на формування обробленої поверхні.

2.3 Вихідні данні для досліджень

Експерименти проводилися за наступних умов:

1. Різальний інструмент – фреза однозуба, ВК8, ∅32мм.

2. Матеріал обробляємого зразка – Ст. 3 ГОСТ 380-2005.

3. Частота обертання шпинделя – 2400 об/хв; 3000 об/хв; 3268 об/хв; 3429 об/хв; 3660 об/хв; 3700 об/хв; 4183 об/хв; 4655 об/хв; 26000 об/хв; 8000 об/хв;.

4. Подача на зуб – 0,1мм.

5. Радіальна глибина різання – 0,1мм.

6. Осьова глибина різання – 4мм.

7. Виліт тонкостінної пластини – 80мм.

Товщина пластини – 6мм.

Довжина пластини – 60мм.

8. Напрямок подачі – попутний та зустрічний.

9. Частота вільних коливань ТЕД:

– 463Гц при n= 2400 об/хв; 3000 об/хв; 3268 об/хв; 3429 об/хв; 4655 об/хв; 6000 об/хв; 8000 об/хв;

– 488Гц при n= 3660 об/хв; 3700 об/хв; 4183 об/хв.

При фрезеруванні записувались осцилограми коливань ТЕД з відмічанням часу різання, часу холостого ходу та періоду зубцевої частоти. Після різання записувалися профілограми оброблених поверхонь.

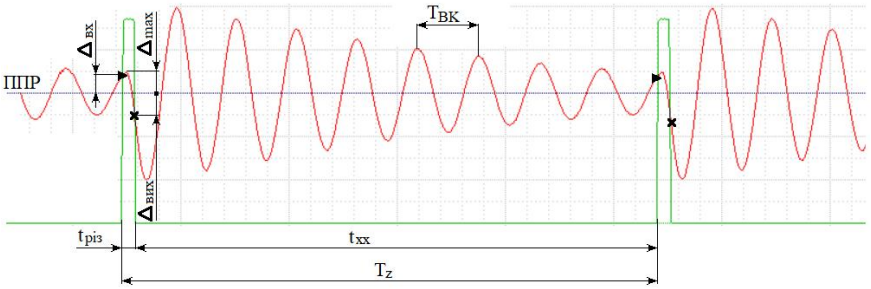
3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРЕТИЧНИХ ВИКЛАДОК

3.1 Розробка плану експерименту

1. Постановка задачі та визначення частот обертання шпинделя для проведення експериментів.
2. Вибір інструменту та оброблюємого матеріалу, підготовка технічного обладнання для роботи.
3. Проведення досліджень.
4. Обробка та аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

3.2 Аналіз результатів, отриманих в ході дослідження

Осцилограми, які записувалися при проведенні досліджень, розбивалися на БФО. З загальної кількості у 12 параметрів, що характеризують коливання при кінцевому фрезеруванні, у четвертій швидкісній зоні коливань, де при різанні виникають тільки вимушені коливання, з’являються тільки 7 з них (рис.3.1). Але для аналізу їх впливу на формоутворення обробленої поверхні розглядалися лише 5 з них, які діють при різанні. А саме, точка врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), час різання ($t_{різ}$), час холостого ходу ($t_{хх}$), точка виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$) та максимальні відхилення деталі від дії змушуючої сили (Δ_{max}). Період вільних коливань деталі $T_{ВК}$ виникає після різання, а період зубцевої частоти T_z є підсумковим результатом часу різання і часу холостого ходу. Слід зазначити, що при зустрічному та попутному фрезеруванні закони руху деталі, які записуються на фрагментах осцилограм, однакові. Величини усіх перерахованих вище параметрів наведені в таблицях додатків А- Ц.

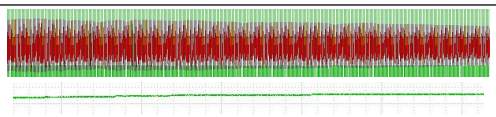
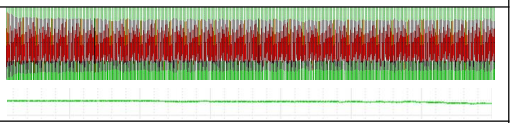
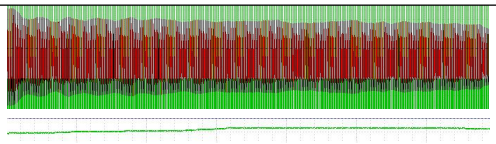
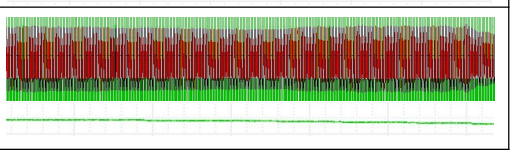


► - точка врізання фрези в деталь; **x** – точка виходу інструменту з деталі, ППР – положення пружної рівноваги, $T_{ВК}$ – період вільних коливань деталі, $t_{різ}$ – час різання, $t_{хх}$ – час холостого ходу, T_z – період зубцевої частоти, $\Delta_{вх}$ – відхилення точки врізання інструменту від ППР, $\Delta_{вих}$ – відхилення точки виходу інструменту від ППР, Δ_{max} – максимальне відхилення деталі від ППР.

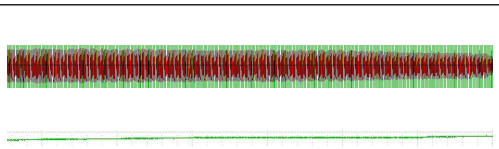
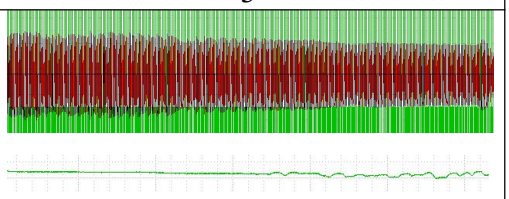
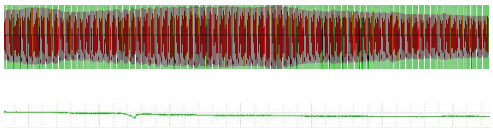
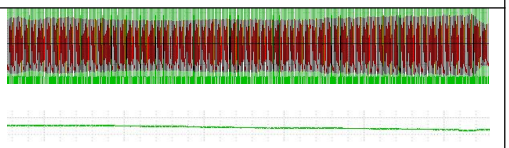
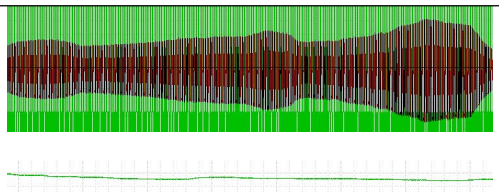
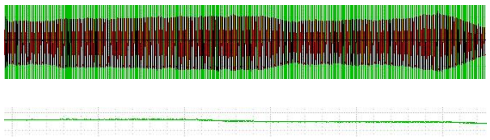
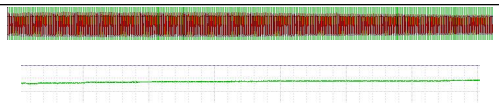
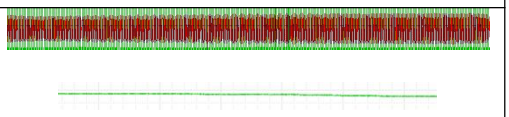
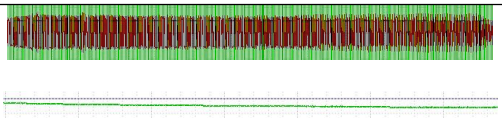
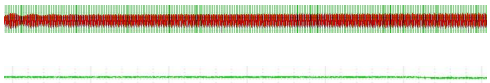
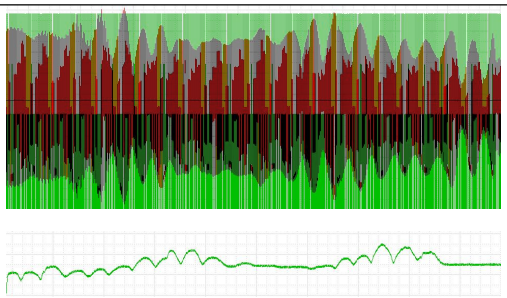
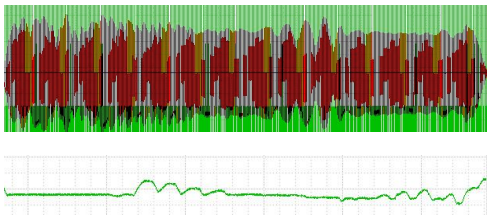
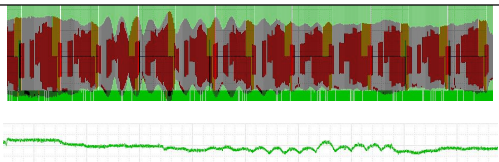
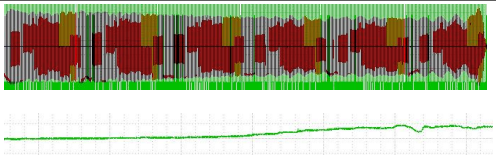
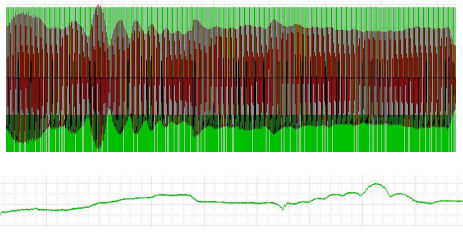
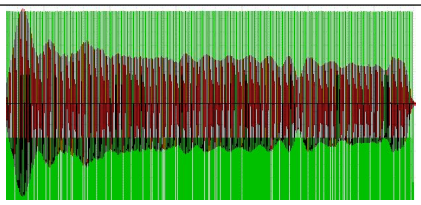
Рисунок 3.1 – БФО при зустрічному та попутному кінцевому фрезеруванні в четвертій швидкісній зоні

В таблиці 3.1 наведені отримані профілограми оброблених зразків та осцилограми коливань деталі при різанні в залежності від частоти обертання шпинделя та ЧВК зразка.

Таблиця 3.1 – Профілограми оброблених поверхонь та осцилограми коливань деталей

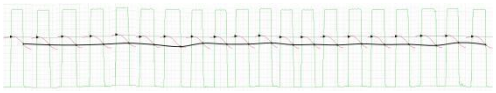
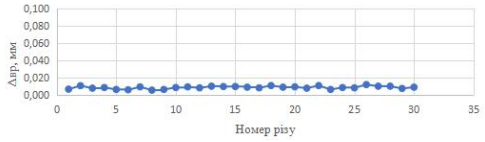
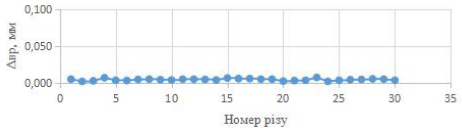
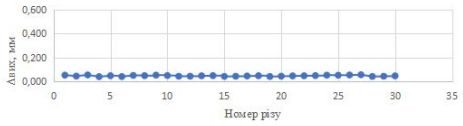
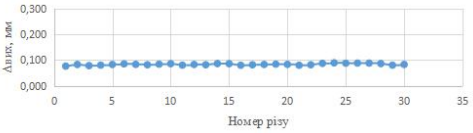
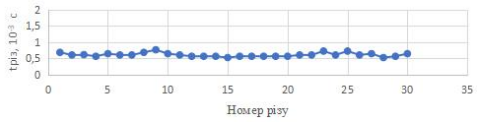
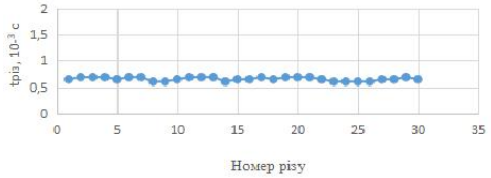
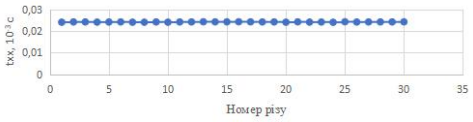
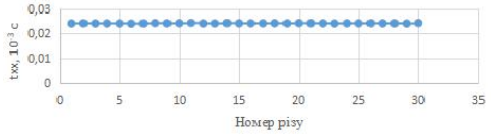
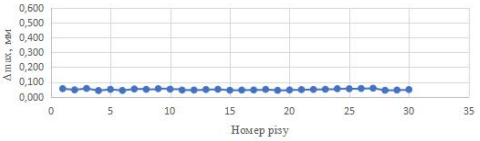
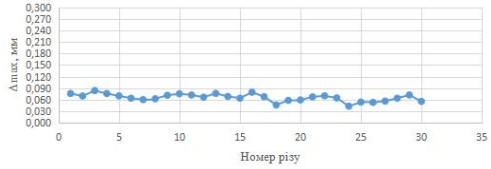
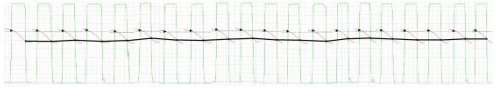
Частота вільних коливань пружного елемента 463 Гц		
Частота обертання шпинделя, об/хв	Зустрічне	Попутне
1	2	3
2400		
3000		

Продовження таблиці 3.1

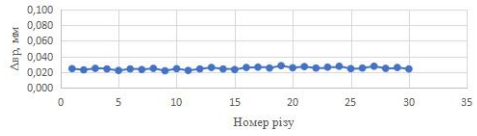
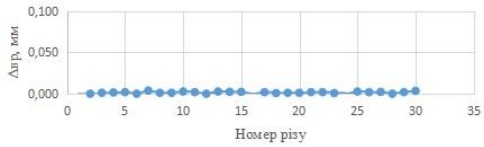
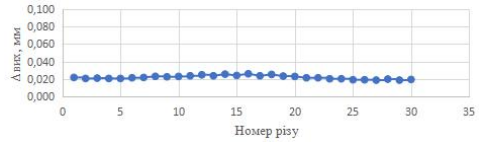
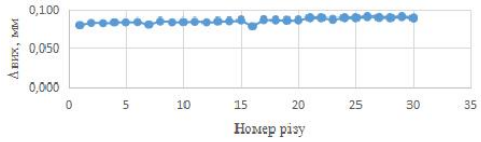
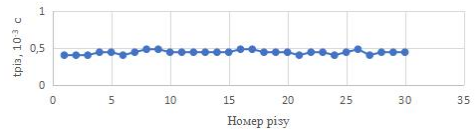
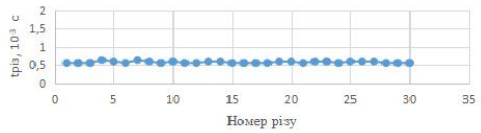
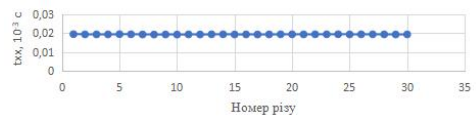
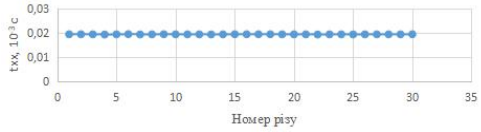
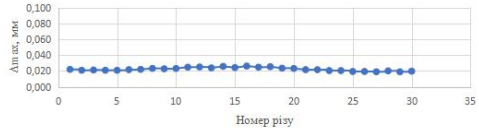
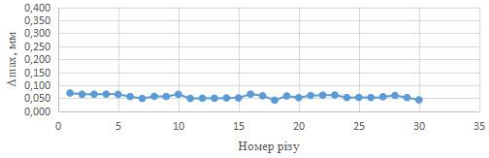
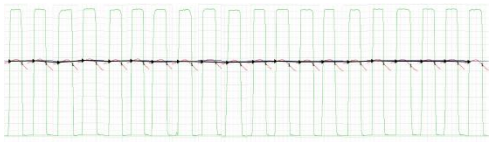
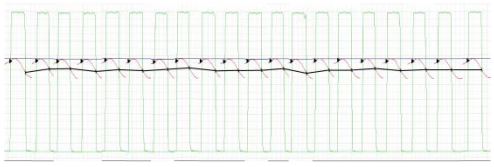
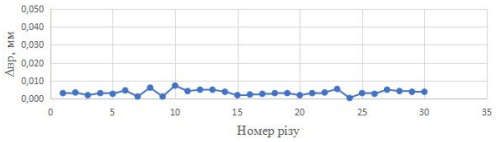
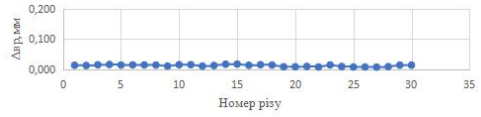
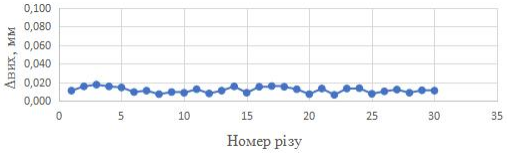
1	2	3
3268		
3429		
4655		
6000		
8000		
Частота вільних коливань пружного елемента 488 Гц		
3660		
3700		
4183		

За даними, наведеними в додатках А-Ц , в таблицях 3.2 та 3.3 побудовані графіки їх залежностей при фрезеруванні деталей, що мають частоту вільних коливань 463Гц та 488Гц.

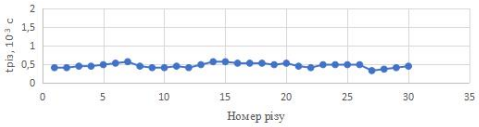
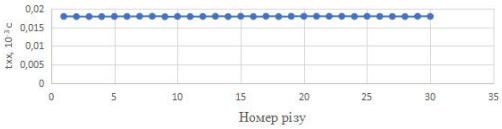
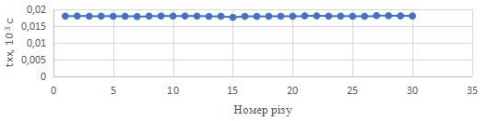
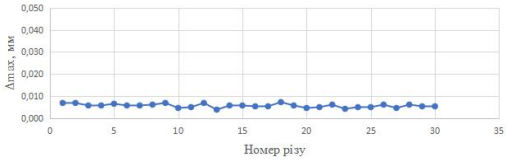
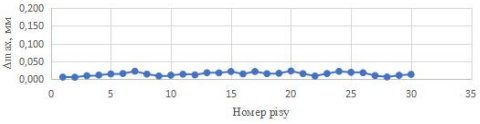
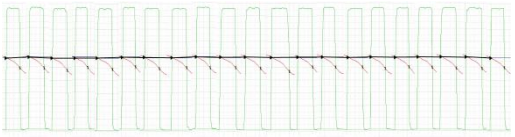
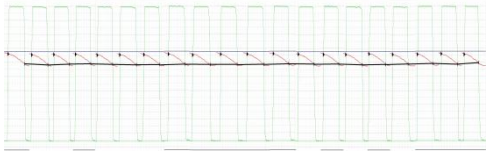
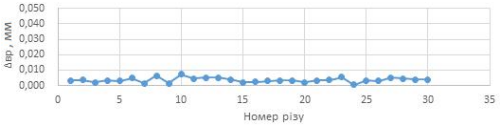
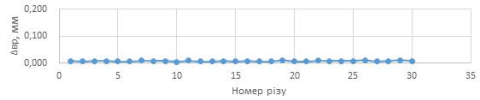
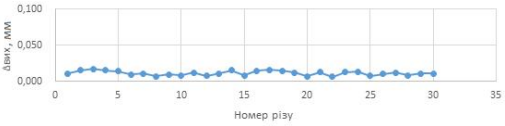
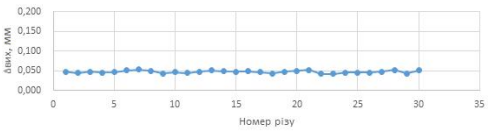
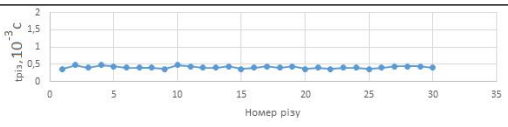
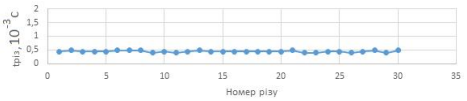
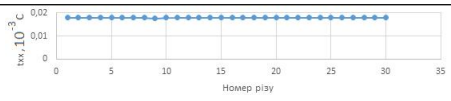
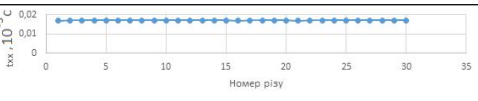
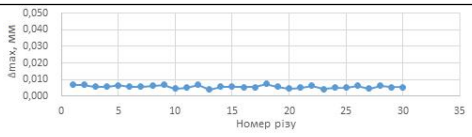
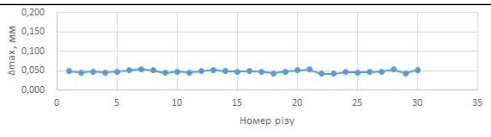
Таблиця 3.2 - Аналіз результатів досліджень коливань деталі, що має частоту вільних коливань 463Гц

Частота вільних коливань пружного елемента 463 Гц		
Параметр	Зустрічне	Попутне
1	2	3
n=2400 об/хв		
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
n=3000 об/хв		
Фрагменти осцилограм		

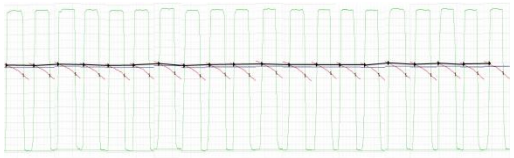
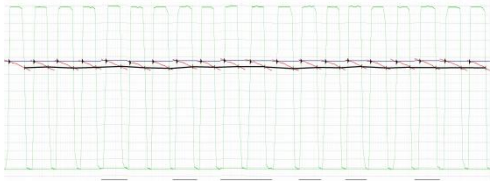
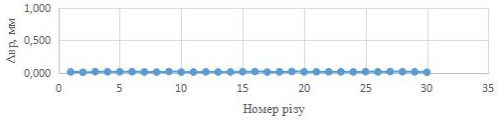
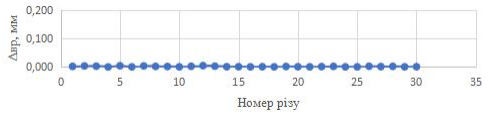
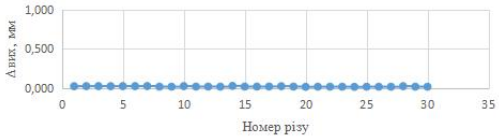
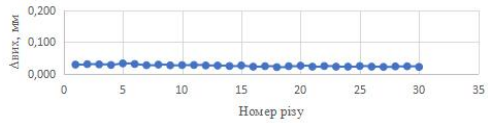
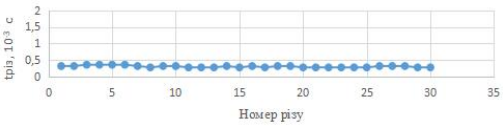
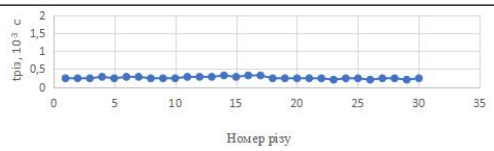
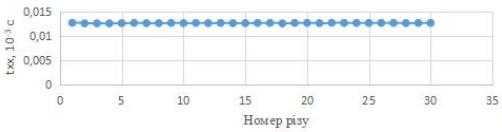
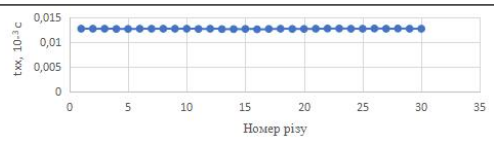
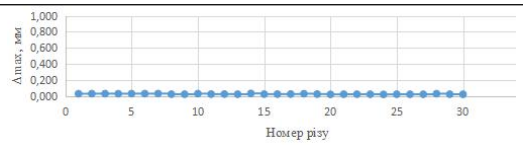
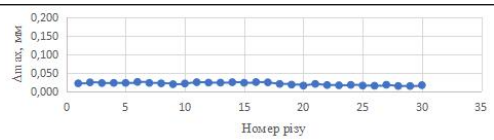
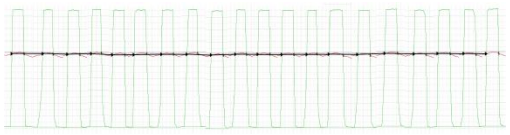
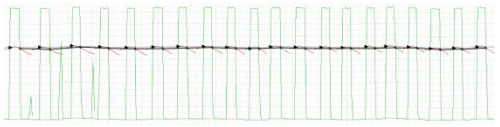
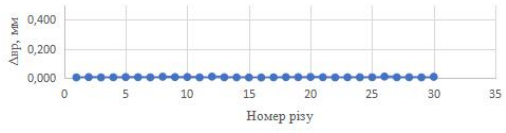
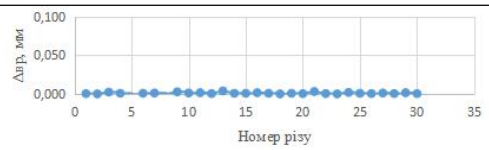
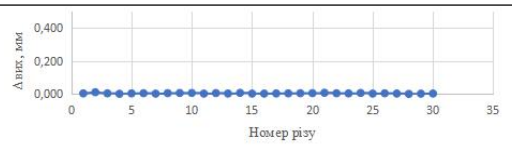
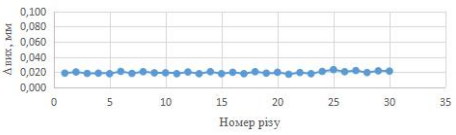
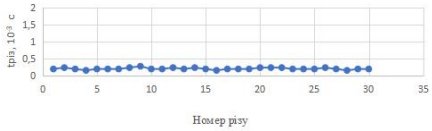
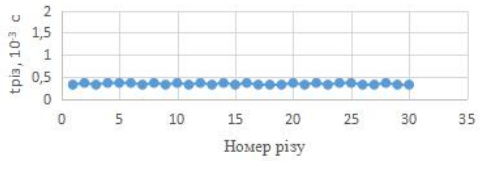
Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
n=3268 об/хв		
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		

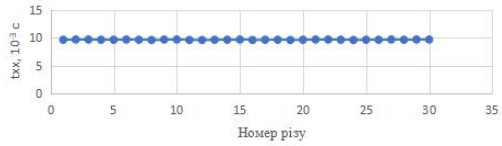
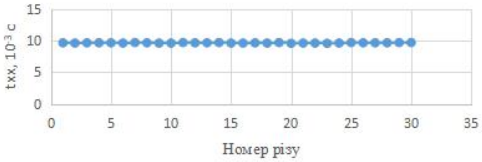
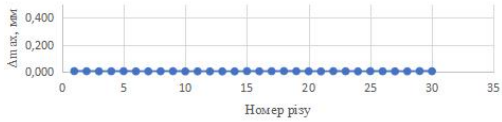
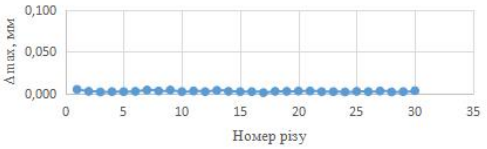
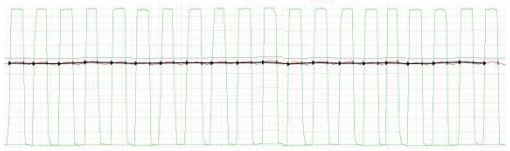
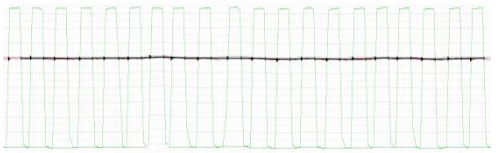
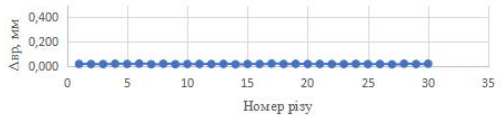
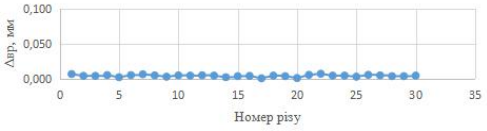
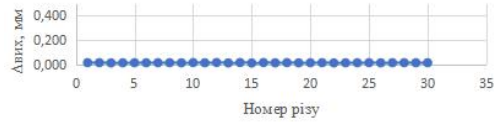
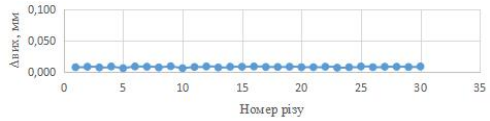
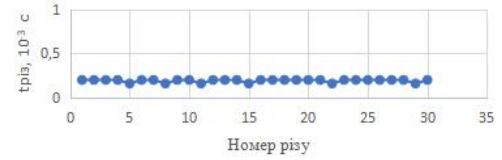
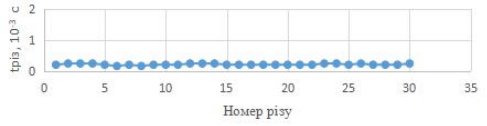
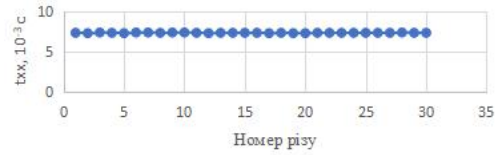
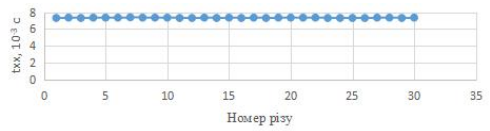
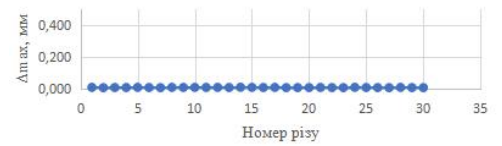
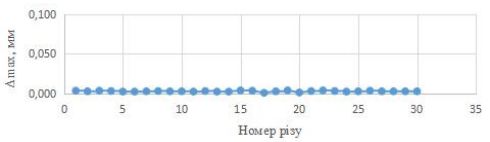
Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
n=3429 об/хв		
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		

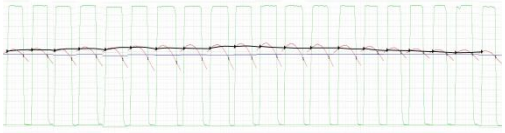
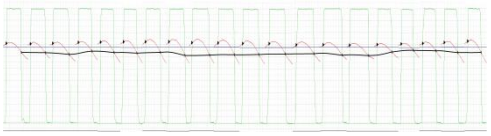
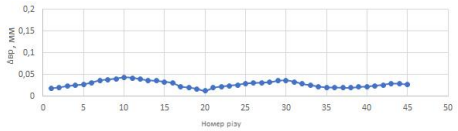
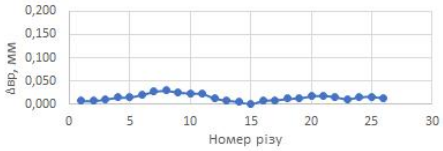
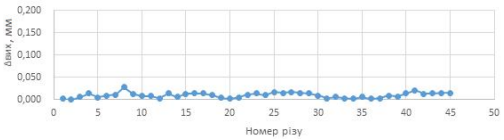
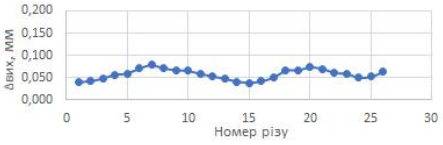
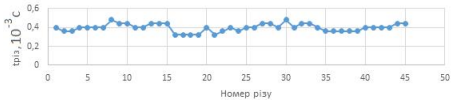
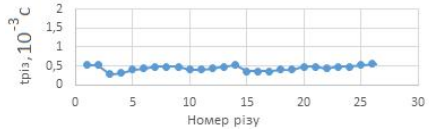
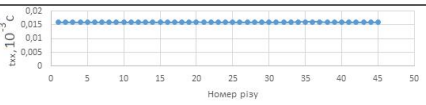
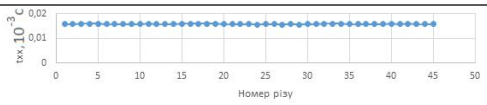
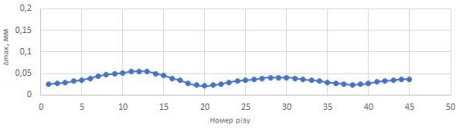
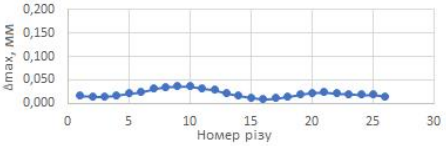
Продовження таблиці 3.2

1	2	3
	n=4655 об/хв	
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
	n=6000 об/хв	
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		

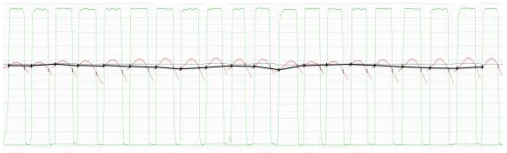
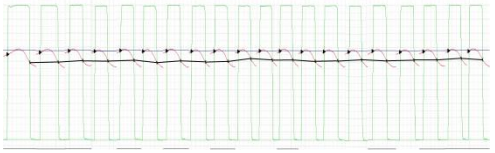
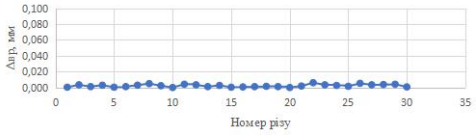
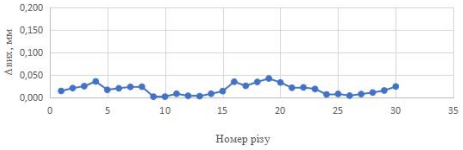
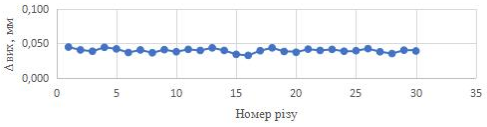
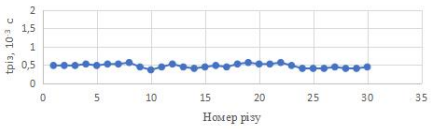
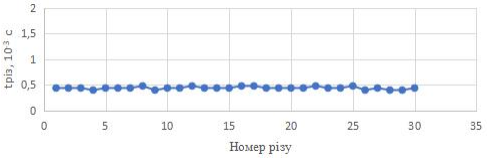
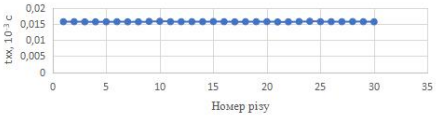
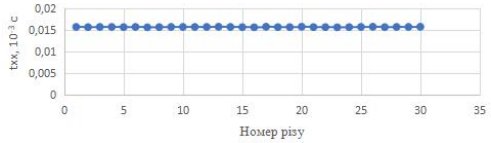
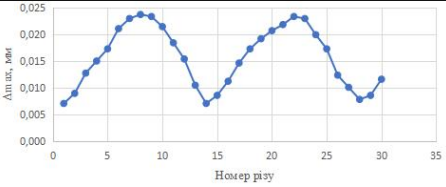
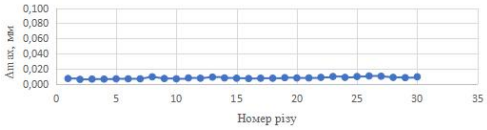
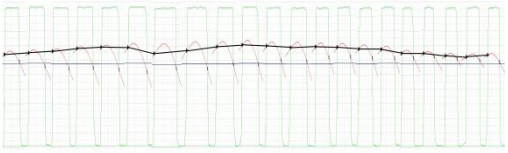
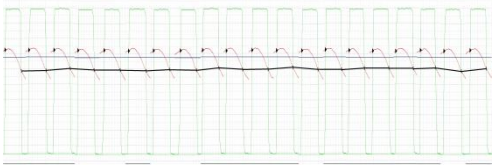
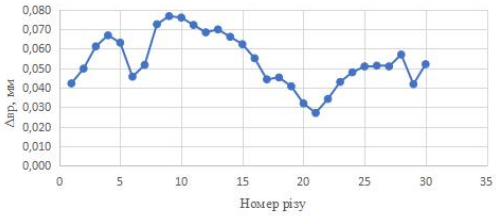
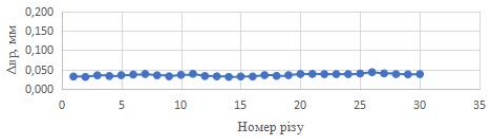
Продовження таблиці 3.2

1	2	3
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
n=8000 об/хв		
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		

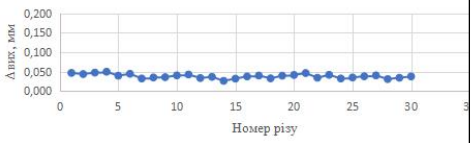
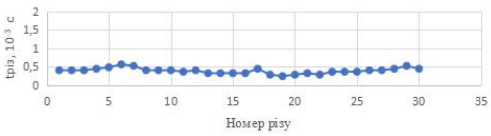
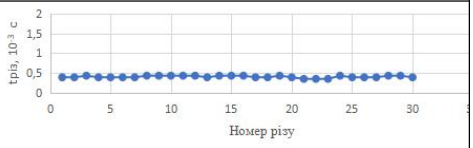
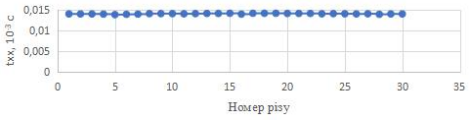
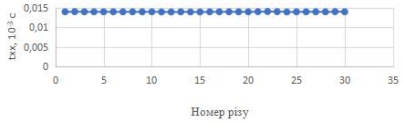
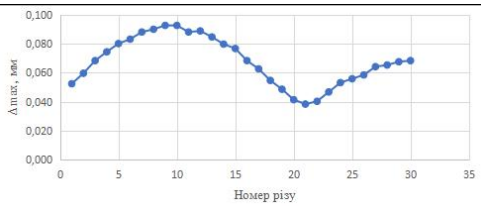
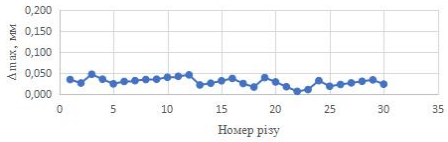
Таблиця 3.3 - Аналіз результатів досліджень коливань деталі, що має частоту вільних коливань 488Гц

Частота вільних коливань пружного елемента 488 Гц		
Параметр	Зустрічне	Попутне
1	2	3
n=3660 об/хв		
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		

Продовження таблиці 3.3

1	2	3
	n=3700 об/хв	
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		
	n=4183 об/хв	
Фрагменти осцилограм		
Зміна положення від ППР точки врізання інструменту		

Продовження таблиці 3.3

1	2	3
Зміна положення від ППР точки виходу інструменту		
Зміна часу різання		
Зміна часу холостого ходу		
Зміна положення від ППР максимального відхилення деталі		

Аналіз триманих результатів показує на наступне.

Графіки залежностей при частотах обертання шпинделя 2400 об/хв, 3000 об/хв, 3268 об/хв, 4655 об/хв,6000 об/хв, 8000 об/хв показують, що час різання на кожному різі однаковий, не змінюється і час холостого ходу. Це говорить про те, що оброблена поверхня формується залишками поверхні різання після переміщення зразка на величину подачі. При зустрічному кінцевому фрезеруванні на обробленій поверхні залишається початок поверхні різання, який формується відхиленням від ППР точки врізання інструменту в деталь та частина, яку попередньо можна прийняти, що дорівнює максимальному відхиленню деталі. Згідно з даними графіків значення цих параметрів протягом різання не змінюється, тому оброблена поверхня немає хвилястості.

При попутному кінцевому фрезеруванні на обробленій поверхні залишається кінець поверхні різання, який формується відхиленнями від ППР максимального відхилення деталі та точки виходу інструменту з деталі. Згідно з

даними графіків значення цих параметрів під час різання не змінюється, тому на обробленій поверхні хвилястості немає.

Графіки залежностей при частотах обертання шпинделя 3268 об/хв, 3660 об/хв, 3700 об/хв, 4183 об/хв показують, що на відміну від результатів попереднього фрезерування, формоутворюючі показники мають періодичну зміну, яка за кроком співпадає з хвилястістю на обробленій поверхні. На цій підставі можна констатувати, що формоутворюючими параметрами при зустрічному фрезеруванні у четвертій швидкісній зоні коливань є два відхилення від ППР, а саме точки врізання інструменту в деталь та максимальне відхилення деталі, а при попутному - точка виходу інструменту з деталі та максимальне відхилення від ППР. Але в одному випадку ці відхилення мають стале положення від ППР, а в другому не стале, що утворює хвилястість на обробленій поверхні. З цього приводу для пояснення використовується відношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань k [14]. Резонансні умови, за яких процес фрезерування перестає бути сталим, виникають, якщо це співвідношення буде цілим числом.

Для наших умов розрахуємо наступні значення:

1. Частоту вимушених коливань:

$$f_{ВК} = \frac{nz}{60} \qquad (3.1)$$

де $f_{ВК}$ - частота вимушених коливань, Гц;

n - частота обертання шпинделя, об/хв;

Z – число зубів інструменту

2. Відношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань, коефіцієнт k [14]

$$k = \frac{f_{ВКЕ}}{f_{ВК}} \qquad (3.2)$$

де $f_{ВКЕ}$ - частота вільних коливань елемента, Гц

Виконані розрахунки коефіцієнту k записані у таблицях 3.4 та 3.5.

Таблиця 3.4 - Результати розрахунків коефіцієнту k при ЧВК деталі 463 Гц

Частота обертання шпинделя n, об/хв	Частота вимушених коливань, $f_{ВК}$, Гц	Коефіцієнт k
2400	40	11,575
3000	50	9,26
3268	54,46	8,501
3429	5715	8,101
4655	77,583	5,967
6000	100	4,63
8000	133,33	3,472

Таблиця 3.5 - Результати розрахунків k при ЧВК деталі 488 Гц

Частота обертання шпинделя n, об/хв	Частота вимушених коливань, $f_{ВК}$, Гц	Коефіцієнт k
3660	61	8
3700	61,66	7,914
4183	69,716	6,99

Дані таблиці 3.4 показують, що отримані результати розрахунків співвідношення частоти вільних коливань до частоти вимушених коливань не мають цілих кратних значень. Процес фрезерування був сталим.

Дані таблиці 3.5 показують, що значення коефіцієнта k або має кратне значення, або близьке до нього. При кінцевому фрезеруванні за таких умов оброблена поверхня мала хвилястий профіль, а сам процес різання не був сталим.

Але отриманих значень недостатньо для однозначних висновків. Тому роботи в напрямку визначення сталості процесу різання за співвідношенням частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань потребують додаткових досліджень.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ КРОКУ ТА ВИСОТИ ХВИЛЯСТОСТІ НА ПРОФІЛОГРАМІ ВІД ПЕРІОДИЧНОСТІ КОЛИВАНЬ ДЕТАЛІ ПРИ РІЗАННІ

Для визначення того, що між коливаннями деталі при різанні та профілограмою обробленої поверхні існує залежність, були виміряні крок хвилястості на оброблених поверхнях та періодичність зміни точки врізання інструменту при зустрічному фрезеруванні та точки виходу інструменту при попутному фрезеруванні. Для аналізу були використані данні, що отримані при фрезеруванні з частотою обертання шпинделя n=3660 об/хв.

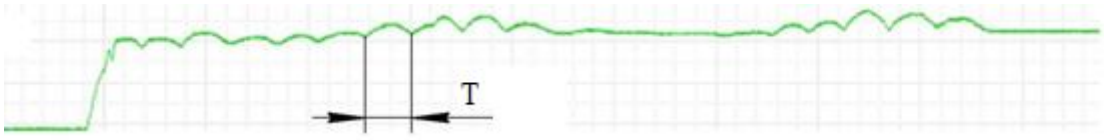
Крок хвилястості S_w за профілограмою визначається по формулі:

$$S_w = \frac{T \cdot \nu}{60} \qquad (4.1)$$

де T – період кроку хвилястості на профілограмі, с (рис.4.1);

ν – швидкість подачі, з якою записувалась профілограма, ν=35,5 мм/хв.

$$S_w = \frac{3{,}22 \cdot 35{,}5}{60} = 1{,}9\text{мм}$$



T – період хвилястості на профілограмі (3,22 с)

Рисунок 4.1 - Профілограма обробленої поверхні після зустрічного фрезерування з частотою обертання шпинделя n=3660 об/хв

По осцилограмі виміряємо час, за який відбувається зміна значення точки врізання інструменту в деталь від положення пружної рівноваги (рис. 4.2). Розрахунок кроку робимо за формулою (4.1), але при швидкості подачі ν=366 мм/хв.

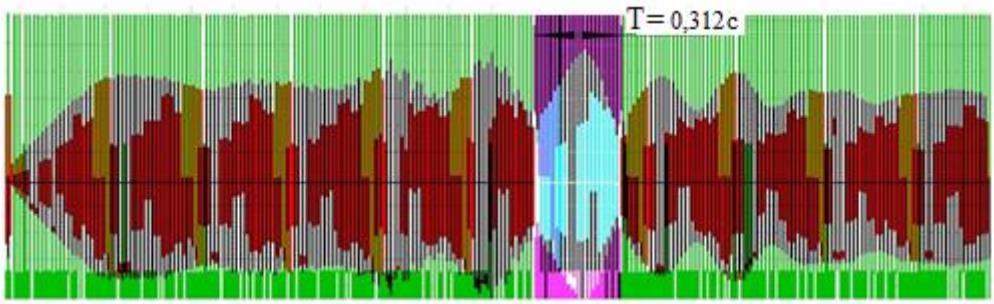


Рисунок 4.2 – Осцилограма, що записана при зустрічному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя n=3660 об/хв

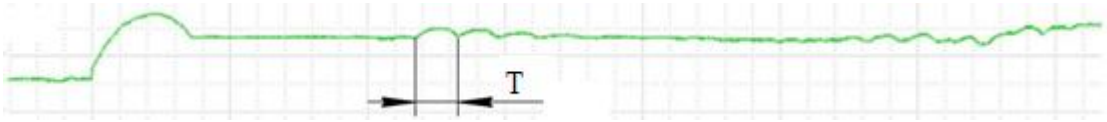
$$S_w = \frac{0{,}312 \cdot 366}{60} = 1{,}9\text{мм}$$

З отриманих результатів можна зробити висновок, що крок хвилястості на обробленій поверхні, визначений за профілограмою та за фрагментом осцилограми, має однакові значення, тобто оброблена поверхня при зустрічному фрезеруванні утворюється точкою врізання інструменту в деталь

При розрахунках кроку хвилястості для попутного фрезерування (рис.4.3)

скористаємося формулою (4.1):

$$S_w = \frac{2{,}4 \cdot 35{,}5}{60} = 1{,}4\text{мм}$$



$T-$ період хвилястості на профілограмі (2,4 с)

Рисунок 4.3 - Профілограма обробленої поверхні після попутного фрезерування з частотою обертання шпинделя n=3660 об/хв

На осцилограмі знаходимо ділянку з періодичністю Т, яка відповідає за утворення хвилястості на профілограмі, та вимірюємо період (рис. 4.4).

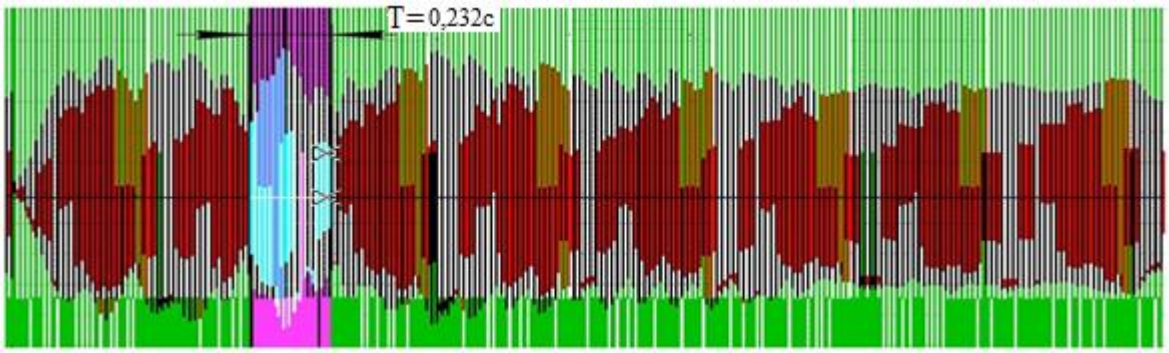


Рисунок 4.4 - Осцилограма, що записана при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя n=3660 об/хв

Розрахунок кроку періодичності змін відхилення від ППР точки виходу інструменту з деталі виконуємо за формулою (4.1)

$$S_w = \frac{0{,}232 \cdot 366}{60} = 1{,}4\text{мм}$$

Однакові результати кроку хвилястості показують на те, що при попутному фрезеруванні хвилястість на обробленій в четвертій швидкісній зоні коливань поверхні утворюється відхиленням від ППР точки виходу інструменту з деталі.

Для визначення висоти хвилястості по профілограмі (рис.4.5) треба її виміряти та перевести розмірність «Вольт» в розмірність «мм» за формулою (4.2).

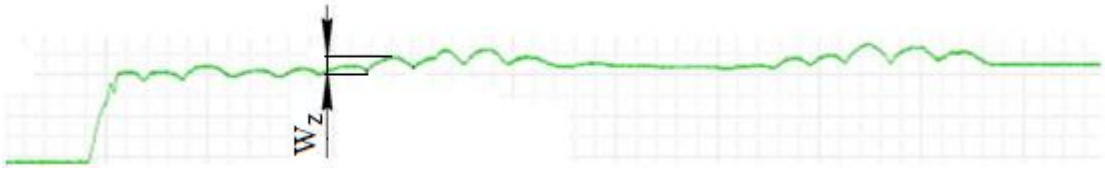


Рисунок 4.5 – Висота хвилястості на профілограмі

$$W_z = V \cdot k \qquad (4.2)$$

де V – висота хвилястості на профілограмі з розмірністю Вольт;

k – коефіцієнт, 0,3 (мм/Вольт)

Висота хвилястості при зустрічному фрезеруванні

$$W_z = 0{,}097 \cdot 0{,}3 = 0{,}029 мм$$

Висота хвилястості при попутному фрезеруванні

$$W_z = 0{,}097 \cdot 0{,}3 = 0{,}029 мм$$

При визначенні висоти хвилястості по осцилограмі розраховують різницю між найбільшим та найменшим значеннями максимального відхилення деталі. Отриманий результат переводять у розмірність «мм».

Для зустрічного фрезерування маємо

$$W_z = 0{,}104 \cdot 0{,}3 = 0{,}031 мм$$

Для попутного фрезерування маємо

$$W_z = 0{,}09 \cdot 0{,}3 = 0{,}027 мм$$

Отримані результати розрахунків показують на близькість значень. При цьому похибка для зустрічного фрезерування складає 6,45%, для попутного 6,89%.

Підводячи підсумки можна сказати, що закон руху деталі при різанні визначає, якою буде форма оброблюваної поверхні після фрезерування у четвертій швидкісній зоні коливань.

5 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ

При призначенні режимів різання для обробки тонкостінних деталей на підприємствах, як правило не враховуються види коливань, тому використовують метод пробних проходів, при якому з'ясовують, на яких частотах обертання шпинделя буде стале фрезерування. Тому економічна ефективність буде визначена за тими затратами, які необхідні для виконання цих робіт. Пропонуємий підхід оцінки сталості фрезерування за співвідношенням частоти вільних коливань до частоти вимушених коливань дозволяє відійти від цієї практики.

Розрахуємо економічний ефект від використання пропонуємого підходу [19].

1) Заробітна плата основних виробничих робітників $З_о$:

$$З_о=\sum_{i=1}^{m_{оп}} t_{шт_i} \cdot C_{тар} \cdot К_б \cdot k_{доп.} \cdot k_{соц} \qquad (5.1)$$

де $m_{оп}$ – кількість операцій у технологічному процесі;

$t_{шт_i}$ – норма штучного часу виконання і-ой операції, год (для переведення хвилин у години розділити на 60);

$C_{тар}$ – годинна тарифна ставка виробничого робітника верстатника на операції, грн;

$К_б$ – коефіцієнт, що враховує оплату основного робітника верстатника при багатоверстатному обслуговуванні;

$k_{доп.}$ – коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату, $k_{доп}$=1,2;

$k_{соц}$ – коефіцієнт, що враховує страхові внески, $k_{соц}$=1,4.

2) Заробітна плата допоміжних робітників:

$$З_н=\frac{C_{тар.н} \cdot Ф_р \cdot Ч_н \cdot kдоп. \cdot kсоц}{N} \qquad (5.2)$$

де $C_{тар.н}$ – годинна тарифна ставка, грн;

$Ч_н$ – чисельність робітників відповідної категорії, чол.

3) Розрахуємо амортизаційні відрахування на обладнання:

$$A_{від}=\sum_{i=1}^{m_{on}} \frac{K_i \cdot H_{ai} \cdot t_{oi}}{100 \cdot F_д \cdot 60} \quad (5.3)$$

де K_i – первісна вартість обладнання (оснащення) на і-ої операції, грн.;

H_{ai} – річна норма амортизаційних відрахувань на обладнання (оснащення) на і-ої операції (%);

t_{oi} – основний (машинний) час на і-ої операції, хв;

$F_д$ – дійсний (ефективний) фонд часу роботи устаткування (оснащення), год.

4) Витрати на інструмент:

$$S_{ін}=\sum_{i=1}^{m_{on}} \sum_{j=1}^{n_{ін}} \frac{Ц_{інij} \cdot t_{шmij} \cdot \eta_m}{T_{ij} \cdot (n_j+1)}, \quad (5.4)$$

де $Ц_{інij}$ – ціна інструменту j-го виду на і-ої операції, що визначається за каталогами підприємств, фірм-постачальників інструменту чи сайтах мережі Інтернет, грн./шт.;

$t_{шmij}$ – штучний час роботи j-го інструменту на і-ої операції, хв;

η_m – коефіцієнт машинного часу, що визначається як відношення $t_{маш}/t_{шт}$;

T_{ij} – період стійкості інструменту j-го виду на і-ої операції, хв;

$n_{ін}$ – номенклатура інструментів на і-ої операції;

n_j – число переточок інструменту j-го виду до повного зношування або кількість ріжучих граней інструменту

5) Витрати на технологічну електроенергію:

$$S_e=\frac{N_в \cdot k_N \cdot k_ч \cdot k_{одд} \cdot k_W \cdot t_{штк}}{\eta \cdot k_в} \cdot Ц_e \quad (5.5)$$

де $Nв$ – встановлена потужність головного електродвигуна, квт;

k_N – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за потужністю (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 0,9, для решти обладнання - 0,8);

$k_ч$ – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за часом (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 0,7, для решти обладнання - 0,6);

$k_{од}$ – середній коефіцієнт одночасної роботи всіх електродвигунів верстата (для верстатів з ЧПК прийняти рівним 1, для решти обладнання - 0,6);

k_w – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі заводу, k_w=1,08;

$Ц_е$ – вартість 1 кВт×год електроенергії (тариф для підприємств становить 3,45 грн. за 1 кВт×год).

6) Витрати на налаштування інструментів поза верстатом:

$$S_н=\frac{\varphi \cdot C_{гн} \cdot t_{iн} \cdot t_o \cdot K_m}{T_м \cdot m \cdot 60} \qquad (5.6)$$

де φ – коефіцієнт, що враховує випадковий спад та поломки інструменту, φ=1,3;

$C_{гн}$ – середньогодинна заробітня плата наладчиків, грн./год;

$t_{iн}$ – середній час налаштування одного інструменту поза верстатом, хв ($t_{iн}$=4 хв . – для токарних верстатів з ЧПК; $t_{iн}$ = 5 хв. - для верстатів з ЧПК свердлильної, фрезерної та розточувальної груп);

t_o – основний час роботи інструменту на операції, хв.;

K_m – коефіцієнт, що враховує питому вагу основного технологічного часу у штучному часі;

$T_м$ – середня стійкість інструменту, хв.;

m – число граней ріжучої пластини, що не переточується, з механічним кріпленням, шт.

7) Інші загальновиробничі витрати:

$$I_н=З_o \cdot k_{заг} \qquad (5.7)$$

де $k_{заг}$ – коефіцієнт, що враховує інші загальновиробничі витрати, віднесені до заробітної плати основних виробничих робітників, або до суми основної заробітної плати основних виробничих робітників та витрат, пов'язаних з роботою обладнання відповідно, $k_{заг}$= 0,2…0,25.

У таблиці 5.1 наведені вихідні данні для розрахунків

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

Розрахункові параметри	Варіанти технологічного процесу	
	Без додаткової обробки зразків	З додатковою обробкою зразків
Кількість зразків для проведення досліду $N_р$	20	20
1	2	3
Модель верстата	МС 654-D-WL 4M	МС 654-D-WL 4M
Штучний час $T_{шт}$, хв.	1,61	1,73
Розряд верстатника	4	4
Розряд наладчика	4	4
Число верстатів, що обслуговуються за зміну:	1	1
верстатником	1	1
наладчиком		
Тарифна ставка основного робітника, грн/год	57,5	57,5
Тарифна ставка наладчика, грн/год	50,9	50,9
Число змін m	1	1
Оптова ціна верстата F, грн	3441120	3441120
Число верстатів	1	1
Сервісний термін обслуговування верстата n, років	15	15
Норма амортизаційних відрахувань $Н_а$ %	12,2	12,2
Встановлена потужність електродвигунів N	20,0	20,0

Заробітну плату основних робітників розраховуємо за формулою (5.1), а для наладчиків використаємо формулу (5.2).

Таблиця 5.2 - Заробітна плата верстатника при без додаткової обробки зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$C_{тар}$, грн	$k_{доп}$	$k_{соц}$	$З_о$,грн
1	Фрезерна	0,037	57,5	1,2	1,4	3,574
2		0,03	57,5	1,2	1,4	2,898
3		0,024	57,5	1,2	1,4	2,318
Всього						Σ=8,791

Таблиця 5.3 - Заробітна плата верстатника при додатковій обробці зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$C_{тар}$, грн	$k_{доп}$	$k_{соц}$	$З_о$,грн
1	Фрезерна	0,185	57,5	1,2	1,4	17,871
2		0,15	57,5	1,2	1,4	14,49
3		0,12	57,5	1,2	1,4	11,592
Всього						Σ=43,953

Таблиця 5.4 - Заробітна плата наладчика.

Номер зразка	Найменування операції	$C_{тар.н}$, грн	$Ф_{р,}$ год	$Ч_н$	$k_{доп}$	$k_{соц}$	$З_н$, грн
1-3	Фрезерна	50,9	36,2	1	1,2	1,4	154,77
Всього							Σ=154,77

Амортизаційні відрахування на обладнання розраховуємо за формулою (5.3) .

Таблиця 5.5 - Відрахування на амортизацію при без додаткової обробки зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	К, грн	$Н_а$, %	$F_д$	$А_{від}$, грн.
1	Фрезерна	0,037	3441120	12,2	4015	0,064
2		0,03	3441120	12,2	4015	0,052
3		0,024	3441120	12,2	4015	0,042
Всього						Σ=0,159

Таблиця 5.6 - Відрахування на амортизацію обладнання при додатковій обробці зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	К, грн	$Н_а$, %	$F_д$	$А_{від}$, грн.
1	Фрезерна	0,185	3441120	12,2	4015	0,322
2		0,15	3441120	12,2	4015	0,261
3		0,12	3441120	12,2	4015	0,209
Всього						Σ=0,793

Витрати на інструмент розраховуємо за формулою (5.4).

Таблиця 5.7 - Витрати на інструмент без додаткової обробки зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$Ц_i$, грн	Типорозміри інструменту	n_i, кількість інструментів	Стійкість Т, хв	Число переточок, n	$\eta_{мі}$	$S_{ін}$, грн
1	Фрезерна	0,037	545	фреза кінцева	1	90	50	0,35	0,039
2		0,03						0,35	0,032
3		0,024						0,35	0,025
Всього									Σ=0,096

Таблиця 5.8 - Витрати на інструмент при додатковій обробці зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$Ц_i$, грн	Типорозміри інструменту	n_i, кількість інструментів	Стійкість Т, хв	Число переточок, n	$\eta_{мі}$	$S_{ін}$, грн
1	Фрезерна	0,185	545	фреза кінцева	1	90	50	0,35	0,196
2		0,15						0,35	0,159
3		0,12						0,35	0,127
Всього									Σ=0,482

Примітка: * – Витрати, включені в договір про постачання обладнання.

Витрати на технологічну електроенергію розраховуємо за формулою (5.5) .

Таблиця 5.9 - Витрати на силову електроенергію без додаткової обробки зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$Ц_e$, грн./кВт	N_e кВт	k_N	$k_ч$	$k_{од}$	k_W	η_e	$k_в$	S_e
1	Фрезерна	0,037	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	2,326
2		0,03	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	1,886
3		0,024	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	1,509
Всього											Σ=5,721

Таблиця 5.10 - Витрати на силову електроенергію при додатковій обробці зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$Ц_e$, грн./кВт·	N_e кВт	k_N	$k_ч$	$k_{од}$	k_W	η_e	$k_в$	S_e
1	Фрезерна	0,185	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	11,632
2		0,15	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	9,431
3		0,12	4,32	20	0,9	0,7	1	1,08	0,85	1,1	7,545
Всього											Σ=28,60

Витрати на налаштування інструментів поза верстатом розраховуємо за формулою (5.6).

Таблиця 5.11 - Витрати на налаштування інструмента без додаткової обробки зразків.

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$C_{гн}$, грн/год	Типи інструменту	n_i	$t_{ін}$, хв.	$K_т$	$T_м$, хв.	m	$S_н$, грн
1	Фрезерна	0,037	50,9	фреза	1	5	0,025	90	3	0,0000189
2		0,03	50,9		1	5	0,023	90	3	0,0000141
3		0,024	50,9		1	5	0,021	90	3	0,0000103
Всього										Σ=0,0000433

Таблиця 5.12 - Витрати на налаштування інструмента при додатковій обробкою зразків

Номер зразка	Найменування операції	$t_{різ}$, хв.	$C_{гн}$, грн/год	Типи інструменту	n_i	$t_{ін}$, хв.	$K_т$	$T_м$, хв.	m	$S_н$, грн
1	Фрезерна	0,185	50,9	фреза	1	5	0,025	90	3	0,00042
2		0,15	50,9		1	5	0,023	90	3	0,00032
3		0,12	50,9		1	5	0,021	90	3	0,00024
Всього										Σ=0,00098

Узагальнені результати розрахунку технологічної собівартості обробки за варіантами наведено у таблиці 5.13.

Таблиця 5.13 - Розрахунок елементів технологічної собівартості, грн.

Елементи собівартості		Варіанти технологічного процесу	
		Без додаткової обробки зразків	З додатковою обробкою зразків
1	2	3	4
Заробітна плата верстатника	$З_о$	8,791	43,952
Заробітна плата наладчика	$З_н$	154,77	154,77
Відрахування на амортизацію обладнання	$А_{від}$	0,159	0,793
Витрати на різальний інструмент	$S_{ін}$	0,096	0,482
Витрати на електроенергію	$S_е$	5,721	28,607
Витрати на налаштування інструментів поза верстатом	$S_н$	0,0000433	0,00098
Витрати інші	$І_н$	1,758	8,79
Технологічна собівартість	$С_т$	171,2950433	237,39598

Розрахуємо умовний економічний ефект за формулою:

$$Е_{ур}=(237,39598-171,2950433)\cdot 20= 1322,018 \text{ грн.}$$

Таким чином, впровадження визначення сталих режимів фрезерування через відношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань дозволяє отримати економічний ефект у 1322,018 грн для деталі одного найменування.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Техніка безпеки при роботі на фрезерних верстатах

Під час роботи фрезерного верстата зона різання є небезпечною зоною, де обертаються ріжучі інструменти (фрези), утворюється стружка і використовується мастильно-охолоджувальна рідина. [20].

Фрези можуть стати причиною травмування операторів верстатів при порушенні правил експлуатації верстата, перевищенні режимів різання і відсутності захисного пристрою. Найбільшу небезпеку для операторів фрезерних верстатів становлять незахищені дискові та кінцеві фрези, що використовуються при фрезеруванні на фрезерних верстатах.[20].

Нещасні випадки можуть статися, коли заготовки затискаються або знімаються з верстата руками оператора біля незахищеного леза. Неправильно підібрані або несправні затискні пристрої також становлять небезпеку для оператора верстата. Недостатньо надійне затискання може призвести до розриву заготовки та травмування оператора. [20].

Стружка, що утворюється під час різання, становить значну небезпеку для операторів верстатів та оточуючих. Вона знаходиться далеко від верстата, має високу температуру (400-600 °C) і високу кінетичну енергію та може спричинити травми очей і опіки шкіри.[20].

У багатьох випадках основний потік стружки, що утворюється під час фрезерування дисковою або кінцевою фрезою, можна видалити з робочого місця за допомогою відповідної комбінації обертання фрези та подачі. Потоки стружки можна також збирати за допомогою простих пристроїв для збору стружки.[20].

Під час фрезерування бронзи, латуні, чавуну та інших крихких металів і сплавів утворюється металевий пил, який забруднює повітря. Спостерігається високе забруднення повітря частинками пилу розміром до 10 мікрон, особливо під час фрезерування неметалевих матеріалів, таких як сірий чавун, текстоліт, скловолокно, графіт і деревні пластики. При фрезеруванні свинцевої бронзи і

латуні кількість металевого пилу в зоні дихання оператора верстата відносно низька, але вміст свинцю в пилу значно перевищує нормативні значення.у [20].

Пил оброблюваних матеріалів представляє серйозну небезпеку для здоров'я працюючих. Проникаючи в органи дихання та очі, забруднюючи поверхню шкіри, пил часто є причиною важких захворювань [20].

Видалення пилу з повітря робочої зони особливо важливе при фрезеруванні крихких металів і неметалевих матеріалів. Пиловловлювачі широко застосовуються на фрезерних верстатах при фрезеруванні заготовок циліндричними або дисковими фрезами. Їх конструкція враховує умови формоутворення при різних операціях фрезерування, напрямок руху частинок пилу і стружки, а також вимоги діючих норм і правил безпеки, що стосуються огороджувальних фрез.[20].

При обробці на металорізальних верстатах часто використовують мастильно-охолоджуючу рідину. Вони мають функціональні, екологічні та фізико-хімічні властивості, а також хімічну активність та експлуатаційні якості [21].

Для затримки старіння до охолоджувальної рідини додають антиоксиданти. Однак персонал, який працює з охолоджувальною рідиною, повинен дотримуватися таких правил безпеки, щоб уникнути отруєння [21]:

1. Слідкувати за терміном придатності та умовами зберігання,.

2. Уникати контактів з рідинами, носити захисні окуляри та спеціальний одяг.

3. Варто захищати шкіру рук кремом.

4. Не можна витирати руки ганчірками, забрудненими МОР.

5. На робочих місцях має бути вентиляція.

6. Зона різання повинна бути огородженою кожухом.

7. Регулярно прати робочий одяг.

Заборонено використовувати МОР, що містять нітрати хлору, який має токсичні властивості [21].

Окремо варто сказати про утилізацію відпрацьованої МОР. Цю процедуру потрібно проводити за всіма правилами, тому що відходи можуть потрапляти у повітря, ґрунт та воду. Утилізацію відпрацьованої рідини проводять на спеціальних підприємствах, куди її доставляють у герметичній тарі [21].

6.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Основними потенційними небезпеками при проведенні робіт в офісі є такі [22]:

- Ризик ураження електричним струмом через недотримання правил електробезпеки або несправність електрообладнання;

- Порушення опорно-рухового апарату через тривалий статичний заряд під час роботи з комп'ютером;

- Нервово-психічне перевантаження, викликане постійним контактом з клієнтами, колегами та керівництвом і вирішенням суперечливих робочих завдань, призводить до емоційного розладу, внутрішнього неспокою, емоційної нестабільності та розладів нервової системи;

- Неналежні ергономічні характеристики робочого місця через необґрунтоване планування робочих місць можуть призвести до механічних травм, ураження електричним струмом та порушень опорно-рухового апарату;

- Негативний вплив недостатньої освітленості робочих зон через несправне освітлювальне обладнання та неправильне проектування систем освітлення на зір і продуктивність праці працівників; - негативний вплив незадовільних параметрів повітряного середовища робочої зони на здоров’я працюючого, внаслідок неправильного проектування системи вентиляції або несправності її несправності;

- Негативний вплив на психоемоційний стан працівників підвищеного рівня шуму, пов'язаного з використанням застарілого периферійного обладнання, кондиціонерів, копіювальної техніки та освітлювальних приладів;

- Ризик виникнення пожежі через несправність електрообладнання, недотримання або порушення правил пожежної безпеки обслуговуючим персоналом; - неправильні дії персоналу у надзвичайних ситуаціях.

Алгоритм перших дій у надзвичайній ситуації [23]:

1. Оцінити місце події та переконатися, що немає безпосередньої загрози вашому життю та здоров'ю, перш ніж надавати допомогу потерпілому.

2. Оглянути потерпілого, щоб визначити, чи потребує він/вона невідкладної медичної допомоги та чи є загроза його/її життю.

3. Викликати рятувальників (101) та екстрену медичну допомогу за телефоном 103.

4. Залишатися з потерпілим до прибуття екстрених служб і намагатися підтримувати або поліпшити його стан будь-якими доступними засобами.

5. Не дійте негайно. Визначити, яка допомога (окрім емоційної підтримки) необхідна і хто з постраждалих потребує допомоги найбільше.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи можна зробити наступні висновки:

1. При фрезеруванні у четвертій швидкісній зоні коливань виникаючі вібрації можуть бути охарактеризовані сім'ю параметрами. Їх менша кількість від загальних 12 пов'язана з тим, що у цій зоні через малий час різання супроводжуючі вільні коливання не виникають, а діють тільки вимушені коливання.

2. На формоутворення обробленої поверхні у четвертій швидкісній зоні коливань при зустрічному фрезеруванні впливають відхилення від ППР точки врізання інструменту в деталь та максимальне відхилення деталі. При попутному фрезеруванні на формоутворення обробленої поверхні впливають максимальне відхилення від ППР деталі та відхилення від ППР точки виходу інструменту з деталі.

3. Процес фрезерування у четвертій швидкісній зоні коливань може бути сталим і не сталим. При сталому фрезеруванні значення формоутворюючих параметрів за час різання не змінюється. Оброблена поверхня буде рівна. При несталому фрезеруванні формоутворюючі параметри періодично змінюються, що створює хвилястість на обробленій поверхні

4. Для створення сталих умов різання потребує додаткових досліджень перевірка співвідношення частот вільних та вимушених коливань.

5. При дослідженні залежності кроку та висоти хвилястості на профілограмі було доведено, що закон руху деталі при різанні визначає, якою буде форма оброблюваної поверхні після фрезерування у четвертій швидкісній зоні коливань.

6. При проведенні оцінки очікуваної економічної ефективності впроваджених заходів, було визначено , що при сталих режимах фрезерування через відношення частоти вільних коливань деталі до частоти вимушених коливань можна отримати економічний ефект у 1322,018 грн для деталі одного найменування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Wiercigroch, M. Chaotic vibrations of a simple model of the machine tool-cutting process system. Transactions of the ASME: Journal of Vibration Acoustics, 1997, 119: p.p.468–475

2. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000

3. Merrit H. E. Theory of self-excited machine-tool chatter-contribution to machine tool chatter research. Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry, 1965, 87(4): p.p.447–454

4. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] /М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ-2000, 2011. – 422 с

5. Вібрації при різанні металів URL: https://studfile.net/preview/5775589/page:10/ (дата звернення: 19.08.2024).

6. Tlusty J. Machine Tool Structures. PERGAMON PRESS, 1970. 508p.

7. Benaroya H. Mechanical Vibration. Analysis, Uncertainties, and Control. Marcel Dekker, New York, 2004

8. Rao S. S. Mechanical Vibrations. Prentice Hall, New Jersey, USA, 2003

9. Kai Cheng Machining Dynamics Fundamentals, Applications and Practices. 2009 Springer-Verlag London Limited, 341p.

10. Technology Of Machine Tools /Machine Tool Mechanics. prof. Jiri Tlusty, Working Group Chairman - October 1980

11. Tobias SA (1959) The vibrations of vertical milling machines under test and working conditions. Proc Inst Mech Eng 173(18): p.p.474–510

12. Brian Stone Chatter and Machine Tool. Springer International Publishing Switzerland, 2014. 276 p.

13. Логоминов В.А. Методы построения диаграмм устойчивости при ортогональном точении // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві, вип. 2(13)/ 2016, С.159-179.

14. Chatter suppression techniques in metal cutting/ J. Munoa, X. Beudaert, Z. Dombovari, Y. Altintas, E. Budak, C. Brecher, G. Stepan // Manufacturing Technology volume 65 edition 2, 2016 p.p.785-808.

15. Insperger T. Semi-discretization for time-delay systems – stability and engineering applications / T. Insperger, G. Stépán. – Springer, 2011. – 174 p.

16. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей. монография Ю. Н./Внуков, С. И.Дядя, Е. Б. Козлова и др., под ред. Ю. Н. Внукова. [Электрон. даные]. – Запорожье: ЗНТУ, 2017. - 270 с.

17. Свинин В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 302 с.

18. Handbook of high-speed machining technology / edited by Robert I. King. New York Chapman and Hall 1985. 471p.

19. Методичні рекомендації для дипломного проектування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. Г.В. Пухальська. - Запоріжжя: НУ«Запорізька політехніка», 2023. - 41 с

20. Охорона праці на фрезерних верстатах URL: http://op.rv.ua/article/frezerni-verstaty-ohorona-praci (дата звернення 05.11.2024).

21. Використання та утилізація МОР URL: https://techlube/articles/smazochnye-zhidkosti-i-mera-bezopasnosti-pri-rabote-s-nimi.html (дата звернення 06.11.2024).

22. Охорона праці в надзвичайних ситуаціях URL: https://zp.edu.ua/sites/default/files/konf/rozdil_dp_specialisty.pdf (дата звернення 06.11.2024).

23. Алгоритм дій при надзвичайних ситуаціях URL: https://kgsm1.kiev.ua/algoritm-dij-u-razi-nadzvichajnoyi-situatsiyi/#:~:tex (дата звернення 07.11.2024).

Додаток А

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=2400 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,006	0,055	0,68	0,024	0,055
2	0,010	0,047	0,6	0,024	0,047
3	0,007	0,056	0,61	0,024	0,056
4	0,008	0,042	0,56	0,024	0,042
5	0,006	0,050	0,64	0,024	0,050
6	0,005	0,043	0,6	0,024	0,043
7	0,009	0,052	0,6	0,024	0,052
8	0,005	0,050	0,68	0,024	0,050
9	0,006	0,055	0,76	0,024	0,055
10	0,008	0,051	0,64	0,024	0,051
11	0,009	0,045	0,6	0,024	0,045
12	0,008	0,046	0,56	0,024	0,046
13	0,010	0,049	0,56	0,024	0,049
14	0,009	0,051	0,56	0,024	0,051
15	0,009	0,044	0,52	0,024	0,044
16	0,009	0,045	0,56	0,024	0,045
17	0,008	0,048	0,56	0,024	0,046
18	0,010	0,050	0,56	0,024	0,050
19	0,009	0,043	0,56	0,024	0,043
20	0,009	0,046	0,56	0,024	0,046
21	0,007	0,048	0,6	0,024	0,048
22	0,010	0,049	0,6	0,024	0,049
23	0,006	0,051	0,72	0,024	0,051
24	0,008	0,054	0,6	0,024	0,054
25	0,008	0,054	0,72	0,024	0,054
26	0,012	0,056	0,6	0,024	0,056
27	0,010	0,058	0,64	0,024	0,058
28	0,010	0,044	0,52	0,024	0,044
29	0,007	0,046	0,56	0,024	0,046
30	0,009	0,049	0,64	0,024	0,049

Додаток Б

Результати досліджень попутного фрезерування при n=2400 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,005	0,076	0,64	0,024	0,076
2	0,002	0,083	0,68	0,024	0,070
3	0,003	0,078	0,68	0,024	0,084
4	0,007	0,080	0,68	0,024	0,076
5	0,004	0,083	0,64	0,024	0,070
6	0,003	0,085	0,68	0,024	0,064
7	0,005	0,083	0,68	0,024	0,060
8	0,005	0,082	0,6	0,024	0,063
9	0,004	0,084	0,6	0,024	0,072
10	0,004	0,086	0,64	0,024	0,076
11	0,005	0,080	0,68	0,024	0,072
12	0,005	0,083	0,68	0,024	0,067
13	0,005	0,082	0,68	0,024	0,077
14	0,004	0,086	0,6	0,024	0,069
15	0,007	0,086	0,64	0,024	0,064
16	0,006	0,080	0,64	0,024	0,080
17	0,006	0,082	0,68	0,024	0,068
18	0,005	0,083	0,64	0,024	0,047
19	0,005	0,084	0,68	0,024	0,058
20	0,002	0,083	0,68	0,024	0,060
21	0,003	0,080	0,68	0,024	0,068
22	0,004	0,082	0,64	0,024	0,070
23	0,007	0,087	0,6	0,024	0,065
24	0,002	0,089	0,6	0,024	0,043
25	0,004	0,088	0,6	0,024	0,054
26	0,004	0,088	0,6	0,024	0,053
27	0,005	0,088	0,64	0,024	0,057
28	0,005	0,086	0,64	0,024	0,064
29	0,005	0,080	0,68	0,024	0,072
30	0,004	0,083	0,64	0,024	0,056

Додаток В

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,025	0,022	0,4	0,019	0,022
2	0,023	0,021	0,4	0,019	0,021
3	0,025	0,021	0,4	0,019	0,021
4	0,024	0,021	0,44	0,019	0,021
5	0,022	0,021	0,44	0,019	0,021
6	0,024	0,022	0,4	0,019	0,022
7	0,023	0,022	0,44	0,019	0,022
8	0,025	0,023	0,48	0,019	0,023
9	0,022	0,023	0,48	0,019	0,023
10	0,025	0,023	0,44	0,019	0,023
11	0,022	0,024	0,44	0,019	0,025
12	0,024	0,025	0,44	0,019	0,025
13	0,026	0,024	0,44	0,019	0,024
14	0,024	0,026	0,44	0,019	0,026
15	0,023	0,024	0,44	0,019	0,024
16	0,026	0,026	0,48	0,019	0,026
17	0,027	0,024	0,48	0,019	0,025
18	0,025	0,025	0,44	0,019	0,025
19	0,028	0,023	0,44	0,019	0,023
20	0,026	0,023	0,44	0,019	0,023
21	0,027	0,022	0,4	0,019	0,022
22	0,025	0,022	0,44	0,019	0,022
23	0,027	0,020	0,44	0,019	0,020
24	0,028	0,020	0,4	0,019	0,020
25	0,025	0,019	0,44	0,019	0,019
26	0,025	0,019	0,48	0,019	0,019
27	0,028	0,019	0,4	0,019	0,019
28	0,025	0,020	0,44	0,019	0,020
29	0,026	0,019	0,44	0,019	0,019
30	0,024	0,020	0,44	0,019	0,020

Додаток Г

Результати досліджень попуного фрезерування при n=3000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,000	0,080	0,56	0,019	0,070
2	0,000	0,083	0,56	0,019	0,065
3	0,001	0,083	0,56	0,019	0,065
4	0,002	0,084	0,64	0,019	0,066
5	0,002	0,084	0,6	0,019	0,065
6	0,000	0,084	0,56	0,019	0,056
7	0,004	0,081	0,64	0,019	0,049
8	0,001	0,085	0,6	0,019	0,057
9	0,001	0,084	0,56	0,019	0,057
10	0,003	0,084	0,6	0,019	0,065
11	0,002	0,084	0,56	0,019	0,049
12	0,000	0,084	0,56	0,019	0,050
13	0,003	0,085	0,6	0,019	0,050
14	0,002	0,085	0,6	0,019	0,051
15	0,002	0,086	0,56	0,019	0,051
16	0,000	0,078	0,56	0,019	0,066
17	0,002	0,087	0,56	0,019	0,059
18	0,001	0,086	0,56	0,019	0,042
19	0,001	0,086	0,6	0,019	0,059
20	0,001	0,086	0,6	0,019	0,052
21	0,002	0,089	0,56	0,019	0,061
22	0,002	0,089	0,6	0,019	0,062
23	0,001	0,087	0,6	0,019	0,062
24	0,000	0,089	0,56	0,019	0,053
25	0,003	0,089	0,6	0,019	0,053
26	0,002	0,091	0,6	0,019	0,053
27	0,002	0,090	0,6	0,019	0,056
28	0,000	0,089	0,56	0,019	0,061
29	0,002	0,091	0,56	0,019	0,053
30	0,003	0,089	0,56	0,019	0,044

Додаток Д

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3268 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,003	0,011	0,36	0,018	0,007
2	0,004	0,015	0,48	0,018	0,007
3	0,002	0,017	0,4	0,018	0,006
4	0,003	0,015	0,48	0,018	0,006
5	0,003	0,014	0,44	0,018	0,007
6	0,005	0,009	0,4	0,018	0,006
7	0,001	0,011	0,4	0,018	0,006
8	0,006	0,007	0,4	0,018	0,006
9	0,001	0,009	0,36	0,018	0,007
10	0,007	0,009	0,48	0,018	0,005
11	0,004	0,012	0,44	0,018	0,005
12	0,005	0,008	0,4	0,018	0,007
13	0,005	0,011	0,4	0,018	0,004
14	0,004	0,015	0,44	0,018	0,006
15	0,002	0,009	0,36	0,018	0,006
16	0,002	0,015	0,4	0,018	0,005
17	0,003	0,016	0,44	0,018	0,005
18	0,003	0,015	0,4	0,018	0,007
19	0,003	0,012	0,44	0,018	0,006
20	0,002	0,007	0,36	0,018	0,005
21	0,003	0,013	0,4	0,018	0,005
22	0,004	0,006	0,36	0,018	0,006
23	0,006	0,013	0,4	0,018	0,004
24	0,001	0,013	0,4	0,018	0,005
25	0,003	0,007	0,36	0,018	0,005
26	0,003	0,010	0,4	0,018	0,006
27	0,005	0,012	0,44	0,018	0,005
28	0,004	0,009	0,44	0,018	0,006
29	0,004	0,011	0,44	0,018	0,005
30	0,004	0,011	0,4	0,018	0,005

Додаток Е

Результати досліджень попутного фрезерування при n=3268 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,013	0,076	0,4	0,018	0,006
2	0,012	0,075	0,4	0,018	0,006
3	0,014	0,071	0,44	0,018	0,010
4	0,016	0,067	0,44	0,018	0,012
5	0,014	0,068	0,48	0,018	0,015
6	0,014	0,069	0,52	0,018	0,016
7	0,014	0,068	0,56	0,018	0,023
8	0,014	0,078	0,44	0,018	0,015
9	0,010	0,080	0,4	0,018	0,009
10	0,015	0,075	0,4	0,018	0,012
11	0,015	0,074	0,44	0,018	0,014
12	0,010	0,078	0,4	0,018	0,013
13	0,012	0,075	0,48	0,018	0,019
14	0,016	0,068	0,56	0,018	0,018
15	0,017	0,065	0,56	0,018	0,022
16	0,013	0,068	0,52	0,018	0,015
17	0,015	0,060	0,52	0,018	0,022
18	0,014	0,066	0,52	0,018	0,016
19	0,008	0,066	0,48	0,018	0,017
20	0,008	0,066	0,52	0,018	0,023
21	0,009	0,071	0,44	0,018	0,016
22	0,007	0,070	0,4	0,018	0,009
23	0,014	0,063	0,48	0,018	0,016
24	0,009	0,061	0,48	0,018	0,022
25	0,007	0,065	0,48	0,018	0,020
26	0,007	0,068	0,48	0,018	0,019
27	0,007	0,073	0,32	0,018	0,011
28	0,008	0,075	0,36	0,018	0,007
29	0,013	0,069	0,4	0,018	0,011
30	0,013	0,066	0,44	0,018	0,014

Додаток Ж

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3429 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,004	0,035	0,44	0,017	0,016
2	0,005	0,039	0,44	0,017	0,013
3	0,006	0,038	0,4	0,017	0,017
4	0,004	0,035	0,44	0,017	0,014
5	0,004	0,038	0,48	0,017	0,014
6	0,003	0,041	0,48	0,017	0,015
7	0,000	0,037	0,44	0,017	0,013
8	0,000	0,041	0,52	0,017	0,013
9	0,002	0,040	0,52	0,017	0,013
10	0,003	0,043	0,48	0,017	0,015
11	0,003	0,043	0,48	0,017	0,012
12	0,006	0,038	0,44	0,017	0,014
13	0,002	0,046	0,52	0,017	0,016
14	0,001	0,042	0,56	0,017	0,014
15	0,003	0,038	0,56	0,017	0,014
16	0,002	0,042	0,52	0,017	0,016
17	0,001	0,042	0,52	0,017	0,014
18	0,007	0,040	0,44	0,017	0,015
19	0,004	0,044	0,44	0,017	0,015
20	0,003	0,045	0,48	0,017	0,014
21	0,004	0,040	0,56	0,017	0,014
22	0,003	0,039	0,44	0,017	0,016
23	0,001	0,037	0,44	0,017	0,015
24	0,003	0,036	0,4	0,017	0,013
25	0,006	0,040	0,4	0,017	0,015
26	0,001	0,035	0,44	0,017	0,013
27	0,003	0,039	0,44	0,017	0,016
28	0,002	0,041	0,52	0,017	0,012
29	0,000	0,041	0,48	0,017	0,013
30	0,000	0,038	0,48	0,017	0,016

Додаток И

Результати досліджень попутного фрезерування при n=3429 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,008	0,048	0,44	0,017	0,048
2	0,006	0,045	0,48	0,017	0,045
3	0,009	0,048	0,44	0,017	0,048
4	0,008	0,045	0,44	0,017	0,045
5	0,007	0,047	0,44	0,017	0,047
6	0,007	0,051	0,48	0,017	0,051
7	0,009	0,054	0,48	0,017	0,054
8	0,008	0,050	0,48	0,017	0,050
9	0,008	0,044	0,4	0,017	0,044
10	0,005	0,047	0,44	0,017	0,047
11	0,009	0,044	0,4	0,017	0,044
12	0,007	0,048	0,44	0,017	0,048
13	0,006	0,052	0,48	0,017	0,052
14	0,008	0,049	0,44	0,017	0,049
15	0,007	0,048	0,44	0,017	0,048
16	0,009	0,049	0,44	0,017	0,049
17	0,007	0,047	0,44	0,017	0,047
18	0,006	0,043	0,44	0,017	0,043
19	0,011	0,048	0,44	0,017	0,048
20	0,006	0,051	0,44	0,017	0,051
21	0,007	0,052	0,48	0,017	0,052
22	0,010	0,042	0,4	0,017	0,042
23	0,009	0,042	0,4	0,017	0,042
24	0,007	0,046	0,44	0,017	0,046
25	0,009	0,045	0,44	0,017	0,045
26	0,011	0,046	0,4	0,017	0,046
27	0,007	0,048	0,44	0,017	0,048
28	0,007	0,052	0,48	0,017	0,052
29	0,011	0,043	0,4	0,017	0,043
30	0,009	0,051	0,48	0,017	0,051

Додаток К

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3660 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	2	3	4	5	6
1	0,018	0,002	0,4	0,016	0,026
2	0,020	0,000	0,36	0,016	0,027
3	0,023	0,006	0,36	0,016	0,029
4	0,025	0,014	0,4	0,016	0,032
5	0,027	0,005	0,4	0,016	0,035
6	0,031	0,009	0,4	0,016	0,039
7	0,036	0,011	0,4	0,016	0,044
8	0,032	0,028	0,48	0,016	0,047
9	0,032	0,013	0,44	0,016	0,049
10	0,035	0,008	0,44	0,016	0,051
11	0,042	0,008	0,4	0,016	0,054
12	0,039	0,003	0,4	0,016	0,055
13	0,036	0,014	0,44	0,016	0,054
14	0,031	0,006	0,44	0,016	0,050
15	0,033	0,013	0,44	0,016	0,045
16	0,030	0,014	0,32	0,016	0,039
17	0,022	0,014	0,32	0,016	0,034
18	0,020	0,010	0,32	0,016	0,027
19	0,017	0,004	0,32	0,016	0,023
20	0,009	0,002	0,4	0,016	0,021
21	0,019	0,005	0,32	0,016	0,023
22	0,022	0,011	0,36	0,016	0,026
23	0,024	0,014	0,4	0,016	0,030
24	0,026	0,010	0,36	0,016	0,033
25	0,029	0,017	0,4	0,016	0,034
26	0,032	0,015	0,4	0,016	0,036
27	0,028	0,017	0,44	0,016	0,039
28	0,029	0,015	0,44	0,016	0,041
29	0,033	0,014	0,4	0,016	0,040
30	0,017	0,009	0,48	0,016	0,041

Продовження додатка К

1	2	3	4	5	6
31	0,023	0,003	0,4	0,016	0,039
32	0,023	0,006	0,44	0,016	0,036
33	0,022	0,003	0,44	0,016	0,034
34	0,022	0,002	0,4	0,016	0,033
35	0,020	0,006	0,36	0,016	0,029
36	0,020	0,002	0,36	0,016	0,028
37	0,022	0,003	0,36	0,016	0,026
38	0,019	0,009	0,36	0,016	0,024
39	0,021	0,007	0,36	0,016	0,025
40	0,022	0,014	0,4	0,016	0,027
41	0,027	0,020	0,4	0,016	0,031
42	0,026	0,013	0,4	0,016	0,033
43	0,029	0,014	0,4	0,016	0,034
44	0,025	0,015	0,44	0,016	0,037
45	0,027	0,015	0,44	0,016	0,037

Додаток Л

Результати досліджень попутного фрезерування при n=3660 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	2	3	4	5	6
1	0,013	0,061	0,52	0,016	0,061
2	0,014	0,062	0,52	0,016	0,062
3	0,018	0,004	0,28	0,016	0,004
4	0,020	0,014	0,32	0,016	0,014
5	0,018	0,026	0,4	0,016	0,026
6	0,017	0,043	0,44	0,016	0,043
7	0,016	0,059	0,48	0,016	0,059
8	0,018	0,058	0,48	0,016	0,058
9	0,019	0,067	0,48	0,016	0,067
10	0,019	0,030	0,4	0,016	0,030
11	0,020	0,029	0,4	0,016	0,029
12	0,018	0,045	0,44	0,016	0,045
13	0,018	0,060	0,48	0,016	0,060
14	0,017	0,070	0,52	0,016	0,070
15	0,014	0,022	0,36	0,016	0,022
16	0,020	0,022	0,36	0,016	0,022
17	0,025	0,019	0,36	0,016	0,019
18	0,021	0,033	0,4	0,016	0,033
19	0,019	0,034	0,4	0,016	0,034
20	0,015	0,052	0,48	0,016	0,052
21	0,016	0,055	0,48	0,016	0,055
22	0,018	0,047	0,44	0,016	0,047
23	0,021	0,064	0,48	0,016	0,064
24	0,023	0,063	0,48	0,016	0,063
25	0,015	0,062	0,52	0,016	0,062
26	0,016	0,072	0,56	0,016	0,072
27	0,015	0,081	0,56	0,016	0,081
28	0,017	0,073	0,56	0,016	0,073
29	0,018	0,076	0,56	0,016	0,076
30	0,013	0,076	0,6	0,016	0,076

Продовження додатка Л

1	2	3	4	5	6
31	0,013	0,057	0,52	0,016	0,057
32	0,014	0,029	0,4	0,016	0,029
33	0,017	0,044	0,44	0,016	0,044
34	0,015	0,045	0,44	0,016	0,045
35	0,021	0,044	0,44	0,016	0,044
36	0,015	0,041	0,48	0,016	0,041
37	0,015	0,047	0,48	0,016	0,047
38	0,018	0,051	0,48	0,016	0,051
39	0,019	0,043	0,44	0,016	0,043
40	0,014	0,033	0,44	0,016	0,033
41	0,017	0,048	0,48	0,016	0,048
42	0,018	0,040	0,44	0,016	0,040
43	0,022	0,055	0,48	0,016	0,055
44	0,021	0,046	0,44	0,016	0,046
45	0,017	0,045	0,48	0,016	0,045

Додаток М

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=3700 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,007	0,015	0,48	0,016	0,007
2	0,006	0,021	0,48	0,016	0,009
3	0,002	0,025	0,48	0,016	0,013
4	0,004	0,036	0,52	0,016	0,015
5	0,007	0,017	0,48	0,016	0,017
6	0,009	0,021	0,52	0,016	0,021
7	0,011	0,024	0,52	0,016	0,023
8	0,018	0,024	0,56	0,016	0,024
9	0,014	0,002	0,44	0,016	0,023
10	0,011	0,002	0,36	0,016	0,021
11	0,010	0,009	0,44	0,016	0,018
12	0,022	0,004	0,52	0,016	0,015
13	0,013	0,003	0,44	0,016	0,010
14	0,007	0,009	0,4	0,016	0,007
15	0,005	0,014	0,44	0,016	0,009
16	0,001	0,035	0,48	0,016	0,011
17	0,003	0,026	0,44	0,016	0,015
18	0,004	0,035	0,52	0,016	0,017
19	0,011	0,042	0,56	0,016	0,019
20	0,012	0,033	0,52	0,016	0,021
21	0,012	0,022	0,52	0,016	0,022
22	0,018	0,023	0,56	0,016	0,023
23	0,010	0,019	0,48	0,016	0,023
24	0,006	0,007	0,4	0,016	0,020
25	0,004	0,008	0,4	0,016	0,017
26	0,009	0,004	0,4	0,016	0,012
27	0,013	0,008	0,44	0,016	0,010
28	0,007	0,011	0,4	0,016	0,008
29	0,005	0,016	0,4	0,016	0,009
30	0,004	0,024	0,44	0,016	0,012

Додаток Н

Результати досліджень попутного фрезерування при n=3700 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,000	0,044	0,44	0,016	0,007
2	0,003	0,040	0,44	0,016	0,006
3	0,001	0,038	0,44	0,016	0,006
4	0,003	0,044	0,4	0,016	0,006
5	0,000	0,042	0,44	0,016	0,006
6	0,001	0,036	0,44	0,016	0,006
7	0,003	0,040	0,44	0,016	0,006
8	0,005	0,036	0,48	0,016	0,009
9	0,002	0,041	0,4	0,016	0,007
10	0,000	0,037	0,44	0,016	0,006
11	0,004	0,041	0,44	0,016	0,008
12	0,003	0,039	0,48	0,016	0,007
13	0,001	0,043	0,44	0,016	0,009
14	0,003	0,039	0,44	0,016	0,008
15	0,000	0,034	0,44	0,016	0,007
16	0,001	0,032	0,48	0,016	0,007
17	0,001	0,039	0,48	0,016	0,007
18	0,002	0,043	0,44	0,016	0,007
19	0,001	0,038	0,44	0,016	0,008
20	0,000	0,037	0,44	0,016	0,008
21	0,002	0,041	0,44	0,016	0,008
22	0,006	0,039	0,48	0,016	0,008
23	0,003	0,041	0,44	0,016	0,009
24	0,003	0,038	0,44	0,016	0,008
25	0,002	0,039	0,48	0,016	0,009
26	0,005	0,042	0,4	0,016	0,010
27	0,003	0,037	0,44	0,016	0,010
28	0,004	0,035	0,4	0,016	0,008
29	0,004	0,040	0,4	0,016	0,008
30	0,001	0,039	0,44	0,016	0,009

Додаток П

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=4183 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,042	0,008	0,4	0,014	0,052
2	0,050	0,014	0,4	0,014	0,060
3	0,061	0,009	0,4	0,014	0,068
4	0,067	0,020	0,44	0,014	0,074
5	0,063	0,030	0,48	0,014	0,080
6	0,046	0,010	0,56	0,014	0,083
7	0,052	0,013	0,52	0,014	0,088
8	0,072	0,007	0,4	0,014	0,090
9	0,077	0,005	0,4	0,014	0,093
10	0,076	0,001	0,4	0,014	0,093
11	0,072	0,020	0,36	0,014	0,088
12	0,068	0,017	0,4	0,014	0,089
13	0,070	0,028	0,32	0,014	0,085
14	0,066	0,032	0,32	0,014	0,080
15	0,062	0,027	0,32	0,014	0,077
16	0,055	0,023	0,32	0,014	0,068
17	0,044	0,035	0,44	0,014	0,063
18	0,045	0,025	0,28	0,014	0,055
19	0,041	0,031	0,24	0,014	0,049
20	0,032	0,021	0,28	0,014	0,041
21	0,027	0,015	0,32	0,014	0,038
22	0,034	0,008	0,28	0,014	0,040
23	0,043	0,004	0,36	0,014	0,047
24	0,048	0,001	0,36	0,014	0,053
25	0,051	0,002	0,36	0,014	0,056
26	0,051	0,011	0,4	0,014	0,058
27	0,051	0,004	0,4	0,014	0,064
28	0,057	0,027	0,44	0,014	0,065
29	0,042	0,018	0,52	0,014	0,068
30	0,052	0,001	0,44	0,014	0,068

Додаток Р

Результати досліджень попутного фрезерування при n=4183 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,032	0,046	0,4	0,014	0,035
2	0,031	0,043	0,4	0,014	0,026
3	0,035	0,047	0,44	0,014	0,047
4	0,033	0,049	0,4	0,014	0,035
5	0,035	0,039	0,4	0,014	0,024
6	0,037	0,044	0,4	0,014	0,030
7	0,038	0,032	0,4	0,014	0,032
8	0,035	0,035	0,44	0,014	0,035
9	0,032	0,035	0,44	0,014	0,035
10	0,036	0,040	0,44	0,014	0,040
11	0,039	0,042	0,44	0,014	0,042
12	0,033	0,033	0,44	0,014	0,046
13	0,032	0,036	0,4	0,014	0,022
14	0,031	0,026	0,44	0,014	0,026
15	0,032	0,032	0,44	0,014	0,032
16	0,032	0,037	0,44	0,014	0,037
17	0,036	0,040	0,4	0,014	0,025
18	0,034	0,032	0,4	0,014	0,017
19	0,035	0,039	0,44	0,014	0,039
20	0,038	0,041	0,4	0,014	0,029
21	0,038	0,046	0,36	0,014	0,018
22	0,038	0,034	0,36	0,014	0,007
23	0,038	0,041	0,36	0,014	0,011
24	0,038	0,032	0,44	0,014	0,032
25	0,040	0,035	0,4	0,014	0,019
26	0,043	0,038	0,4	0,014	0,023
27	0,040	0,040	0,4	0,014	0,027
28	0,038	0,030	0,44	0,014	0,030
29	0,037	0,034	0,44	0,014	0,034
30	0,038	0,037	0,4	0,014	0,024

Додаток С

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=4655 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,018	0,027	0,32	0,013	0,027
2	0,014	0,028	0,32	0,013	0,028
3	0,022	0,028	0,36	0,013	0,028
4	0,020	0,027	0,36	0,013	0,027
5	0,022	0,028	0,36	0,013	0,028
6	0,022	0,028	0,36	0,013	0,028
7	0,018	0,029	0,32	0,013	0,029
8	0,017	0,021	0,28	0,013	0,021
9	0,024	0,021	0,32	0,013	0,021
10	0,017	0,028	0,32	0,013	0,028
11	0,017	0,022	0,28	0,013	0,022
12	0,020	0,022	0,28	0,013	0,022
13	0,017	0,021	0,28	0,013	0,021
14	0,019	0,031	0,32	0,013	0,031
15	0,021	0,022	0,28	0,013	0,022
16	0,025	0,022	0,32	0,013	0,022
17	0,017	0,023	0,28	0,013	0,023
18	0,020	0,027	0,32	0,013	0,027
19	0,026	0,022	0,32	0,013	0,022
20	0,020	0,019	0,28	0,013	0,019
21	0,020	0,021	0,28	0,013	0,021
22	0,021	0,021	0,28	0,013	0,021
23	0,020	0,020	0,28	0,013	0,020
24	0,019	0,019	0,28	0,013	0,019
25	0,023	0,020	0,28	0,013	0,020
26	0,020	0,020	0,32	0,013	0,020
27	0,025	0,020	0,32	0,013	0,020
28	0,022	0,027	0,32	0,013	0,027
29	0,020	0,021	0,28	0,013	0,021
30	0,013	0,020	0,28	0,013	0,020

Додаток Т

Результати досліджень попутного фрезерування при n=4655 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,002	0,029	0,24	0,013	0,021
2	0,003	0,030	0,24	0,013	0,024
3	0,003	0,030	0,24	0,013	0,022
4	0,000	0,028	0,28	0,013	0,022
5	0,004	0,033	0,24	0,013	0,022
6	0,000	0,031	0,28	0,013	0,025
7	0,003	0,027	0,28	0,013	0,022
8	0,002	0,029	0,24	0,013	0,021
9	0,002	0,026	0,24	0,013	0,019
10	0,000	0,027	0,24	0,013	0,021
11	0,002	0,028	0,28	0,013	0,024
12	0,005	0,026	0,28	0,013	0,023
13	0,003	0,026	0,28	0,013	0,023
14	0,001	0,024	0,32	0,013	0,024
15	0,001	0,026	0,28	0,013	0,023
16	0,000	0,022	0,32	0,013	0,025
17	0,001	0,024	0,32	0,013	0,024
18	0,000	0,021	0,24	0,013	0,020
19	0,002	0,024	0,24	0,013	0,018
20	0,001	0,025	0,24	0,013	0,015
21	0,000	0,022	0,24	0,013	0,020
22	0,001	0,024	0,24	0,013	0,017
23	0,002	0,022	0,2	0,013	0,016
24	0,000	0,022	0,24	0,013	0,017
25	0,000	0,024	0,24	0,013	0,015
26	0,002	0,022	0,2	0,013	0,015
27	0,001	0,022	0,24	0,013	0,017
28	0,002	0,023	0,24	0,013	0,014
29	0,000	0,023	0,2	0,013	0,014
30	0,001	0,022	0,24	0,013	0,016

Додаток У

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=6000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,003	0,004	0,2	9,64	0,002
2	0,005	0,011	0,24	9,68	0,002
3	0,003	0,004	0,2	9,68	0,001
4	0,004	0,002	0,16	9,64	0,002
5	0,005	0,004	0,2	9,64	0,002
6	0,005	0,005	0,2	9,68	0,001
7	0,004	0,002	0,2	9,64	0,001
8	0,008	0,005	0,24	9,6	0,002
9	0,005	0,007	0,28	9,68	0,002
10	0,006	0,007	0,2	9,68	0,001
11	0,003	0,003	0,2	9,6	0,001
12	0,009	0,006	0,24	9,6	0,001
13	0,004	0,003	0,2	9,64	0,001
14	0,004	0,007	0,24	9,64	0,001
15	0,003	0,003	0,2	9,68	0,002
16	0,002	0,003	0,16	9,6	0,001
17	0,004	0,004	0,2	9,64	0,002
18	0,005	0,004	0,2	9,64	0,003
19	0,005	0,005	0,2	9,6	0,002
20	0,006	0,005	0,24	9,64	0,001
21	0,004	0,008	0,24	9,68	0,001
22	0,003	0,005	0,24	9,68	0,002
23	0,004	0,004	0,2	9,64	0,002
24	0,004	0,007	0,2	9,6	0,001
25	0,004	0,003	0,2	9,64	0,002
26	0,009	0,005	0,24	9,64	0,001
27	0,004	0,003	0,2	9,68	0,001
28	0,004	0,001	0,16	9,64	0,001
29	0,004	0,002	0,2	9,68	0,003
30	0,007	0,003	0,2	9,68	0,002

Додаток Ф

Результати досліджень попутного фрезерування при n=6000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,001	0,019	0,32	9,64	0,005
2	0,000	0,020	0,36	9,6	0,003
3	0,002	0,018	0,32	9,64	0,002
4	0,001	0,019	0,36	9,64	0,002
5	0,000	0,018	0,36	9,64	0,002
6	0,001	0,021	0,36	9,6	0,003
7	0,001	0,018	0,32	9,68	0,004
8	0,000	0,021	0,36	9,64	0,003
9	0,003	0,019	0,32	9,6	0,004
10	0,001	0,019	0,36	9,6	0,002
11	0,002	0,018	0,32	9,68	0,003
12	0,001	0,020	0,36	9,64	0,002
13	0,004	0,018	0,32	9,64	0,004
14	0,001	0,021	0,36	9,68	0,003
15	0,001	0,018	0,32	9,6	0,002
16	0,002	0,020	0,36	9,6	0,002
17	0,001	0,018	0,32	9,64	0,001
18	0,000	0,021	0,32	9,6	0,003
19	0,001	0,019	0,32	9,68	0,003
20	0,001	0,020	0,36	9,56	0,003
21	0,003	0,017	0,32	9,6	0,003
22	0,001	0,020	0,36	9,6	0,002
23	0,000	0,018	0,32	9,56	0,002
24	0,002	0,021	0,36	9,6	0,002
25	0,001	0,023	0,36	9,68	0,003
26	0,001	0,021	0,32	9,64	0,002
27	0,001	0,022	0,32	9,64	0,003
28	0,001	0,020	0,36	9,64	0,002
29	0,002	0,022	0,32	9,68	0,002
30	0,001	0,021	0,32	9,68	0,004

Додаток Х

Результати досліджень зустрічного фрезерування при n=8000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,016	0,015	0,2	7,28	0,012
2	0,014	0,015	0,2	7,24	0,010
3	0,014	0,013	0,2	7,32	0,011
4	0,017	0,014	0,2	7,28	0,011
5	0,016	0,014	0,16	7,24	0,012
6	0,018	0,014	0,2	7,32	0,011
7	0,013	0,014	0,2	7,32	0,010
8	0,017	0,014	0,16	7,28	0,012
9	0,013	0,013	0,2	7,32	0,011
10	0,015	0,015	0,2	7,32	0,012
11	0,016	0,014	0,16	7,28	0,011
12	0,015	0,016	0,2	7,24	0,012
13	0,016	0,013	0,2	7,28	0,011
14	0,013	0,016	0,2	7,28	0,012
15	0,015	0,012	0,16	7,28	0,012
16	0,015	0,016	0,2	7,28	0,011
17	0,019	0,014	0,2	7,24	0,012
18	0,015	0,015	0,2	7,28	0,010
19	0,016	0,013	0,2	7,24	0,011
20	0,015	0,014	0,2	7,24	0,011
21	0,016	0,014	0,2	7,28	0,011
22	0,014	0,013	0,16	7,28	0,011
23	0,015	0,014	0,2	7,28	0,010
24	0,016	0,014	0,2	7,28	0,012
25	0,014	0,015	0,2	7,28	0,011
26	0,015	0,013	0,2	7,28	0,011
27	0,012	0,014	0,2	7,28	0,010
28	0,017	0,014	0,2	7,32	0,012
29	0,015	0,014	0,16	7,28	0,011
30	0,017	0,014	0,2	7,28	0,010

Додаток Ц

Результати досліджень попутного фрезерування при n=8000 об/хв

Номер різу	Відхилення від ППР точки врізання зуба фрези ($\Delta_{вр}$), мм	Відхилення від ППР точки виходу зуба фрези ($\Delta_{вих}$), мм	Час різання ($t_{різ}$), 10^{-3}с	Час холостого ходу ($t_{хх}$) , 10^{-3}с	Відхилення від ППР максимального відхилення деталі (Δ_{max}), мм
1	0,006	0,008	0,2	7,32	0,003
2	0,004	0,009	0,24	7,36	0,002
3	0,004	0,008	0,24	7,32	0,003
4	0,005	0,009	0,24	7,36	0,003
5	0,002	0,006	0,2	7,36	0,002
6	0,005	0,009	0,16	7,36	0,002
7	0,006	0,009	0,2	7,4	0,002
8	0,005	0,008	0,16	7,36	0,003
9	0,003	0,009	0,2	7,36	0,002
10	0,005	0,006	0,2	7,36	0,002
11	0,004	0,008	0,2	7,32	0,002
12	0,005	0,009	0,24	7,32	0,003
13	0,004	0,008	0,24	7,36	0,002
14	0,002	0,009	0,24	7,32	0,002
15	0,003	0,009	0,2	7,36	0,003
16	0,004	0,009	0,2	7,32	0,003
17	0,000	0,008	0,2	7,36	0,000
18	0,004	0,008	0,2	7,32	0,002
19	0,003	0,009	0,2	7,36	0,003
20	0,001	0,008	0,2	7,36	0,001
21	0,005	0,008	0,2	7,36	0,003
22	0,007	0,009	0,2	7,36	0,003
23	0,004	0,007	0,24	7,32	0,003
24	0,004	0,008	0,24	7,32	0,002
25	0,003	0,009	0,2	7,32	0,002
26	0,005	0,008	0,24	7,32	0,003
27	0,005	0,009	0,2	7,36	0,002
28	0,003	0,009	0,2	7,36	0,002
29	0,003	0,008	0,2	7,32	0,002
30	0,004	0,009	0,24	7,36	0,002