

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 Національний університет «Запорізька політехніка»

РЕЦЕНЗІЯ  
 на дипломний проект (роботу)

Дослідження впливу частоти обертання шпинделя  
(вказати тему дипломного проекту (роботи))  
 на коливання потужності детала при поєднанні лінійової функції  
 Студент (ка) Блід Олена та Іванко Сергій  
Терешівна

Спеціальність 131 Прокладка механіка  
(код, найменування спеціальності)

Обсяг проекту повний

Кількість аркушів креслень 25 сторівок презентації

Кількість сторінок пояснювальної записки 76

а) короткий зміст проекту (роботи) та прийнятих рішень Лінійна шпиндельна лінійна температура детала була визначена методом забезпечення проведення досліджень. Проведено аналіз впливу експлуатаційних параметрів детала на його роботу. Розраховано параметри БЧД та криві висоти збирання. Розраховано зусилля з опорою пружин.

б) висновок про відповідність проекту (роботи) завданню робота відповідає завданню.

в) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту (роботи), рівень відповідності останнім досягненням науки та техніки і передовим методам роботи

робота виконана з використанням сучасних методів, інструментальних датчиків та АЧД.

г) негативні особливості виконання проекту (роботи) Не обурювало чому для імпортування обрано така компанія.

д) позитивні особливості всередині виконували отримати результати та висновки.

е) оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки до проекту (роботи)

Робота виконана з великою кількістю сторівок.

до подсилювачної залюстки.

є) відгук про проект (роботу) загалом Робота виконана в повному обсязі.

ж) інші зауваження У роботі не наведено кореляційної залежності між кроком на обробленій поверхні і змінною відхилення ТТР в зоні профілювання, що необхідно для об'єктивного підставі щодо розробки крок на являється поверхні.

з) оцінка проекту (роботи) В цілому робота заслуговує оцінку „Відмінно“

Рецензію склав доц кафедри: ТМБ Пухальська Тарасівна

(посада, місце роботи, прізвище, ім'я, по батькові)

Телу  
(підпис)

« 5 » 12 20 19 р.

[13:48:22] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №57 [3] (200057 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:48:30] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №62 [3] (200054 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:48:38] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №67 [3] (200039 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:49:09] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №32 [3] (200047 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:49:38] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №17 [3] (200055 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:50:04] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №72 [3] (200036 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:53:18] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №77 [3] (200044 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:56:55] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №82 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:12] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №87 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:21] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №92 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:33] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №97 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:41] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №102 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:49] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №107 [3] (200032 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло )

[13:57:49] Тип проверки: *Стандартная*

**[13:57:49] ВНИМАНИЕ! Уникальность может быть определена некорректно! (Обнаружено ошибок: 27%)**

[13:57:49] Уникальность текста 99%<sup>с</sup> (Проигнорировано подстановок: 0%)

Перевірку на плагіат програмою AntiPlagiarism.NET, магістерської роботи Блід О.Г., провів зав. навч. лаб. каф. ТМБ Даміров В.М.

04.12.2019р.



Форма № 24

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
 Національний університет «Запорізька політехніка»

Механікобудівної  
 (повне найменування інституту, факультету)  
Технології механікобудування  
 (повне найменування кафедри)

### Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістерський)  
 (ступінь вищої освіти)

на тему Дослідження впливу частоти обертання  
шпинделя на коливання торкостімної деталі при  
попутному кінцевому фрезеруванні на якості обробленої  
поверхні

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М1184

Спеціальності 131 Прикладна механіка  
 (код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології механікобудування

Вліг О.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник Ведє С.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Пухальська Т.В.

(прізвище та ініціали)

20 19

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Національний університет «Запорізька політехніка»**  
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет машинобудівний  
 Кафедра Технології машинобудування  
 Ступінь вищої освіти другий (магістерський)  
 Спеціальність 131 Трикласна механіка  
(код і найменування)  
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри П.М.Б.  
Діда С.С.  
 «05» 12 2019 року

**ЗАВДАННЯ**  
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Блід Олена Тетянівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження впливу частоти обертання шпинделя на коливання тонкостінної деталі при попутному кінцевому фрезеруванні та якість обробленої поверхні  
 керівник проекту (роботи) Діда Сергій Іванович, к.т.н. доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «26» листопада 2019 року № 416

2. Строк подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) вертикально-фрезерний верстат FWD-32J, інструмент однозуба, прямозуба, спеціальна фреда Ф50 ВкФ зразок СтЗ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Літературний огляд джерел, методично задумане вивчення розмірів, аналіз експериментальних даних, оцінка праці та часу в карбованій реалізації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

25 скейрів грезек машині

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Докладник	Діреє С.І з в. КСФ Т.М.Б	2.09.19	04.12.19
Охор. прац.	Шмисько В.І к.т.н., доц.	В.С. 41019	В.С. 2911.19
Моральні конзонта	Гончар Н.В. к.т.н. роч.	В.С. 05.12.19	В.С. 05.12.19

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2019 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Огляд літературних джерел	08.10.2019	
2	Методична забезпечення перевірки розкриття	22.10.2019	
3	Аналіз експертної оцінки розкриття	05.11.2019	
4	Оцінка прискі та бюджету в надзвичайній ситуації	29.11.2019	

Студент(ка)

  
(підпис)

Білець О.І.  
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

  
(підпис)

Діреє С.І.  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

ПЗ: 76 стор. ,6 табл.,43 рис. ,24 джерел ,5 додаток.

Об'єкт дослідження – процес попутного фрезерування зразків при різних частотах обертання в умовах дії автоколивань.

Метод дослідження – експериментально-аналітичний.

Мета роботи – дослідження впливу частоти обертання шпинделя на коливання тонкостінної деталі при попутному фрезеруванні та якість обробленої поверхні.

В ході виконання роботи був проведений огляд літературних джерел авторів, які досліджували проблеми, що виникають при обробці деталей в умовах виникнення автоколивань, причини виникнення автоколивань, самоорганізацію коливального руху при автоколиваннях. За розробленою методикою та за допомогою експериментального оснащення були отримані осцилограми коливань зразків при попутному кінцевому фрезеруванні. Для аналізу отриманих осцилограм була застосована методика з використанням 14 параметрів, що характеризують коливальний рух деталі. Визначено взаємозв'язок між профілем обробленої поверхні та деякими з цих параметрів. Досліджено формування обробленої поверхні при фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя.

ЗРАЗОК, АВТОКОЛИВАННЯ, СТЕНД, ДАТЧИК, РЕЖИМИ РІЗАННЯ,  
ІНСТРУМЕНТ, ВЕРСТАТ, ХВИЛЯСТІСТЬ, ПРОФІЛЬ

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень, і термінів	7
Вступ	8
1 Огляд літературних джерел.....	9
1.1 Причини виникнення вібрацій при механічній обробці та шляхи їх пригнічення.....	9
1.2 Осцилограми, як джерело інформації про процес різання.....	13
1.3 Висновки.....	16
2 Методичне забезпечення проведення досліджень.....	18
2.1 Стенд для проведення досліджень вібрацій тонкостінного елемента деталі при кінцевому фрезеруванні.....	19
2.2 Електроконтактний пристрій, що визначає умови контакту інструмента з оброблюваною деталлю.....	20
2.3 Методика аналізу осцилограм для попутного фрезерування.....	22
2.4 Пристрій для здійснення запису профілю обробленої поверхні...	24
2.5 Умови проведення досліджень.....	25
2.6 Висновки.....	26
3 Аналіз експериментальних досліджень.....	27
3.1 Визначення характеристик коливального руху деталі, що впливають на формування обробленої поверхні при попутному фрезеруванні .....	27
3.2 Дослідження впливу частот обертання шпинделя на характеристики коливань та формування профілю обробленої поверхні.....	40
3.2.1 Дослідження впливу частот обертання шпинделя на характеристики коливань.....	41
3.2.2 Дослідження впливу частот обертання шпинделя на формування профілю обробленої поверхні .....	45
3.3 Висновки.....	50
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	51
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	51
4.2 Заходи з забезпечення техніки безпеки.....	53
4.3 Заходи з забезпечення техніки безпеки.....	57
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	61
4.5 Безпечність при виконанні фрезерних робіт на верстаті FWD -32J	63
4.6 Організація дослідження стійкості роботи промислового об'єкта	65



4.7 Висновки.....	65
Висновки.....	66
Перелік посилань.....	68
Додаток А Значення коливальних характеристик деталі за 14 параметрами при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 280 об/хв .....	71
Додаток Б Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 180 об/хв .....	72
Додаток В Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 224 об/хв .....	73
Додаток Г Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 280 об/хв .....	74
Додаток Д Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 355 об/хв .....	75
Додаток Ж Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 450 об/хв.....	76

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ТЕД	- тонкостінний елемент деталі
БФО	- базовий фрагмент осцилограми
ПС	- пружна система
ПЗ	- програмне забезпечення
ПК	- персональний комп'ютер
ЧПК	- числове програмне керування
АЦП	- аналогово-цифровий перетворювач
ППР	- положення пружної рівноваги
ВДТ	- відеодисплейні термінали
ЕОМ	- електронно-обчислювальні машини
КПО	- коефіцієнт природної освітленості
ЦЗ	- цивільний захист

## ВСТУП

В авіадвигунобудуванні та інших галузях промисловості широко використовують деталі, що мають тонкостінні елементи деталей (ТЕД). Це моноколеса, диски турбін та інші, які часто отримують шляхом кінцевого фрезерування на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК).

Особливістю фрезерування ТЕД є поява під час обробки коливань (вібрацій), які негативно впливають на якість і точність, а також призводять до прискореного зносу інструменту і шпиндельного вузла. Крім цього доведено, що основною причиною збудження автоколивань є обробка по вібраційному сліду, залишеному на поверхні різання від попереднього проходу зуба інструмента

Для більш детального вивчення розвитку коливального руху деталі при кінцевому фрезеруванні деталі автором [1] пропонується розділити осцилограму на окремі базові фрагменти (БФО) і виконувати їх аналіз за 14 параметрами. При зустрічному фрезеруванні їх аналіз розглянуто в роботах [22,23]. При попутному фрезеруванні така робота є малодослідженою. Тому для цієї обробки оцінка коливального руху за 14 ознаками залишається актуальною

В зв'язку з цим, метою дипломного проекту є дослідження закономірностей коливань тонкостінних деталей при попутному фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя за допомогою БФО.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз літературних джерел щодо дослідження коливань при різанні металів та їх вплив на формування обробленої поверхні.
2. Розробити методику проведення дослідження процесу різання при фрезеруванні.
3. Розробити методику дослідження осцилограм коливань деталі.
4. Дослідити взаємозв'язок між параметрами обробленої поверхні та 14 параметрами, що описують базові фрагменти осцилограм.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Поява коливального процесу певної інтенсивності при обробці різанням є в багатьох випадках основною причиною, що обмежує можливість підвищення режимів різання, а отже, і продуктивності.

Крім цього, поява періодичного коливального руху при різанні металів шкідливо впливає на стійкість різального інструменту, а також на справність і довговічність верстата, так як він, зазвичай, створює відносно великі додаткові динамічні навантаження на інструмент і верстат [5].

### 1.1 Причини виникнення вібрацій при механічній обробці та шляхи їх пригнічень

Розкриття фізичних причин появи вібрацій в технологічній системі при різанні металів привернуло увагу дослідників з самого початку розвитку науки про різання [2].

Для появи вібрацій (коливань) потрібна дія зовнішньої сили на пружну систему деталі. Співвідношення між цими параметрами визначає як можливість виникнення вібрацій, так і їх інтенсивність, тобто амплітуду.

Колівання при різанні бувають, як правило, двох типів: вимушені, коли причиною коливань є періодично діюча змушуюча сила, і автоколивання, що відбуваються без впливу зовнішньої періодичної сили [6].

Вимушені коливання виникають внаслідок наявності в технологічній системі зовнішніх періодичних сил, які можуть бути розділені на дві групи:

1. Змінні сили, що обумовлені процесом різання, і виникають при знятті нерівномірного припуску, переривчастим характері різання, що характерно для фрезерування.

2. Змінні сили, що виникають в системі поза зоною різання. До цієї групи належать коливання, викликані дефектами механізмів верстата:

перекосом осей, похибками зубчастих або клиноремінних передач, підвищеними люфтами і т.п.; дисбалансом його окремих частин, що обертаються: заготовок, пристосувань, інструментів і т.п., а також коливаннями, переданими на верстат від інших працюючих машин.

Методи боротьби з вимушеними коливаннями добре відомі - необхідно зменшити дію періодичної сили [8].

Це досягається балансуванням інструменту (шліфувальних кругів, фрез, різьбових головок) і заготовок, віброізоляцією фундаментів верстатів і т.д. Значно більш складним завданням є гасіння вібрацій, що мають автоколивальний характер.

Автор [3] зазначив що автоколивальний процес – це такий процес, при якому змінна сила, що підтримує коливальний рух, створюється і управляється самим рухом і при припиненні цього руху зникає. Автоколивання при різанні відносять до самозбуджуючих вібрацій, які негативно впливають на стійкість інструменту, продуктивність, якість обробки та розмірну точність. Причини виникнення автоколивань пояснюються наступними положеннями:

1. Залежність коефіцієнта тертя на передній поверхні інструменту від швидкості стружки, що зрізається [4]. Але в дослідях [2] показано що нелінійна залежність сили тертя стружки від швидкості різання не може бути причиною виникнення вібрацій при різанні через інерційність залежності сили різання від швидкості.

2. Відставання зміни сили різання від зміни товщини шару, що зрізається [2].

3. Координатний зв'язок переміщень інструменту по взаємоперпендикулярним осям координат, який приводить до руху інструменту по замкнутій еліпсообразній траєкторії [5, 6, 7, 8].

4. Зміна кінематичних кутів інструменту при коливаннях, що приводить до змінної сили різання [9, 4, 5].

Перераховані причини відносять до первинних. Вторинні причини автоколивань пов'язані з повторним збудженням через товщину стружки, що

періодично змінюється завдяки залишеному хвилястому сліду на поверхні різання [10, 11].

Автоколивання характеризуються тим, що вони виникають і підтримуються джерелами енергії, які не володіють коливальними властивостями. Частота автоколивань майже не залежить від режимів різання, а визначається, головним чином, жорсткістю системи і величиною коливальних мас [3].

Вібрації при механічній обробці - це класична проблема, яка обмежує продуктивність. Ще в 1907 році Фредерік Тейлор [2] заявив, що «вібрація є найбільш неясною і делікатною з усіх проблем, що стоять перед механіком, а в разі виливків і поковок різних форм, ймовірно, не можуть бути розроблені ніякі правила або формули, які точно визначали б механіки».

Основними заходами щодо боротьби з автоколиваннями є:

1. Раціональна геометрія інструменту, яка дозволяє зменшити ширину шару, що зрізається, шляхом призначення кутів у плані, переднього, заднього та радіусу при вершині.

2. Підвищення жорсткості коливальної системи за рахунок використання спеціальних інструментів та пристосувань для їх закріплення, зменшення биття шпинделя та люфтів супорту. Все це підвищує власні частоти коливальних системи, що збільшує роботу щодо їх затухання.

3. Підвищення демпфуючої властивості технологічної системи за рахунок демпфуючих прокладок, використання матеріалів корпусів інструментів з великим декрементом затухання, використання спеціальних фрикційних віброгасників.

4. Зменшення маси коливальної системи для підвищення власної частоти коливальних за рахунок використання немасивних, але жорстких патронів, мінімального вильоту інструментів та пінолі.

5. Використання динамічних віброгасників, що у вигляді невеликої маси пружно закріплюються на коливальну ланку. Маса віброгасника має частоту власних коливальних, що дорівнює частоті коливальних системи.

6. Демпфування вібрацій ультразвуковим способом, при якому різальний інструмент отримує тангенціальні коливання малої амплітуди.

В деяких випадках автоколивання мають позитивний вплив, за рахунок чого зменшується тертя стружки при зрізанні, полегшується процес різання. Але при цьому амплітуда автоколивань не повинна перевищувати 0,020мм [2].

При обробці різанням актуальним є питання щодо визначення умов, при яких вплив автоколивань буде суттєвим. Для цього були проведені дослідження, на підставі яких для фрезерування було визначено п'ять швидкісних зон [12]. В кожній зоні діють характерні для них види коливань. Розподіл швидкостей по зонам здійснюється на підставі значення у співвідношенні часу різання ( $t_{\text{різ}}$ ) або часу холостого ходу ( $t_{\text{х.х.}}$ ) до періоду власних коливань деталі ( $T_{\text{ВКЕ}}$ ) (рис.1.1).

Швидкісна зона коливань	I	II	III	IV	V
Визначальне співвідношення	$\frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{ВКЕ}}} \geq 25$	$25 > \frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{ВКЕ}}} \geq 7$	$7 > \frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{ВКЕ}}} \geq 1$	$\frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{ВКЕ}}} < 1$ $\frac{t_{\text{х.х.}}}{T_{\text{ВКЕ}}} \geq 1$	$\frac{t_{\text{х.х.}}}{T_{\text{ВКЕ}}} < 1$

Рисунок 1.1 – Визначальні співвідношення для визначення швидкісної зони коливань при обробці ГЕД

Для першої зони характерними є вимушені коливання, для другої – вимушені та власні коливання при виході інструменту, для третьої – вимушені, автоколивання та власні, для четвертої – вимушені та власні, для п'ятої – вимушені. Найбільші амплітуди автоколивання мають саме у третій швидкісній зоні, обробка в якій припадає на напівчистове фрезерування деталей з важкооброблюваних матеріалів.

## 1.2 Осцилограми, як джерело інформації про процес різання

Формування обробленої поверхні відбувається під час різання і представляє сукупність западин, що залишаються від поверхні різання. Наочно побачити це неможливо, бо зона різання закрита і є небезпечною. Тому постає питання, яким чином можна дослідити, що в ній відбувається. Перші кроки, що були зроблені в цьому напрямку, показані в роботі [13]. Одним з важливих результатів цих досліджень був експериментально встановлений факт того, що при фрезеруванні ТЕД, в контакт з деталлю завжди знаходиться не більше одного зуба. Іншими словами, при остаточному (фінішному) фрезеруванні за час між врізанням двох сусідніх зубів (період зубцевої частоти -  $T_z$ ) пружна система ТЕД під час різання –  $t_{різ}$  відхиляється від дії сили різання  $P_{від}$ , а під час холостого ходу –  $t_{х.х.}$  (до підходу наступного зуба) здійснює вільні затухаючі коливання. Цей процес періодично повторюється. На рис. 1.2 у різних масштабах показана осцилограма коливання ТЕД.

Ділянки осцилограми коливань ТЕД, що періодично повторюються, починаючи від врізання попереднього зуба фрези і до врізання наступного, отримали назву базовий фрагмент осцилограми (БФО) (рис.1.3). БФО є графічним зображенням закону руху ТЕД при фрезеруванні під дією всіх видів сил за певний період часу, що дорівнює періоду зубцевої частоти -  $T_z$ . Поділ осцилограми на базові фрагменти дозволяє кількісно оцінювати коливальні процеси, що виникають під час фрезерування ТЕД. Але слід зазначити щодо інформативності коливальних характеристик ще недостатньо проведено досліджень. При цьому слід звернути увагу, що Ю. О. Розенберг [21] при описанні умов формування профілю обробленої поверхні після циліндричного фрезерування ввів поняття зони профілювання, як частини поверхні різання, що залишається на деталі після обробки. Таким чином, процеси, що відбуваються на поверхні різання під час обробки, безпосередньо беруть участь у формуванні профілю. Розенберг на прикладі схеми, що зображена на рис.1.4, дав цьому наступне пояснення.



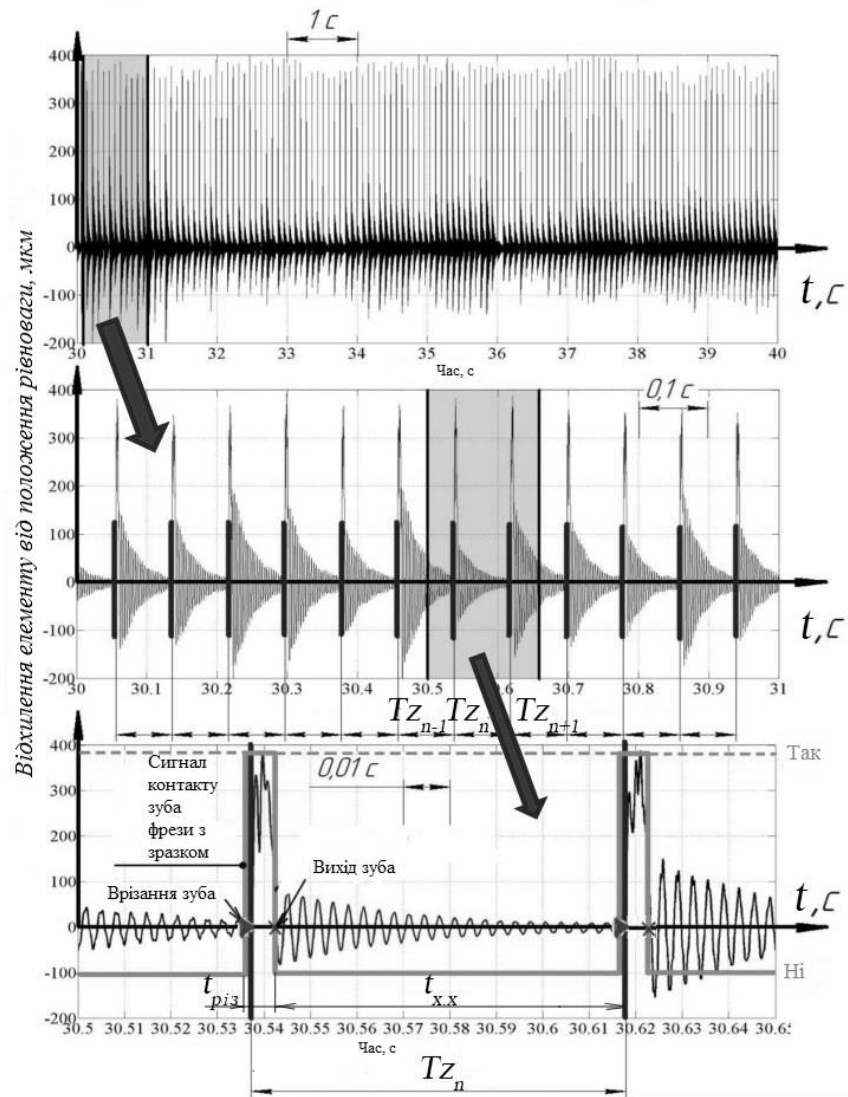


Рисунок 1.2 – Осцилограма коливального руху ТЕД

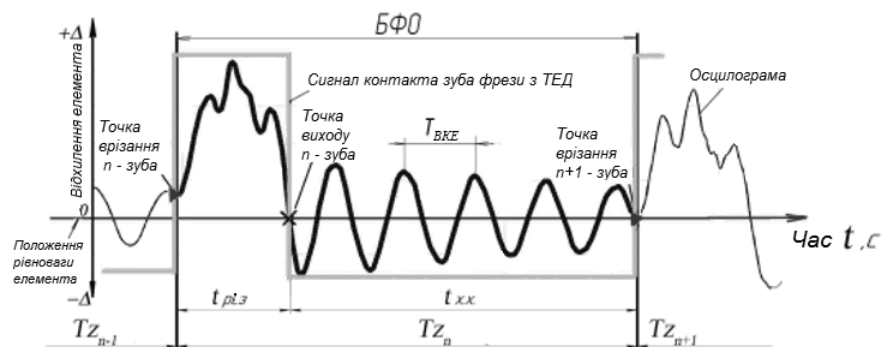


Рисунок 1.3 - Базовий фрагмент осцилограми (БФО) коливання ТЕД при фрезеруванні:

$t_{різ}$  - час різання, с;  $t_{х.х}$  - час холостого ходу, с;  $Tz$  - період зубцевої частоти, с;

$T_{вкє}$  - період власних коливань ТЕД, с

Траєкторією відносного руху зуба фрези є подовжена циклоїда з кроком, рівним подачі на зуб  $S_z$ . При попутному фрезеруванні зуб фрези врізається в припуск в точці А і виходить з нього в точці В.

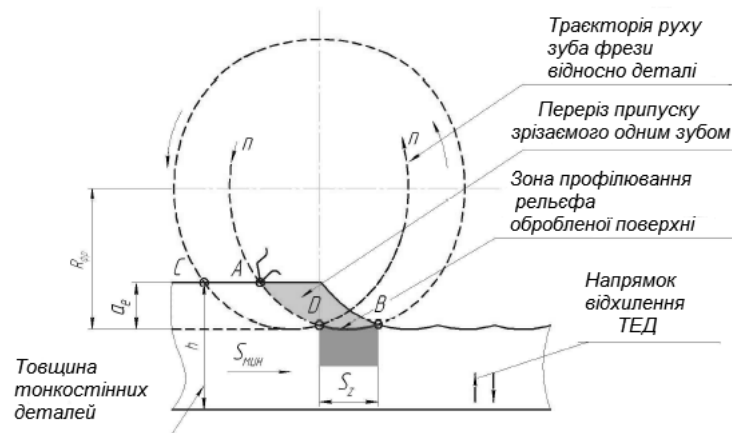


Рисунок 1.4– Формування профілю обробленої поверхні при попутному фрезеруванні ТЕД

Рух зуба від точки В (під час холостого ходу) відбувається по повітрю, не торкаючись деталі і в точці С він знову врізається в припуск. У точці D зуб виходить з припуску і знову робить холостий хід.

На обробленій поверхні залишається частина поверхні різання DB, що отримана в результаті попереднього проходу зуба. Таким чином, частина поверхні різання, що залишилася від попереднього проходу зуба, формує рельєф обробленої поверхні і є ділянкою профілювання рельєфу. Але наведений механізм формування обробленої поверхні не враховує дію автоколивань. Виходячи з того, що форма поверхні різання співпадає за формою з відповідним БФО [17], на рис. 1.5 показано розподіл зон на поверхні різання [13]. Згідно з цим при попутному фрезеруванні в точці А на БФО зуб врізається в припуск і зрізає його виходячи в точці В. Далі, від точки В до точки С деталь здійснює вільні затухаючі коливання, а зуб за час  $t_{xx}$  здійснює

холостий хід до наступного врізання. Від точки С до точки Е відбувається знову процес різання.

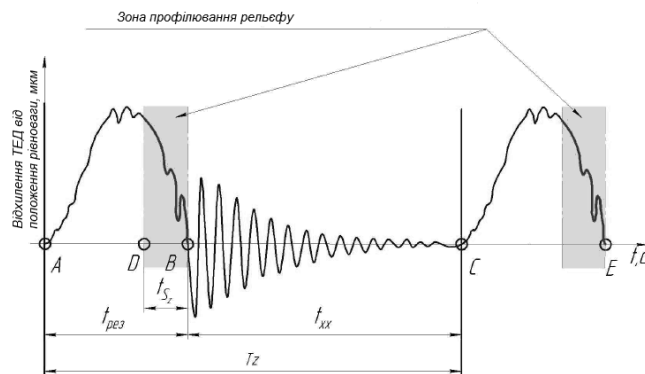


Рисунок 1.5 – Зони на поверхні різання, визначені за допомогою БФО

Зіставивши схему формування профілю (рис. 1.4) з БФО (рис. 1.5), стає зрозумілою зв'язок умов коливання ТЕД в період профілювання з формуванням геометрії обробленої поверхні. Іншими словами, на БФО в період різання  $t_{рез}$  є ділянка DB, умови коливання на якій і визначають якість обробленої поверхні. При цьому слід зазначити, що визначення положення такої ділянки на поверхні різання потребує дослідження.

Також слід відзначити, що ділянка AD на БФО для попутного фрезерування Ю. О. Розенбергом була названа зоною нечутливості, коли пружні деформації TC під дією сил різання не впливають на величину похибки обробки.

### 1.3 Висновки

З огляду літературних джерел встановлено:

1. При фрезеруванні виділено п'ять швидкісних зон, в яких при різанні діють характерні для них коливання. Зона визначається по величині відношення часу різання до періоду вільних коливань деталі.

2. При фрезеруванні завжди діють вимушені коливання, а за певних умов виникають автоколивання у третій швидкісній зоні.

3. Автоколивання поділяють на первинні та вторинні, що виникають при обробці по хвилястому сліду на поверхні різання.

4. Коливальний рух деталі під час фрезерування можна досліджувати за допомогою БФО, що виділяють на осцилограмі.

5. На поверхні різання, яку можна досліджувати за допомогою БФО, є ділянка, яка профілює оброблену поверхню, але визначення її положення потребує дослідження.

## 2 МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Схема кінцевого фрезерування ТЕД показана на рис. 2.1. Особливістю при фрезеруванні ТЕД є поява коливань під час обробки. При цьому на тонкостінний елемент діє система сил:

-  $P_{\text{від}}$  – сила відтискання, що є зовнішньою змушуючою силою, яка відхиляє деталь від положення її рівноваги. Величина сили відтискання залежить від умов різання (режимів обробки, геометрії інструменту, властивостей оброблюваного матеріалу). Після відхилення деталі від положення пружної рівноваги (ППР) в ній виникають внутрішні сили.

-  $P_{\text{пр}}$  – відновлююча сила пружності, яка прагне повернути деталь в положення рівноваги. Значною мірою на її величину впливає жорсткість та величина відхилення від положення рівноваги ТЕД.

-  $P_{\text{тер}}$  – сила внутрішнього тертя (демпфування), залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу та швидкості відхилення ТЕД.

-  $P_{\text{ін}}$  – сила інерції, яка залежить від маси та прискорення руху ТЕД.

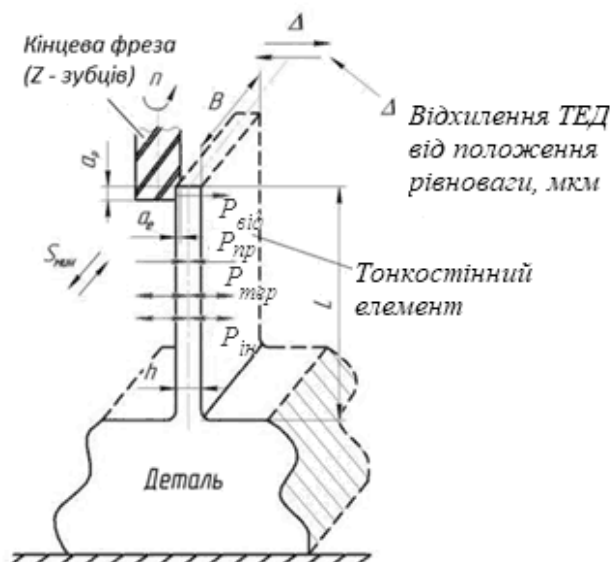


Рисунок 2.1 – Схема сил, які діють на ТЕД при кінцевому фрезеруванні

Окремо кожну силу визначити практично неможливо через постійну їх зміну як за величиною, так і за напрямком дії. Також досить складно описати закон коливань ТЕД. Проте закон коливань тонкостінного елемента можливо визначити експериментально, використовуючи сучасні датчики переміщень, які дозволяють отримувати сигнал, здійснювати його оцифрування за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та з використанням програмного забезпечення (ПЗ) зберігати великі об'єми інформації.

## 2.1 Стенд для проведення досліджень вібрацій тонкостінного елемента деталі при кінцевому фрезеруванні

Для проведення експериментальних досліджень коливань використовувався стенд [14], який призначений для вивчення механічних коливань при кінцевому фрезеруванні тонкостінних елементів деталей. Принципова схема стенду приведена на рис. 2.2.

При експериментах зразок - 3, кріпиться на прямокутній пластині - 1, яка у свою чергу жорстко кріпиться до масивної основи вимірювального стенду - 9, прижимом - 7. Під час фрезерування, внаслідок дії змушуючої сили віджимання -  $P_{від}$  з боку фрези, відбувається переміщення зразка - 3, що фіксується датчиком переміщення - 2 (XS1 M12AP120 марки Osiprox), який закріплюється на стійці 8, жорстко пов'язаної з основою - 9, яку встановлюють на робочому столі фрезерного верстата - 11. Індуктивний датчик переміщення дозволяє фіксувати закон руху пружного елемента під час обробки. Сигнал датчика оцифровується за допомогою АЦП Е-140 фірми L-Card. Запис осцилограм коливань та їх зберігання здійснюється програмним забезпеченням, встановленим на персональний комп'ютер (ПК).

Особливістю експериментального стенду є можливість окремого дослідження, як зони обробки за рахунок зміни оброблюваного матеріалу, так і пружної системи за рахунок зміни її жорсткості. Це дозволяє розглядати

процеси силового впливу в зоні обробки в різних умовах різання, при однакових динамічних і статичних характеристиках ПС. І навпаки, при незмінних умовах різання досліджувати вплив зміни статичних і динамічних характеристик ПС.

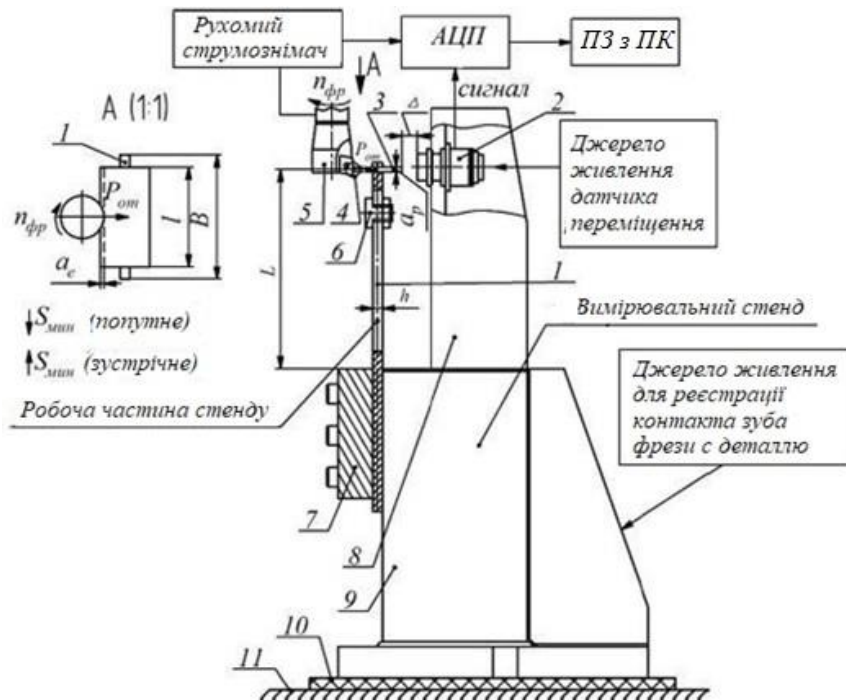


Рисунок 2.2 – Схема експериментального стенду для дослідження коливань при кінцевому фрезеруванні ТЕД:

1 - пружна система (ПС) ТЕД; 2 - датчик переміщення; 3 - оброблюваний зразок; 4 - зона обробки фрезеруванням; 5 - кінцева фреза; 6 - додаткова маса; 7 - прижим; 8 - стійка; 9 - основа; 10 - діелектрична прокладка (ізолятор); 11 - робочий стіл фрезерного верстата.

2.2 Електроконтактний пристрій, що визначає умови контакту інструмента з оброблюваною деталлю

Експериментальний стенд оснащений пристроєм [15], що дозволяє встановлювати умови контакту інструмента з оброблюваним зразком і відстежувати час різання та час холостого ходу (рис. 2.3).

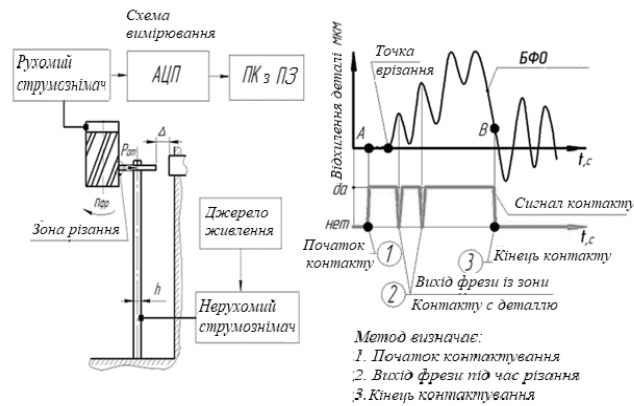


Рисунок 2.3 – Схема визначення умов контакту інструмента і деталі

Для цього стенд встановлюється на діелектричну прокладку – 10 (рис.2.2), яка розриває електричний зв'язок з верстатом. До стенду підводиться джерело живлення через рухомий струмознімач. В момент контакту зуба фрези – 5 з оброблюваним зразком – 3 відбувається замкнення окремого електричного ланцюга і сигнал передається на АЦП, що свідчить про наявність контакту інструмента з зразком. Після виходу зуба фрези з зони контакту ланцюг розривається і подача сигналу припиняється. Запис сигналу з струмознімача і сигналу переміщення зразка з датчика – 2 здійснюється одночасно, за рахунок цього поєднання осцилограми відхилення ТЕД при обробці та сигналу контакту фрези з оброблюваним зразком відбувається з високою точністю.

На рис. 1.2. приведена осцилограма коливального руху ТЕД, яка була записана в процесі кінцевого фрезерування. З рисунку видно, що суміщення осцилограми коливань ТЕД та сигналу контакту інструмента зі зразком дозволяє досить точно визначити час різання одним зубом -  $t_{різ}$ , та час холостого ходу –  $t_{х.х.}$ , які сумарно складають час циклу  $t_c$  [18].



## 2.3 Методика аналізу осцилограм для попутного фрезерування

Якщо розглядати осцилограму коливального руху ТЕД (рис 1.2) в різних часових масштабах, можна помітити, що вона складається з регулярно повторюваних ділянок. Для аналізу коливального процесу ТЕД при різанні осцилограму розбивають на базові фрагменти (БФО) [1].

Для оцінки коливальних явищ за БФО використовується спеціально створена методика [16], яка дозволяє обробляти дані, що були отримані в процесі різання. На рис. 2.5 показана схема, яка містить 14 параметрів, що характеризують коливання ТЕД при попутному фрезеруванні. Кожен параметр має кількісну характеристику у відповідності з розмірністю координатних осей (мм або с), в яких побудовані БФО.

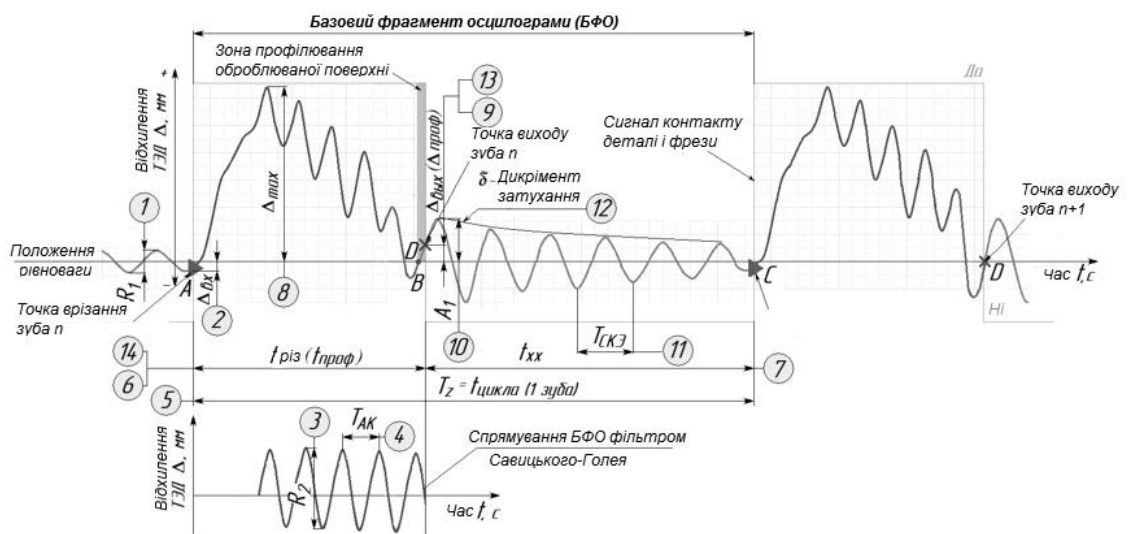


Рисунок 2.5 – 14 параметрів БФО при попутному фрезеруванні ТЕД

1.  $R_1$  - розмах вільних згасаючих коливань ТЕД перед врізанням зуба фрези в припуск, мм.

Характеризує рівень збудження пружної системи ТЕД перед врізанням чергового зуба фрези. При високошвидкісному фрезеруванні показує діапазон відхилення деталі від положення рівноваги в момент врізання зуба фрези.

2.  $\Delta_{6x}$  - точка А врізання зуба фрези в ТЕД, мм.

Визначає величину відхилення точки врізання фрези від положення рівноваги.

3.  $R_2$ - розмах автоколивань ТЕД, мм.

Характеризує рівень регенеративних автоколивань, які визначають якість профілю обробленої поверхні і стійкість інструменту.

4.  $T_{AK}$  - період автоколивань в процесі зрізання припуску зубом фрези, с

(частота автоколивань -  $f_{AK} = \frac{1}{T_{AK}}$ , Гц)

Визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду регенеративних автоколивань під час різання  $t_{piz}$ .

5.  $T_z$  - період зубцевої частоти ( $T_z = \frac{60}{n}$ ), с (зубцева частота  $f_z = \frac{1}{T_z}$ , Гц).

Час між двома врізаннями сусідніх зубів. Визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду зубцевої частоти -  $T_z$ , с.

6.  $t_{piz}$  - час різання одним зубом фрези, с.

Час між входом і виходом зуба фрези із зрізаного припуску. Визначає час зрізання припуску одним зубом.

7.  $t_{x,x}$ - час холостого ходу, с.

Час між точкою виходу із зрізаного припуску попереднього зуба і точкою врізання подальшого зуба. Визначається шляхом віднімання часу різання з періоду зубцевої частоти  $T_z$  ( $t_{xx} = T_z - t_{pez}$ ).

8.  $\Delta_{max}$ - максимальне відхилення ТЕД в результаті впливу змушуючої сили, мм.

Визначає максимальне відхилення ТЕД від положення рівноваги в період різання одним зубом.

9.  $\Delta_{вих}$ - точка В виходу зуба фрези із зони різання, мм.

Визначає величину відхилення точки виходу зуба фрези від положення рівноваги. Використовують при визначенні часу різання.

10.  $A_1$  - амплітуда першої хвилі вільних згасаючих коливань ТЕД, мм.

Характеризує величину енергії збудження ТЕД після виходу зуба фрези із зони різання. Величину  $A_1$  використовують при розрахунку логарифмічного декременту -  $\delta$ .

11.  $T_{BKE}$  - період вільних коливань ТЕД, з (частота вільних згасаючих

коливань ТЕД  $f_{BKE} = \frac{1}{T_{BKE}}$ , Гц).

Визначається шляхом вимірювання середнього значення періоду власних коливань ТЕД –  $T_{BKE}$ , с.  $T_{BKE}$  характеризує основну динамічну властивість пружної системи ТЕД, залежне від жорсткості, маси, демпфірування і розмірів ТЕД.

12.  $\delta$  - логарифмічний декремент вільних згасаючих коливань ТЕД.

Характеризує інтенсивність дисипації коливальної енергії в пружній системі ТЕД.

13.  $\Delta_{проф}$  - відхилення першої хвилі автоколивань від положення рівноваги при зустрічному фрезеруванні, або останньої хвилі автоколивань при попутному фрезеруванні. Характеризує глибину лунки від автоколивань на поверхні різання, яка залишається після руху подачі і формує оброблену поверхню. При попутному фрезеруванні може співпадати з  $\Delta_{вих}$ .

14.  $t_{проф}$  - час профілювання. Характеризує ділянку часу різання, коли при автоколиваннях вирізається лунка на поверхні різання, що формує згодом оброблену поверхню. При попутному фрезеруванні може співпадати з  $t_{різ}$ .

#### 2.4 Методика аналізу осцилограм для попутного фрезерування

Для запису профілю обробленої поверхні зразка застосовується спеціальний пристрій (рис. 2.6), що складається з основи –  $I$ , на якій

закріплюється індикаторний годинник ИЧ-10 та індуктивний датчик переміщення. Основа пристрою нерухомо закріплена на вертикальній стійці фрезерного верстата. Оброблену поверхню зразка, що закріплений на столі, переміщують до торкання наконечника - 3 індикаторного годинника. При наступному повздовжньому переміщенні стола зі зразком відносно годинника нерівності його поверхні викликають осьове переміщення наконечника годинника, які через п'яту - 2 змінюють відстань до індуктивного датчика. Сигнал з датчика записується за допомогою програмного продукту L-Graf на персональний комп'ютер у вигляді профілограми.

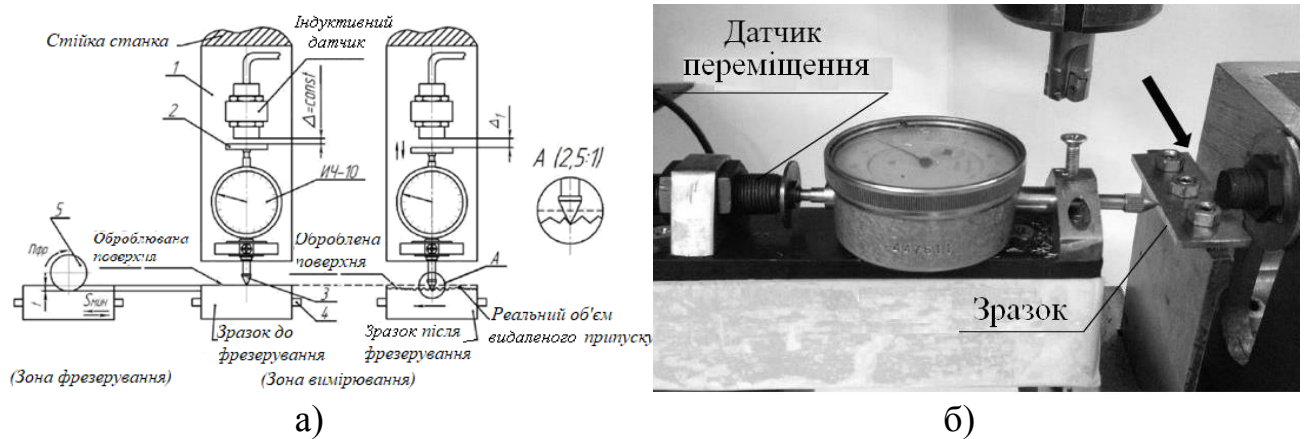


Рисунок 2.6. – Схема (а) та фото (б) пристрою для запису профілю обробленої поверхні

## 2.5 Умови проведення досліджень

Дослідження попутного фрезерування у третій швидкісній зоні виконувалося за таких умов.

1. Обладнання - вертикально-фрезерний верстат FWD-32J.
2. Інструмент - однозуба, прямозуба, спеціальна фреза  $\varnothing 50$  мм з регульованим положенням зуба, матеріал ріжучої частини ВК8; частота власних коливань 800 Гц.

3. Зразок – Ст 3.

4. Пружний елемент - виліт 80мм, ширина 60мм, товщина 6мм, частота власних коливань 390 Гц.

5. Режими різання:

частота обертання шпинделя,  $n_{\text{шп}} = 140, 224, 280, 355, 450$  об / хв;

подача на зуб,  $S_z = 0,1$  мм;

осьова глибина,  $a_p = 3,4$  мм;

радіальна глибина,  $a_e = 0,5$  мм

напрямок подачі – попутній, різання вільне.

## 2.6 Висновки

1. Спроековано спеціальний стенд, на якому можна досліджувати обробку деталей з різних матеріалів та різними динамічними характеристиками.

2. Для визначення умов контакту інструменту і деталі спроековано електроконтактний пристрій.

3. Для оцінки коливальних явищ за БФО використовують 14 параметрів.

4. Для запису профілю обробленої поверхні спроековано спеціальний пристрій з датчиком переміщень.

### 3 АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Визначення характеристик коливального руху деталі, що впливають на формування обробленої поверхні при попутному фрезеруванні

Схема попутного фрезерування принципово відрізняється від зустрічного. При ньому фреза врізається в найбільшу товщину шару, що зрізається (рис.3.1б), в той час як при зустрічному – в найменшу (рис.3.1 а). Це відповідним образом проявляється і на коливальному процесі при фрезеруванні.



Рисунок 3.1 - Схеми зміни товщини шару, що зрізається при зустрічному (а) та попутному (б) фрезеруванні

Товщина шару, що зрізається, певним чином є демпфером, що визначає початок виникнення автоколивань. Тому при зустрічному фрезеруванні вони виникають зразу після врізання зуба інструменту в деталь (рис. 3.2 а), а при попутному – через деякий час (рис. 3.2 б).

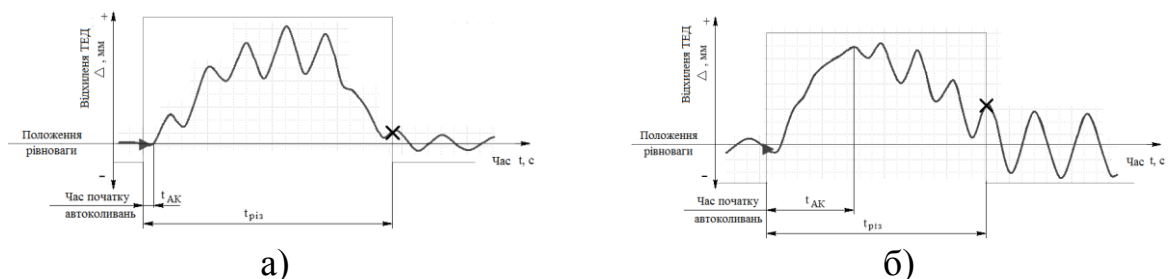


Рисунок 3.2 – Час початку автоколивань при зустрічному (а) та попутному (б) кінцевому фрезеруванні

Розрахунок довжини дільниці на поверхні різання ( $l$ ), коли виникають автоколивання, виконується за формулою

$$l = t_{AK} \cdot \frac{\pi D_{fp} n}{60}, \quad (3.1)$$

$t_{AK}$  – час, коли починаються автоколивання після врізання зуба інструменту в деталь, с;

$D_{fp}$  – діаметр фрези, мм;

$n$  – частота обертання шпинделя, об/хв.

Для умов різання, що наведені в п. 2.5 при частоті обертання шпинделя 280об/хв автоколивання виникають, коли товщина шару, що зрізається менше 0,013мм. Слід зазначити, що формування обробленої поверхні починається після виходу інструменту на повну глибину різання. Кількість різів ( $N_{риз}$ ), які зуб фрези повинен зробити для цього, визначається за формулою:

$$N_{риз} = \frac{l_{сп}}{S_z} = \frac{\sqrt{a_e (D_{fp} - a_e)}}{S_z}, \quad (3.2)$$

де  $a_e$  – радіальна глибина різання, мм;

$D_{fp}$  – діаметр фрези, мм;

$S_z$  – подача на зуб, мм.

Згідно вихідних даних для виходу на повну глибину різання потрібно зробити 53 різі.

Після фрезерування з режимами, що наведені в п. 2.5, при  $n=280$ об/хв була записана профілограма обробленої поверхні (рис. 3.3), яка не має стабільних значень кроку ( $S_w$ ) та висоти ( $W_z$ ) хвилястості. Вони змінюються в широких межах. На наведеній профілограмі  $S_{wmax}=1,88$ мм,  $S_{wmin}=0,656$ мм,  $W_{zmax}=0,109$ мм,  $W_{zmin}=0,026$ мм.

Для визначення характеристик коливального руху, що впливають на формування обробленої поверхні, за БФО визначали кількісні значення 14

параметрів, які наведені у Додатку А. Розглянуті параметри характеризують різання, коли формувалися перші кроки хвилястості на обробленій поверхні.

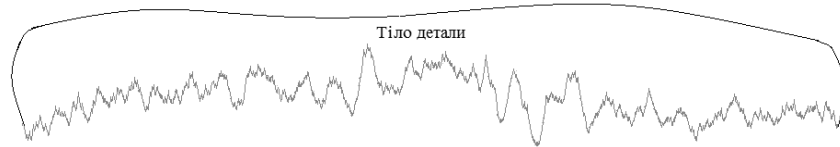


Рисунок 3.3 – Профілограма обробленої поверхні після попутного фрезерування з автоколиваннями

На підставі даних додатку А побудовані графіки змін 14 параметрів БФО, що зображені на рис.3.4 – 3.17.

Розмах вільних згасаючих коливань перед врізанням зуба фрези  $R_1$ , мм

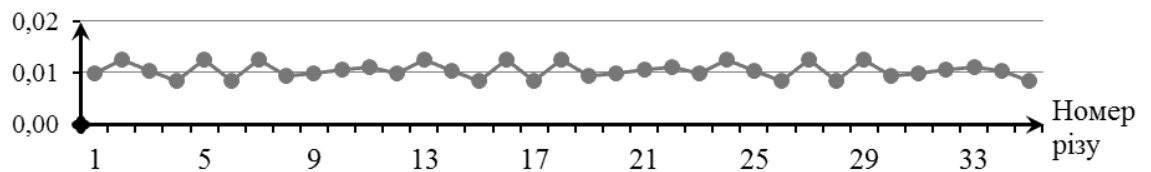


Рисунок 3.4 – Зміна розмаху вільних згасаючих коливань ТЕД перед врізанням зуба фрези при попутному кінцевому фрезеруванні

Відхилення деталі від пружної рівноваги при врізання зуба фрези  $\Delta_{вх}$ , мм

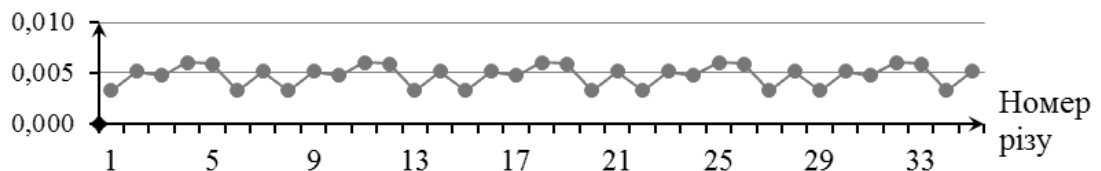


Рисунок 3.5 – Зміна відхилення деталі від ППР при врізання зуба фрези для кінцевого попутного фрезерування



Розмах автоколивань

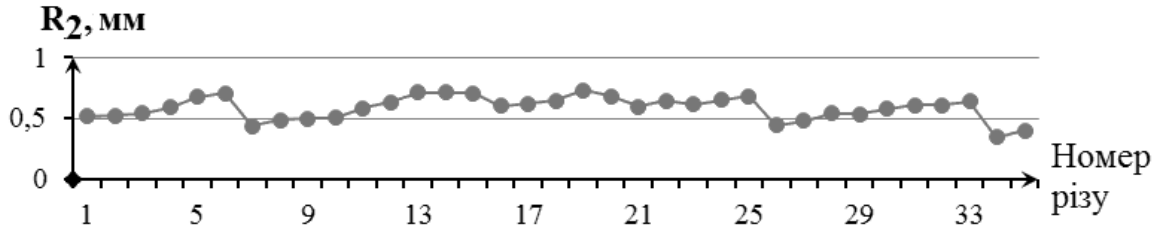


Рисунок 3.6 – Зміна розмаху автоколивань при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Період автоколивань

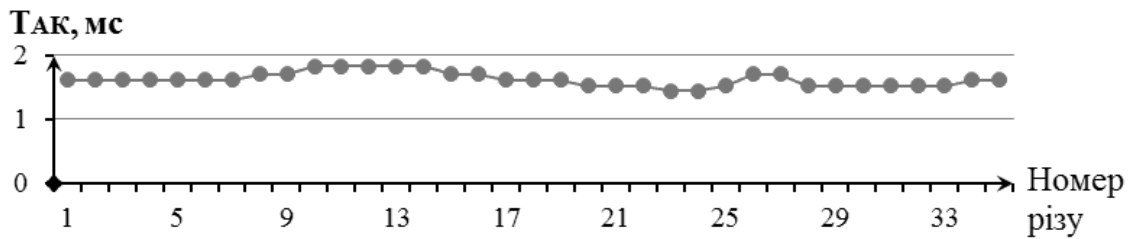


Рисунок 3.7 – Зміна періоду автоколивань при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Період зубцевої частоти  $T_Z$ , с

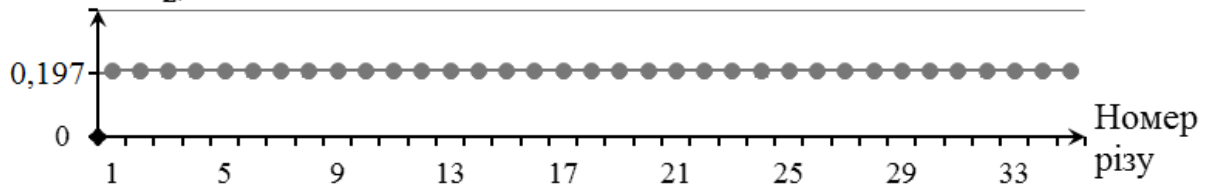


Рисунок 3.8 – Зміна періоду зубцевої частоти при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Час різання

$t_{різ}, мс$

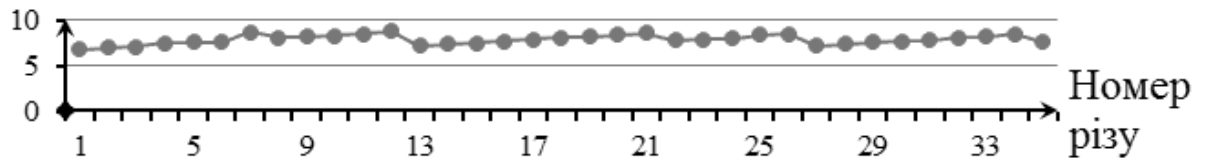


Рисунок 3.9 – Зміна часу різання при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Час холостого ходу

$t_{хх}, с$

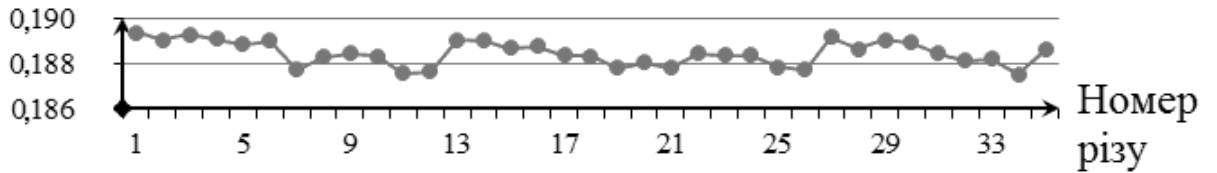


Рисунок 3.10 – Зміна часу холостого ходу при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Максимальне відхилення

$\Delta_{max}, мм$

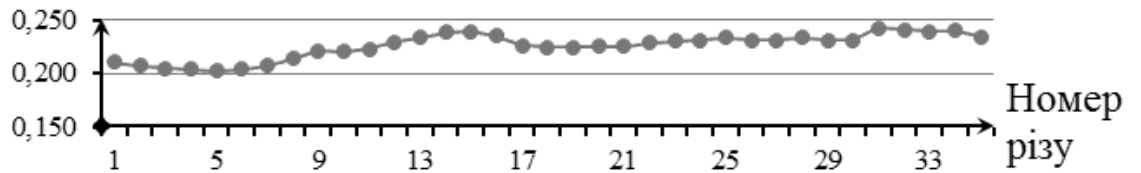


Рисунок 3.11 – Зміна максимального відхилення деталі при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Відхилення деталі від  
пружної рівноваги при  
виході зуба фрези  $\Delta_{\text{вих}}$ , мм

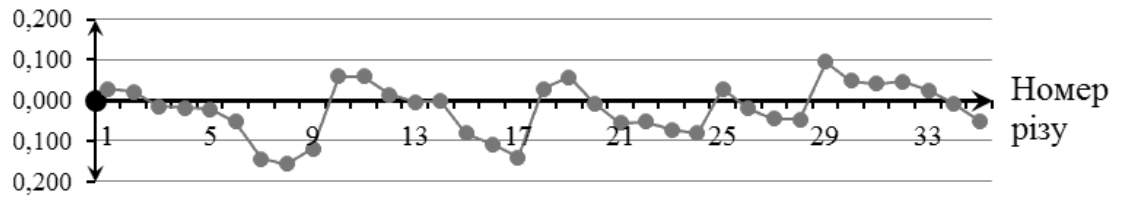


Рисунок 3.12 – Зміна відхилення деталі від ППР при виході зуба фрези під час попутного кінцевого циліндричного фрезерування

Амплітуда першої хвилі  
коливаний деталі  $A_1$ , мм

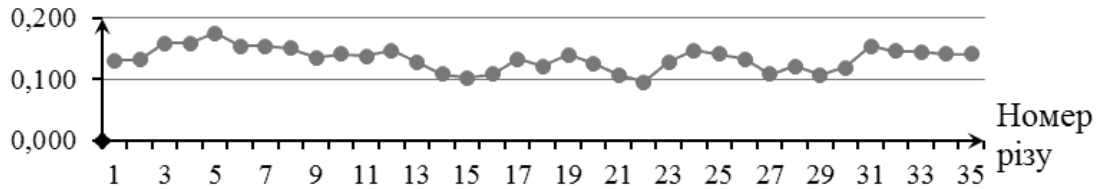


Рисунок 3.13 – Зміна амплітуди першої хвилі вільних коливань деталі при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Період вільних  
коливань деталі  $T_{\text{вк}}$ , мс

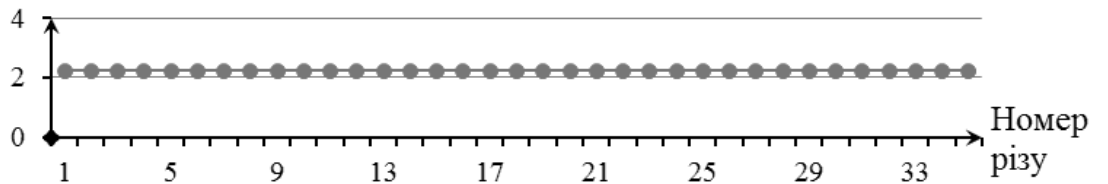


Рисунок 3.14 – Зміна періоду вільних коливань при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Логарифмічний декремент  
вільних коливань деталі  $\delta$

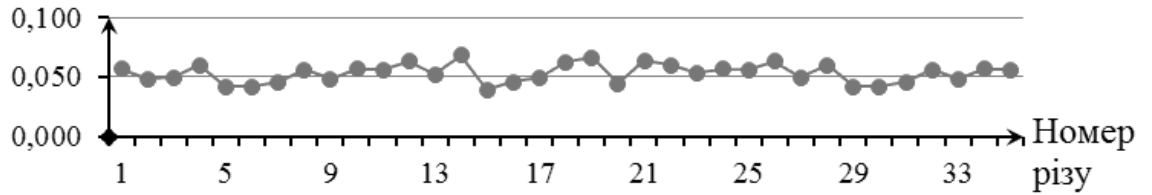


Рисунок 3.15 – Зміна логарифмічного декременту вільних згасаючих коливань ТЕД при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Відхилення в зоні  
профілювання  $\Delta_{\text{проф}}$ , мм

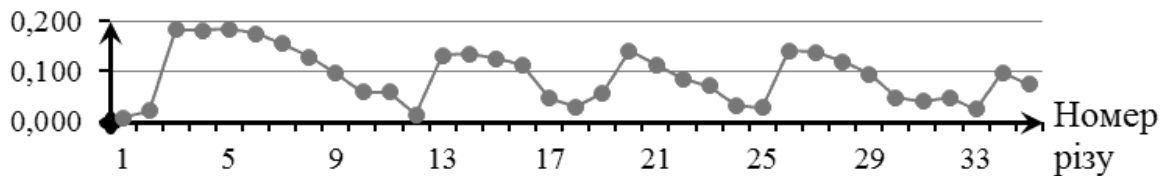


Рисунок 3.16 – Зміна відхилення деталі від ППР в зоні профілювання при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Час профілювання

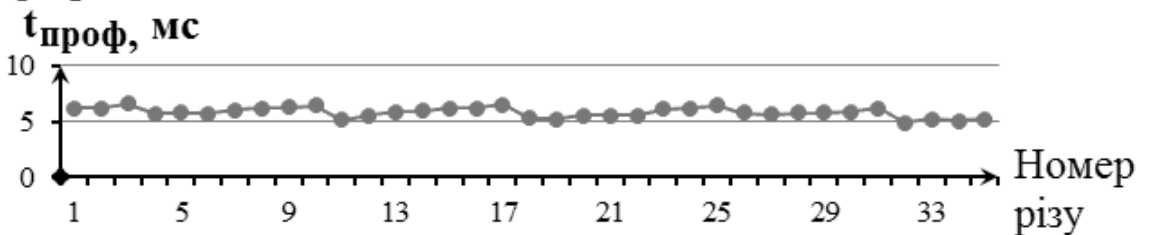


Рисунок 3.17 – Зміна часу профілювання при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні

Хвилястість на обробленій поверхні свідчить про те, що в її формуванні приймають участь характеристики коливань, які мають періодичні зміни. На

підставі цього можна сказати, що не впливають на формоутворення періоди вільних коливань деталі та зубцевої частоти, що мають одне значення і проявляються, коли різання закінчено. Періодична зміна часу холостого хода пов'язана зі зміною часу різання, але холостий хід відбувається після закінчення різання і також не впливає на формоутворення. Мають періодичність зміни, але теж не впливають на формоутворення, логарифмічний декремент, що характеризує демпфуючі властивості оброблюваного матеріалу, та амплітуда першої хвилі вільних коливань після закінчення різання. Ці дві характеристики також проявляються після різання.

Щоб визначитись, які з залишившихся характеристик є впливовими, розглянемо ту частину профілограми, яка формувалася при різанні, коли записувалися БФО, що досліджувались (рис.3.18)

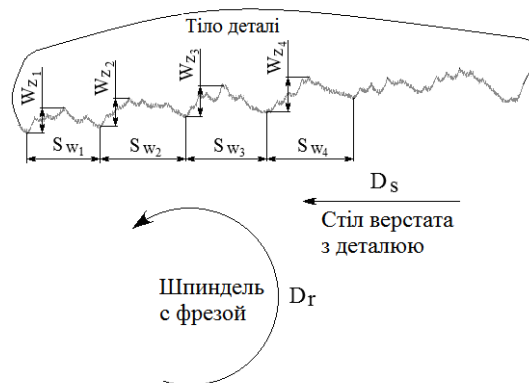


Рисунок – 3.18. Фрагмент профілограми обробленої поверхні після попутного фрезерування з автоколиваннями і напрямки руху інструменту і деталі при цьому

Дана частина складається з чотирьох ділянок, що характеризуються кроком та висотою хвилястості, значення яких записані в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Крок та висота хвилястості обробленої поверхні після попутного кінцевого фрезерування

Номер ділянки	1	2	3	4
Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809	0,92
Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,042	0,048	0,055	0,058

На підставі рис. 3.18 перевіримо, які з залишившихся коливальних характеристик мають чотири періоди змін, що формують хвилястість. Але спочатку відокремимо ті характеристики, що не впливають на формоутворення через іншу періодичність. Це - розмах вільних згасаючих коливань ТЕД перед врізанням інструменту, відхилення деталі від ППР при врізанні зуба фрези, та максимальне відхилення деталі.

Характеристики коливань ТЕД, періодичність змін яких співпадає з періодичністю змін на обробленій поверхні, включають розмах автоколивань, час різання, відхилення деталі від ППР при виході зуба фрези, відхилення деталі від ППР в зоні профілювання, період автоколивань та час профілювання.

Характеристики, що залишилися характеризують поверхні різання за довжиною та висотою. До перших відносяться час різання та час профілювання. При цьому слід зазначити, що поняття «час різання» більше умовне через те, що воно характеризує час контакту інструменту та деталі від врізання і до виходу (рис.1.2). Але при перетині положення пружної рівноваги (ППР) різання вже не відбувається, а йде контакт деталі з задньою поверхнею фрези, що підтверджується зменшенням амплітуди коливання інструменту та перехід автоколивань у вільні коливання деталі (рис.3.19). Тому вважаємо, що у формоутворенні обробленої поверхні приймають участь час профілювання та відхилення деталі від ППР в зоні профілювання. Тобто час профілювання визначає положення зони профілювання, яке визначається останньою хвилею автоколивань.

При цьому від часу профілювання залежить довжина поверхні різання ( $l_{\text{різ}}$ ), яка розраховується за формулою:

$$l_{\text{різ}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{фр}} \cdot n}{60} \cdot t_{\text{проф}}, \quad (3.3)$$

де  $D_{\text{фр}}$  – діаметр фрези, мм;

$n$  – частота обертання фрези, об/хв;

$t_{\text{проф}}$  – час профілювання, с.

Час профілювання періодично змінюється від найменшого значення до найбільшого. Причиною цього є зміни розмаху автоколивань. З їх збільшенням збільшується шлях, який проходить інструмент по деталі. За аналогічною причиною змінюється період автоколивань.

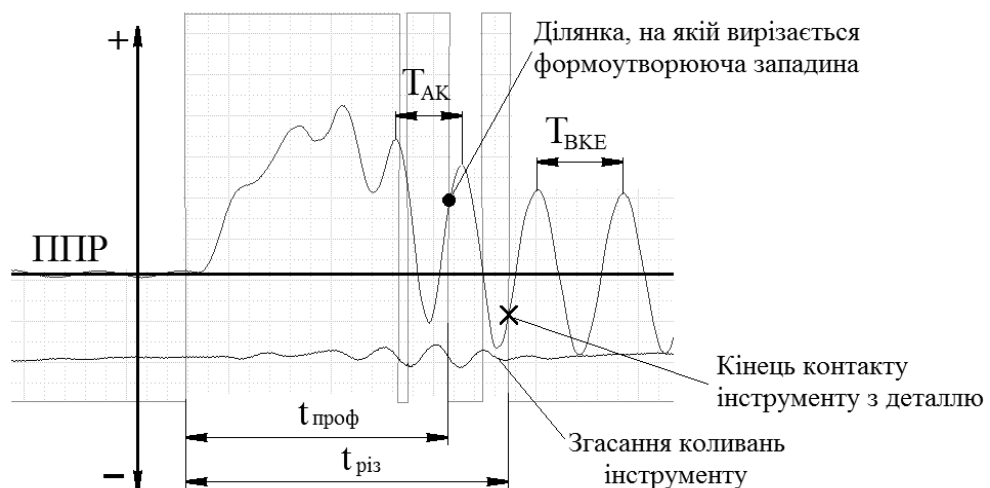


Рисунок 3.19 – Ділянки на БФО, що відповідають формоутворюючій западині на поверхні різання та закінченню контакту інструменту з деталлю

При попутному фрезеруванні, як і при зустрічному, кожне наступне візання інструменту в деталь відбувається після її переміщення на величину подачі на зуб ( $S_z$ ). Але через те, що кожна наступна поверхня різання довша за попередню, западина від неї знаходиться попереду від западини попереднього різку. Така послідовність утворення западин з різним положенням від ППР

періодично повторюється і на обробленій поверхні формується хвилястий профіль. На рис. 3.20 схематично (а) та на фотографії (б) показані поверхні різання та ділянки, що залишаються після руху подачі на обробленій поверхні та формують на ній крок хвилястості.

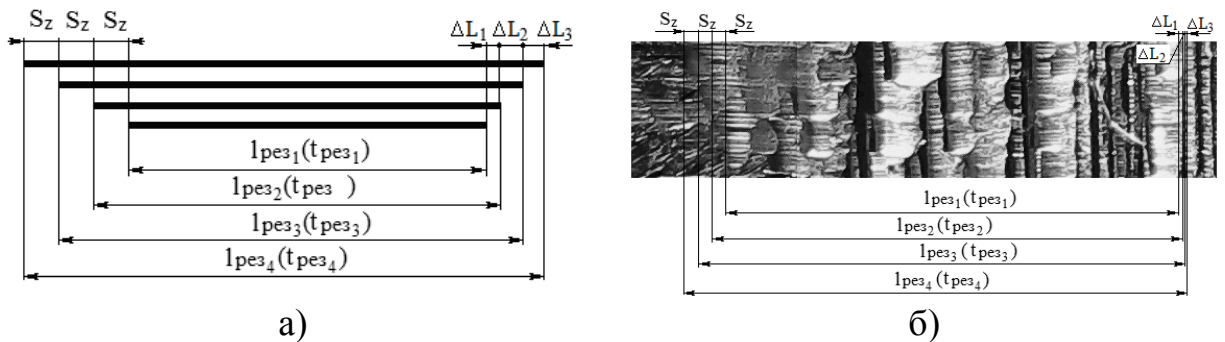


Рисунок – 3.19 Схема (а) та фотографія поверхонь різання (б), які пояснюють вплив часу профілювання на довжину поверхні різання та формування кроку хвилястості на обробленій поверхні

Для теоретичного визначення кроку хвилястості при попутному фрезеруванні використовувались наступні положення. Через те, що довжина поверхні різання періодично змінюється від мінімального значення до максимального, за початок відліку було обрано мінімальний час профілювання. Для нього по формулі (3.3) розраховується мінімальна довжина поверхні різання. При виході з неї інструмент залишає западину, найбільш удалену від ППР. Від мінімальної довжини поверхні різання визначається положення западин наступних різів до найбільш удаленої та ближче розташованої до ППР, яка буде однією з вершин хвилястості. Далі визначається положення наступної поверхні різання з мінімальною довжиною, від якої виконуються побудови, що були описані вище та знаходиться наступна вершина. Відстань між вершинами дорівнює кроку хвилястості ( $S_w$ ) (рис.3.20) та розраховується за формулою

$$S_w = (L_{\max 1} + S_z \cdot N) - L_{\max 2}, \quad (3.4)$$



де  $L_{\max 1}$  и  $L_{\max 2}$  – максимальні довжини поверхонь різання при максимальних часах профілювання, мм;

$S_z$  – подача на зуб, мм;

$N$  – кількість різів зубом фрези між максимальними часами профілювання, с.

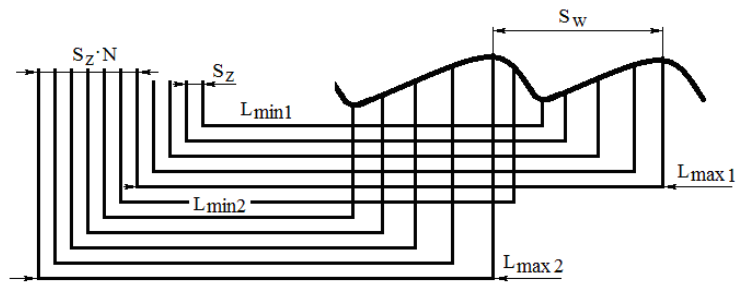


Рисунок 3.20 – Схема визначення кроку хвилястості на обробленій поверхні після попутного фрезерування

В табл. 3.2 наведені значення кроків хвилястості, що визначені по профілограмі та розрахованих за даними додатку А по формулі (3.4)

Таблиця 3.2 – Значення кроків хвилястості на профілограмі та розрахованих по зміні довжини поверхні різання

Номер ділянки	1	2	3	4
Крок хвилястості на профілограмі $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809	0,92
Крок хвилястості розрахований $S_{wi}$ , мм	0,747	0,908	0,771	0,871
Похибка, %	2,7	0,7	4,69	5,33

Значення кроків для однойменних ділянок на профілограмі та побудованих за значеннями з БФО, що наведені в табл. 3.2, мають близькі значення з похибкою в межах 6%. На підставі цього можна вважати, що крок хвилястості залежить від зміни довжини поверхні різання, що визначається часом профілювання.

Висота хвилястості утворюється западинами, що мають різну відстань до ППР. Періодичність зміни часу профілювання співпадає з періодичністю змін відхилення ТЕД в зоні профілювання, яке також змінює своє значення від максимального до мінімального. Тому можна припустити, що хвилястість на обробленій поверхні утворюється через різні значення цього відхилення. Тоді висота хвилястості по БФО визначається для кожного періоду як різниця між найбільшим та найменшим значенням  $\Delta_{\text{проф}}$  на цій ділянці за формулою.

$$\delta = \Delta_{\text{профmax}} - \Delta_{\text{профmin}}, \quad (3.5)$$

де  $\delta$  – висота хвилястості, що визначається за БФО, мм.

Для порівняння з висотою хвилястості, що визначається по профілограмі, з урахуванням обмеження наконечника пристрою запису профілограм, висота, що визначається за БФО, розраховується за формулою

$$W_{zi} = -17,387 \cdot \delta^2 + 2,9825 \cdot \delta - 0,071. \quad (3.6)$$

В таблиці 3.3 наведені значення висот, що визначені по профілограмі обробленої поверхні та розраховані по формулі (3.6).

Таблиця 3.3 – Значення висоти хвилястості, що виміряна на профілограмі, та розрахованої по формулі (3.5)

Номер ділянки	1	2	3	4
Висота хвилястості, що виміряна по профілограмі $W_{zip}$ , мм	0,040	0,048	0,052	0,055
Висота хвилястості, що розрахована по формулі $W_{zip}$ , мм	0,034	0,053	0,048	0,050
Похибка, %	15,0	9,4	7,7	9,0

Величина похибки між висотою хвилястості на профілограмі та розрахованої по значенням  $\Delta_{\text{проф}}$  не перевищує 15%.

На рис.3.21 показана модель обробленої поверхні, що побудована по значенням  $\Delta_{\text{проф}}$ , які визначалися за БФО, у порядку розташування точок

відповідно послідовності западинам, що вирізаються, але без врахування відстані між западинами.

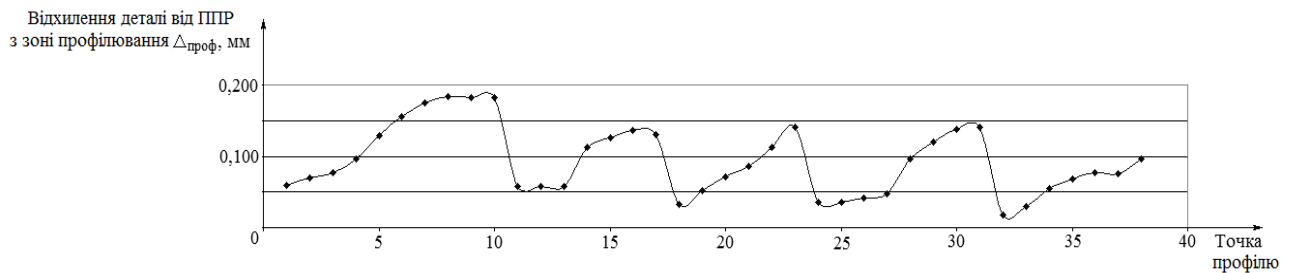


Рисунок 3.21 – Модель обробленої поверхні, що побудована по значенням  $\Delta_{\text{проф}}$ , які визначені по БФО.

На підставі виконаних досліджень визначено, що з 14 характеристик коливального руху деталі при різанні тільки чотири визначають крок та висоту хвилястості обробленої поверхні. Це – розмах автоколивань, час профілювання, відхилення деталі від ППР в зоні профілювання та період автоколивань.

### 3.2. Дослідження впливу частот обертання шпинделя на характеристики коливань та формування профілю обробленої поверхні

Дослідження проводилися з режимами різання, що наведені в п.2.5. За їх результатами для кожної частоти обертання шпинделя записано осцилограми під час фрезерування та профілограми оброблених поверхонь зразків. Для аналізу було розглянуто БФО, характеристики яких формують перші ділянки хвилястості на обробленій поверхні.

#### 3.2.1 Дослідження впливу частот обертання шпинделя на характеристики коливань

У зв'язку з тим, що на формування хвилястого профілю обробленої поверхні при попутному фрезеруванні в умовах дії автоколивань впливають

розмах автоколивань, час профілювання та відхилення деталі від ППР в зоні профілювання тому по БФО визначались значення саме цих характеристик, а також період автоколивань. Їх величини записані у додатках Б – Ж.

На їх підставі побудовані графіки на рис.3.22 – 3.26.

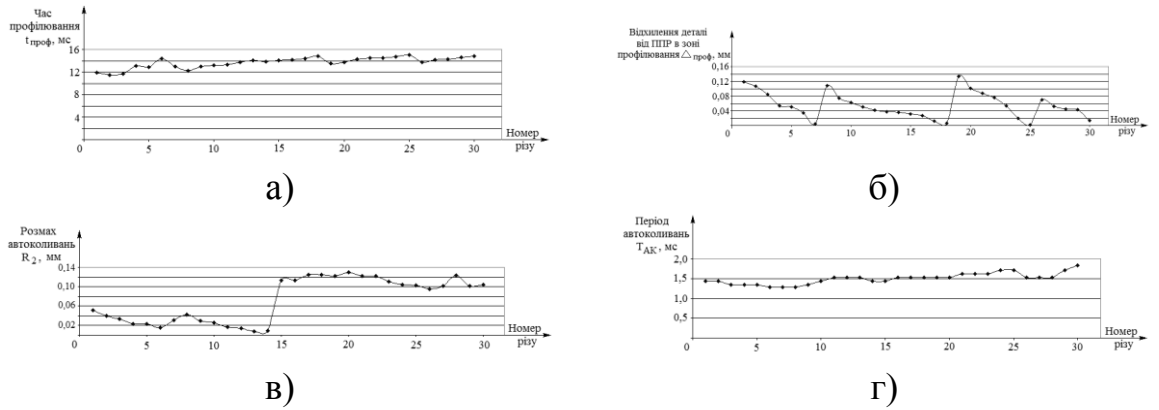


Рисунок 3.22 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 180 об/хв: а) часу профілювання; б) відхилення від ППР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань

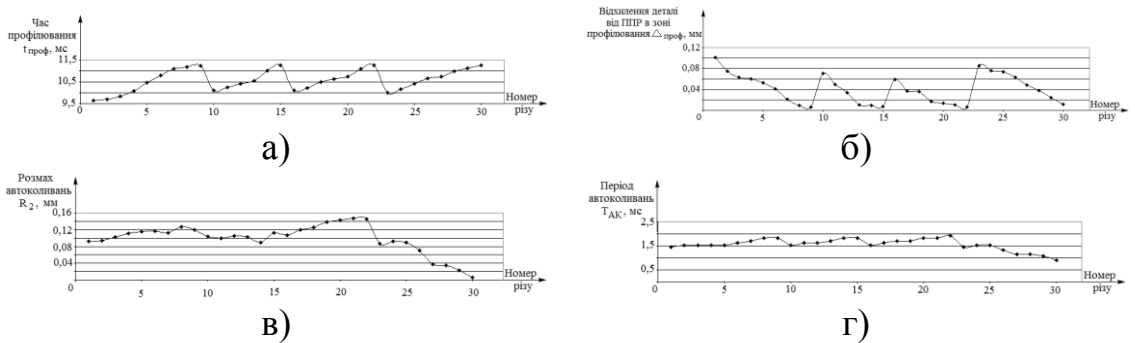


Рисунок 3.23 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 224 об/хв: а) часу профілювання; б) відхилення від ППР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань

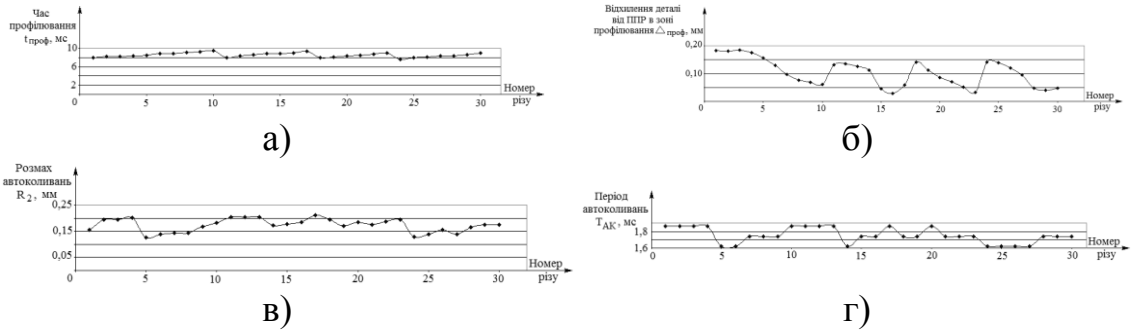


Рисунок 3.24 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 280 об/хв а) часу профілювання; б) відхилення від ППР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань

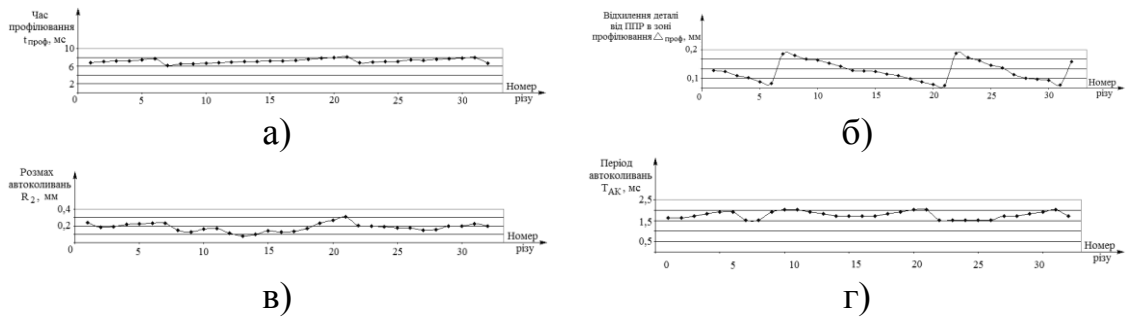


Рисунок 3.25 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 355 об/хв: а) часу профілювання; б) відхилення від ППР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань

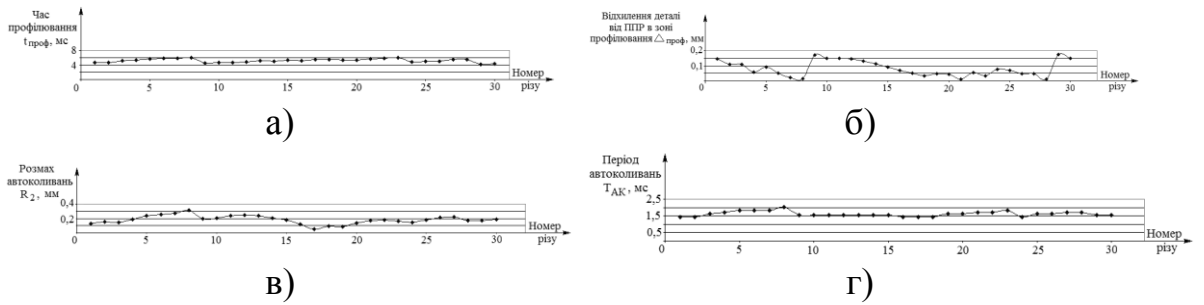


Рисунок 3.26 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 450 об/хв: а) часу профілювання; б) відхилення від ПТР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань

Графіки на рис. 3.22 – 3.26 мають спільні закономірності щодо змін формоутворюючих характеристик. Періодично змінюються час профілювання, відхилення деталі в зоні профілювання, розмах автоколивань, має періодичну зміну і період автоколивань.

Для більш детального визначення впливу частот обертання шпинделя на формоутворюючі характеристики коливань деталі при фрезеруванні побудовані графіки за середніми значеннями величин характеристик, що представлені на рис. 3.27-3.30.

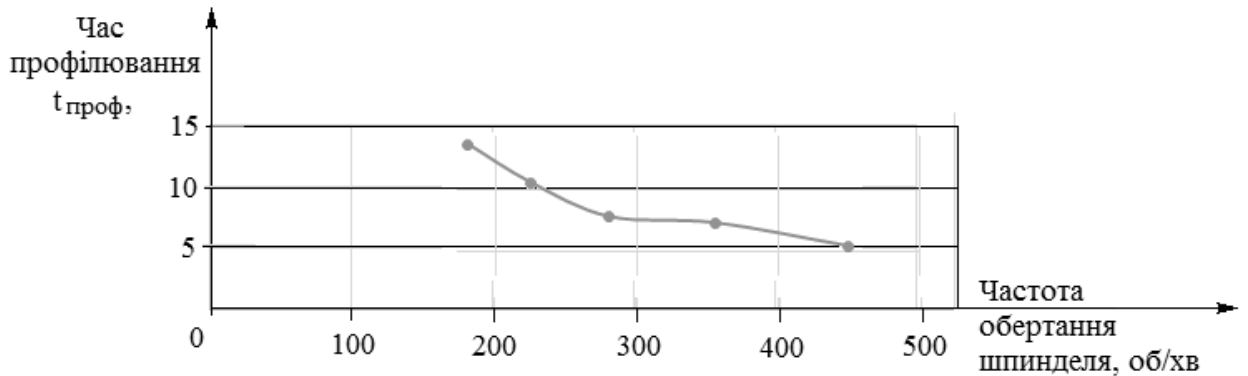


Рисунок 3.27 – Залежність часу профілювання від частоти обертання шпинделя

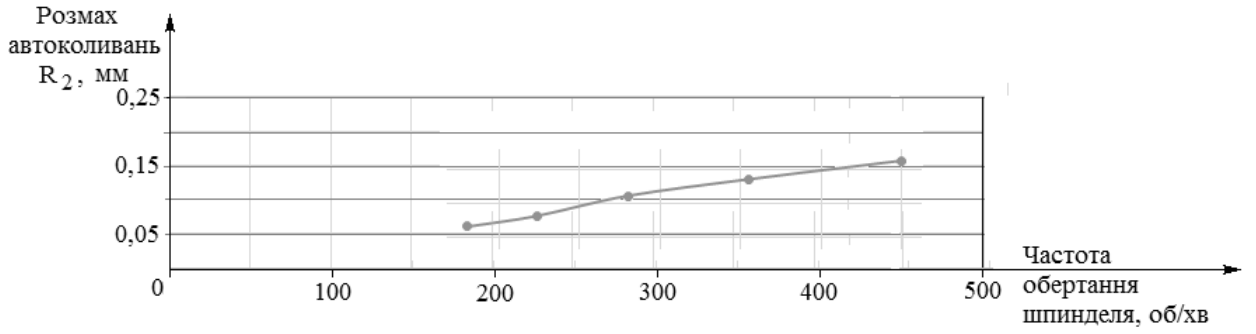


Рисунок 3.28 – Залежність розмаху автоколивань від частоти обертання шпинделя

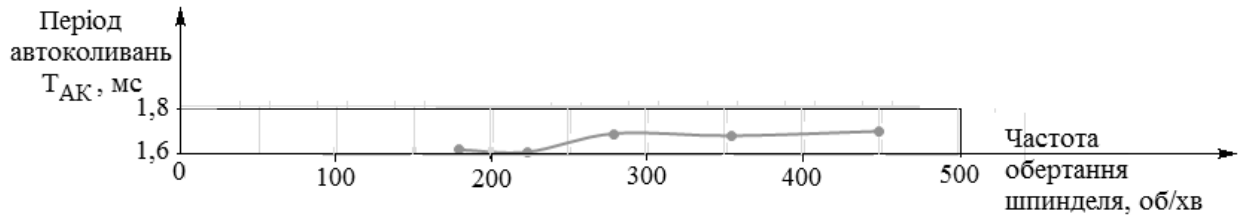


Рисунок 3.29 – Залежність періоду автоколивань від частоти обертання шпинделя

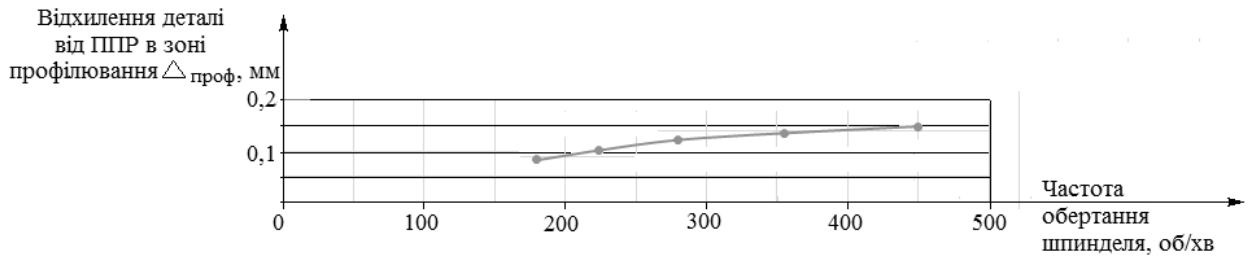


Рисунок 3.30 – Залежність відхилення в зоні профілювання від частоти обертання шпинделя

Залежності на графіках вказують на те, що з підвищенням частоти обертання шпинделя час профілювання зменшується, розмах автоколивань та найбільші відхилення деталі від ППР в зоні профілювання збільшуються, а період автоколивань практично мало змінюється. При цьому слід зауважити, що довжина поверхні різання умовно постійна і зменшення часу профілювання

пов'язано зі збільшенням швидкості різання. Тобто можна зазначити, динамічний вплив частоти обертання шпинделя призводить до збільшення коливальних характеристик деталі при фрезеруванні.

### 3.2.2 Дослідження впливу частот обертання шпинделя на формування профілю обробленої поверхні

Після фрезерування за допомогою спеціального пристрою було записано профілограми поверхонь, оброблених при різній частоті обертання шпинделя (рис. 3.31).

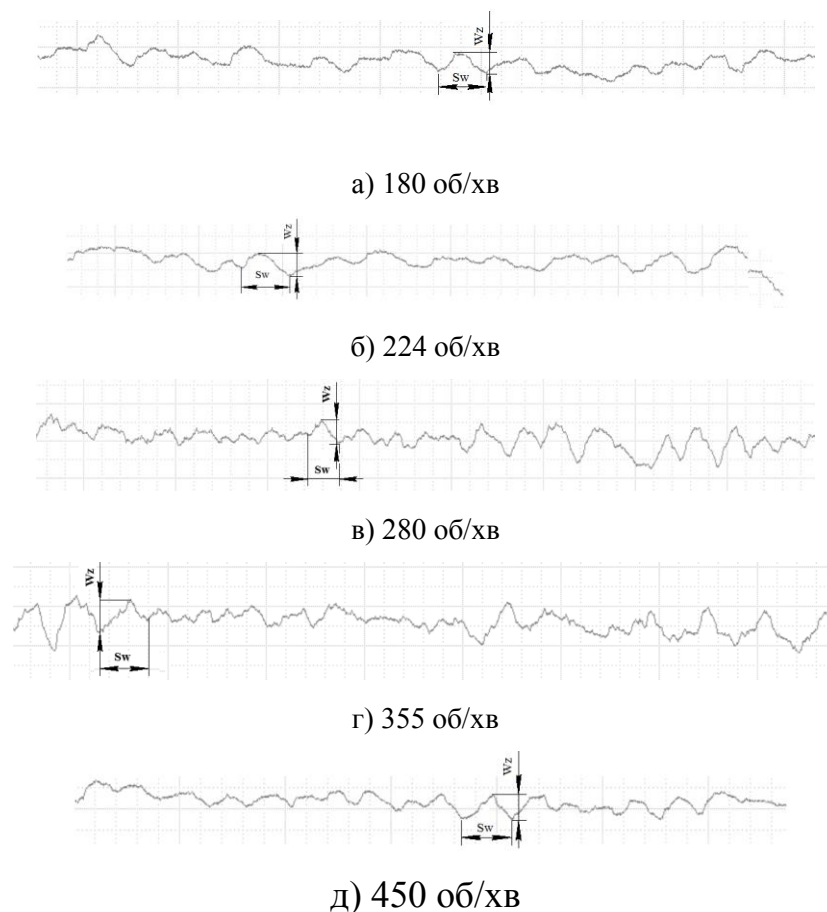


Рисунок 3.31 - Фрагменти профілограм оброблених поверхонь після попутного кінцевого фрезерування при різних частотах обертання шпинделя



Для визначення кроку -  $S_w$  і висоти хвилястості -  $W_z$  обробленої поверхні були отримані формули, що переводять розмірності координатних осей, за якими записувалася профілограма в програмі PowerGraph, в розмірність кроку і висоти. Крок хвилястості на профілограмі розраховувався за формулою:

$$S_w = t \cdot v, \quad (3.7)$$

де  $t$  - час запису сигналу між однойменними виступами на обробленій поверхні, с;

$v$  - швидкість запису сигналу, яка визначається подачею стола верстата, мм/с.

Для отримання профілограми, наочної для виконання вимірювань та аналізу, була обрана швидкість руху стола 0,64 мм/с.

Висота хвилястості на профілограмі розраховувалася за формулою:

$$W_z = k \cdot V, \quad (3.8)$$

де  $k$  - тарировальне значення для використаного при записі профілограми індуктивного проксиметра XS1M18AB120, мм / В;

$V$  - найбільше відхилення записаного сигналу від положення пружної рівноваги, В.

Значення кроку і висоти хвилястості, що розраховувалися за формулами (3.7) і (3.8) для фрагментів профілограм, показаних на рис 3.31, записані в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Крок та висота хвилястості на поверхнях, що фрезерувались з різними частотами обертання шпинделя

Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,78	0,74	0,75
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,08	0,076	0,064
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,79	0,75	0,84
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,082	0,061	0,045
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,040	0,048	0,052
355	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,19	1,23	1,17
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,105	0,065	0,076
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,7	1,18	1,47
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,15	0,072	0,14

На підставі даних БФО, що наведені в додатках Б-Ж за формулами (3.4) та (3.6) були розраховані крок та висота хвилястості, наведені в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Крок та висота хвилястості, розраховані за формулами хвилястості обробленої поверхні з розрахованим кроком

Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,77	0,69	0,7
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,084	0,07	0,065
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,71	0,7	0,76
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,08	0,064	0,049
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,042	0,05	0,06
355	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,107	1,17	1,105
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,107	0,06	0,067
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,5	1,07	1,33
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,138	0,065	0,142

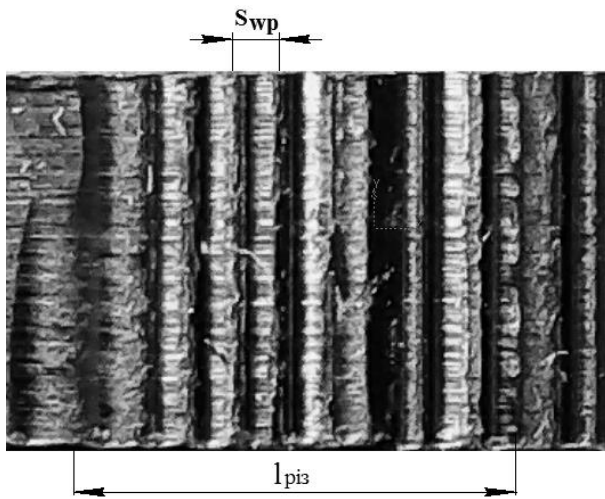
У таблиці 3.6 наведені значення похибок розрахунків кроку та висоти хвилястості

Таблиця 3.6 – Похибки розрахунків кроків та висот хвилястості, %

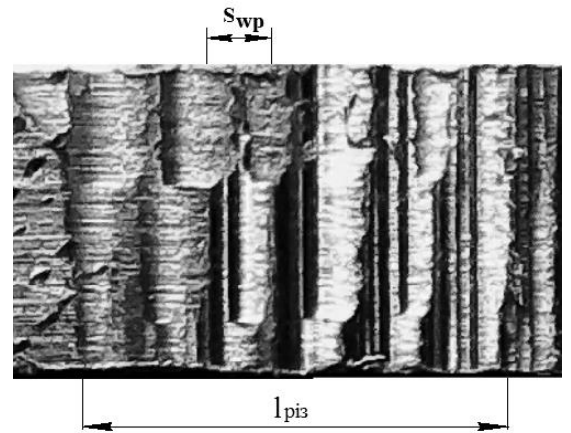
Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,2	6,7	6,6
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	4,7	7,8	1,6
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	10,1	6,6	9,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	2,4	4,7	8,2
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0	0	0
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	11,1	4	13,3
355в	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	6,7	4,9	5,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	2	7,7	11,8
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	11,8	9,3	9,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	8	9,7	1,4

Використання формул для розрахунку кроку і висоти дозволяє отримувати результати з похибкою, яка не перевищує 14%.

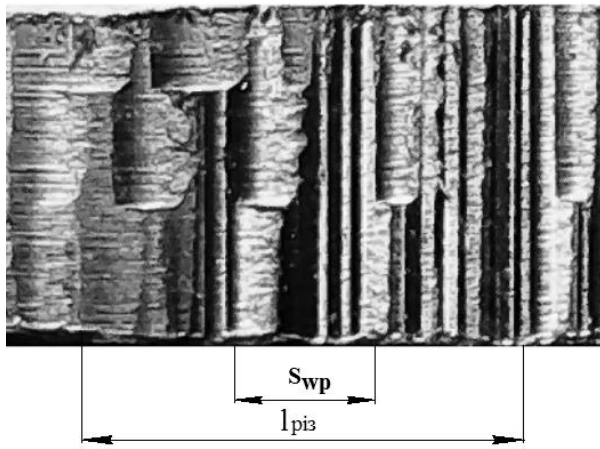
У роботі [24] доведено що при зустрічному фрезеруванні зі збільшенням частоти обертання шпинделя період автоколивань практично не змінюється, але крок хвилястості на поверхні різання збільшується. Збільшення кроку хвилястості на поверхні різання, впливає на збільшення кроку хвилястості обробленої поверхні. Для перевірки того, яким чином змінюється крок хвилястості на поверхні різання при попутному фрезеруванні, розглянемо фото поверхні різання (рис 3.32)



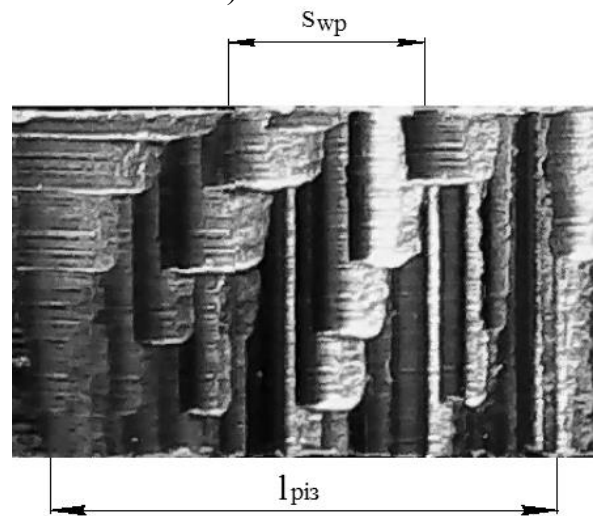
а) 180 об/хв



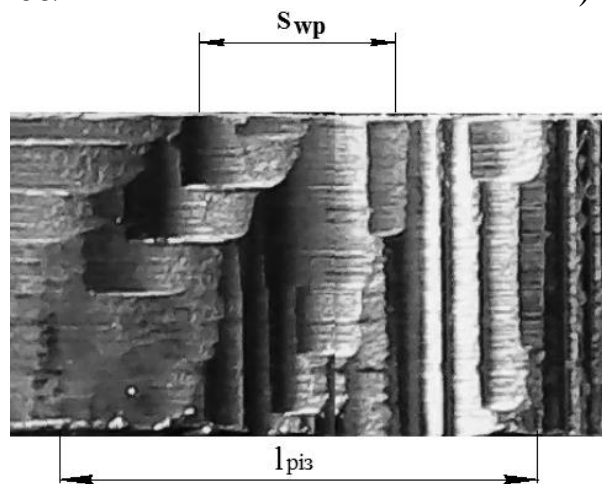
б) 224 об/хв



в) 280 об/хв



г) 355 об/хв



д) 450 об/хв

Рисунок 3.32 – Фото поверхонь різання після фрезерування з різними частотами обертання шпинделя

З фото на рис.3.32 видно, що при попутному фрезеруванні, як і зустрічному, зі збільшенням частоти обертання шпинделя збільшується крок хвилястості  $S_{wp}$  на поверхні різання. Саме ширина основи хвилі на поверхні різання визначає скільки різів потрібно зробити, щоб її зрізати, а від цього залежить крок хвилястості на обробленій поверхні.

### 3.3 Висновки

1. Досліджено 14 коливальних характеристик за якими описується закон руху деталі при фрезеруванні.

2. Визначено, що на формоутворення з 14 параметрів впливає 4: час профілювання, період автоколивань, розмах автоколивань та відхилення деталі від ППР в зоні профілювання

3. Досліджено зміни формотворчих параметрів при змінні частоти обертання шпинделя. Час різання  $t_{різ}$  зменшується, період автоколивань  $T_{AK}$  залишається незмінним з близькими значеннями,  $\Delta_{проф}$  збільшується.

4. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шпинделя при незмінному періоді автоколивань  $T_{AK}$  крок хвилястості на поверхні різання збільшується. Для видалення виступу з поверхні різання – збільшується кількість необхідних різів зубом фрези, що впливає на крок хвилястості обробленої поверхні. Тобто зі збільшенням частоти обертання шпинделя крок хвилястості на обробленій поверхні теж збільшується. Зі збільшенням частоти обертання шпинделя збільшується розмах автоколивань, що впливає на збільшення відхилення деталі від ППР в зоні профілювання і приводить до збільшення висоти хвилястості на обробленій поверхні.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Магістерська робота «Дослідження впливу частоти обертання шпинделя на коливання тонкостінної деталі при попутному фрезеруванні та якість обробленої поверхні» досліди проводяться на універсальному фрезерному верстаті FWD-32J, а також для здійснення запису експериментів під час процесу фрезерування тонкостінних елементів деталей, обробки, аналізу та обчислення отриманих даних використовуються персонально електронно-обчислювальні машини (ПК). Для усунення ризиків травматизму, нещасних випадків та створення безпечних умов роботи необхідно дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи на металорізальному обладнанні та за ПК. В даному розділі пояснювальної записки наведений аналіз потенційно небезпечних факторів, що характеризують умови роботи, заходи з забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, а також пожежної безпеки. Крім вище зазначених питань, розглянуто заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях, а саме: організація дослідження стійкості роботи промислового об'єкта [18].

### 4.1 Аналіз потенційних небезпек

В наш час є велике різноманіття металорізальних верстатів, робота за якими потребує ретельного дотримання правил експлуатації, від чого залежить безпека роботи, робітника та його оточення.

При роботі на фрезерних верстатах існують наступні потенційні небезпеки фізичного характеру:

- руйнування ріжучого інструменту внаслідок порушення режимів різання, технологічного процесу може призвести до отримання травм різного ступеню важкості робітником або оточуючих людей через загрозу вильоту зруйнованих частин інструменту або деталі з робочої зони;

– при контакті робітника з поверхнями обладнання, оброблюваної деталі або стружки без захисних рукавиць, які мають підвищену температуру існує ймовірність пошкодження шкіряного покриву;

– під час контакту робітника з гострими кромками, шорсткістю та задирками існує ймовірність механічних травм;

– ураження електричним струмом у зв'язку з невиконанням правил техніки безпеки при користуванні електричним обладнанням, відсутності захисного заземлення;

– існує ймовірність захвату одягу чи волосся робітника при контакті с рухомими частинами фрезерного верстата (шпиндель, стіл), що може призвести до отримання травм різної ступені тяжкості.

До потенційних небезпек санітарно-гігієнічного характеру відносяться:

– підвищений рівень шуму на робочому місці при роботі обладнання, призводить до розвитку втоми, роздратованості та зниженню уваги;

– запиленість повітря пилом та парами рідин, що виникають при випаровуванні мастил та змащувально-охолоджуючих рідин призводить до подразнення слизових оболонок дихальних шляхів, що може викликати алергічні захворювання;

– підвищений рівень вібрації обладнання призводить до погіршення чутливості та може стати причиною розвитку віброхвороби, а також спостерігається порушення діяльності центральної нервової системи;

– недостатня освітленість робочого місця може призвести до погіршення зору і появи ризику отримання травми, а також до розвитку професійних захворювань.

До потенційних небезпек, що пов'язані з порушеннями правил пожежної безпеки насамперед можна віднести ймовірність виникнення загорання у зв'язку із-за несправності електрообладнання, короткого замикання, недотримання або порушення правил безпеки обслуговуючим персоналом, може призвести до розповсюдження пожежі.

Робота за ПК пов'язана з впливом великої кількості психофізичних факторів, що впливають на людину:

- тривала робота в нерухомому положенні, призводить до перенапруження м'язів спини та ніг, що в свою чергу, викликає болі в спині, шийному відділі хребта та руках та може стати передумовою для виникнення захворювань опорно-рухового апарату.

- робота за моніторами має негативний вплив обумовлений електричними полями та електромагнітними випромінюваннями, що може призвести до зниження імунітету, бронхолегеневих та шкірних захворювань.

- монотонність праці, може привести до гальмування реакцій не тільки під час праці, але і після неї;

- тривала робота на ПК при незадовільному освітлені виробничих приміщень може привести до зорової втоми, зниженню здатності розрізняти об'єкти, роздратованості;

- існує ймовірність виникнення надзвичайної ситуації для робітників, майна, приміщень та оточуючого середовища і насамперед може порушити умови життєдіяльності людей та призвести до людських жертв.

#### 4.2 Заходи з забезпечення техніки безпеки

Щоб уникнути механічних та електричних травм під час роботи за обладнанням передбачені заходи по проведенню навчання, перевірки знань з питань охорони праці, надання першої медичної допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Для забезпечення безпеки при проведенні дослідів використовується обладнання, що відповідає ДСТУ ГОСТ 12.2.061:2009 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».



Робітники повинні дотримуватися правил безпеки при роботі згідно НПАОП 0.00-1.30-01 «Правила безпечної роботи з інструментом і пристроями». Відповідальність за дотримання справного стану і безпечну експлуатацію металорізального верстату покладається на керівника підрозділу, за яким закріплений верстат.

Для уникнення можливих травм при контакті з руховими частинами обладнання потрібно відповідати ДСТУ EN ISO 14119:2017 «Безпечність машин. Блокувальні пристрої, з'єднані з огорожами. Принципи проектування та вибору».

При проектуванні та експлуатації технологічного обладнання необхідно передбачати застосування пристроїв, які виключають імовірність контакту людини з небезпечною зоною, або знижують небезпеку контакту (засоби захисту робітників).

Для уникнення травм внаслідок руйнування інструменту необхідно працювати тільки з огороженим інструментом. При проведенні розрахунків на міцність огорож, необхідно враховувати ймовірність вильоту та удару об огорожу заготовок і ріжучого інструменту.

Перед початком роботи потрібно перевірити справність обладнання, гальмівних пристроїв на холостому ході, а також перевірити на справність та наявність дефектів ріжучий інструмент та засоби для закріплення деталей для уникнення ймовірності їх вильоту внаслідок недостатнього закріплення. Не допускати при роботі різних змін режимів різання для того, щоб уникнути можливості руйнування інструменту або порушення закріплення деталі.

Засоби індивідуального захисту повинні бути передбачені згідно ДСТУ 7239:2011 «ССБП. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація».

Відстань від проходу до фронтальної частини фрезерного верстата повинна становити 1 м, до бокової та тильної сторони 0,5 м. Ширина проходів складає 1,4 м, зона робітника приймається рівною 0,8 м.

Розташування обладнання з точки зору безпеки та ергономіки повинно бути згідно ДСТУ EN ISO 894-3:2017 «Безпечність машин. Ергономічні вимоги до проектування індикаторів і органів керування. Частина 3. Органи керування».

Робітник повинен утримувати робоче місце в чистоті, не захаращувати його деталями, металевими відходами, сміттям. Під час роботи не вживати алкогольні напої, дотримуватися вимог санітарних норм та правил особистої гігієни.

Для здійснення безпечної, безаварійної та високопродуктивної роботи електроустановок необхідно правильно організовувати їх експлуатацію для уникнення можливості помилок зі сторони обслуговуючого персоналу.

Для усунення ймовірності ураження електричним струмом в лабораторії з електрообладнанням, що здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц, відповідно до вимог «ПУЕ», електрообладнання в приміщенні з ПК, характеризується як електроустановки до 1000 В, передбачаються організаційні та технічні заходи. До технічних заходів відноситься захисне заземлення, що передбачається згідно вимог глави 1.7 «ПУЕ», величина опору контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з ПК у будь-яку пору року не перевищує – 4 Ом.

До організаційних відносять проведення навчання правилам електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці».

Для вчасного запобігання, вияву та лікування захворювань необхідно регулярно та своєчасно проходити медогляди.

Найбільшою небезпекою та загрозою життю людини при роботі за ПК є ймовірність ураження електричним струмом. Використовувана техніка повинна відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом».

Для безпечної експлуатації обладнання застосовується захисне заземлення зі значенням опору заземлення  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ .

Робота за ПК повинна проводитись згідно НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійних захворювань та підтримки працездатності слід дотримуватись санітарних правил і норм роботи згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Працюючі з ВДТ і ЕОМ підлягають обов'язковим медичним оглядам: попереднім – при влаштуванні на роботу і періодичним – протягом трудової діяльності відповідно до наказу міністерства охорони здоров'я України від 21 травня 2007р. №246 «Про затвердження порядку проведення медичного огляду працівників певних категорій».

Періодичні медичні огляди мають проводитися раз на два роки комісією в складі: терапевта, невропатолога та офтальмолога, жінки обов'язково оглядаються лікарем акушером-гінекологом. До складу комісії, що проводить попередні та періодичні медичні огляди, при необхідності (за наявністю медичних показань) можуть залучатись до оглядів лікарів інших спеціальностей.

Основними критеріями оцінки придатності до роботи з ВДТ і ЕОМ мають бути показники стану органів зору: гострота зору, показники рефракції, акомодатії, стану бінокулярного апарату ока тощо. При цьому необхідно враховувати також стан організму в цілому.

Жінки з часу встановлення вагітності та в період годування дитини грудьми до виконання всіх робіт, пов'язаних з використанням ВДТ та ЕОМ, не допускаються.

Приміщення для роботи з ВДТ та ЕОМ повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення».

Природне освітлення має здійснюватись через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ чи північний схід і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче ніж 1,5 %.

Як джерела світла в разі штучного освітлення мають застосовуватись переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ. У разі влаштування відбитого освітлення у виробничих та адміністративно-громадських приміщеннях допускається застосування металогалогенних ламп потужністю 250 Вт. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення.

Яскравість світильників загального освітлення в зоні кутів випромінювання від 50 до 90 град. з вертикаллю в повздовжній та поперечній площинах має становити не більше ніж 200 кд/кв. м, захисний кут світильників - не менше ніж 40 град.

Під час роботи з ПК потрібно робити перерви на відпочинок тривалістю 15 хвилин через кожну годину роботи, а у випадках, коли обставини не дозволяють застосовувати перерви тривалість безперервної роботи не повинна перевищувати 4 годин.

#### 4.3 Заходи з забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці

Загальні санітарно-гігієнічні показники повітря в приміщенні при роботі за верстатом повинні відповідати ГОСТ 12.1.005-88. «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Оптимальні значення температури в холодну пору року при проведенні дослідницької роботи за фрезерним верстатом 18-20° С, в теплу пору року 21-23° С та мати відносну вологість 40-60%, швидкість руху повітря в робочій зоні приміщення повинна бути не більше 0,2 м/с.

Для запобігання запиленості та загазованості приміщення пилом і парами речовин, що утворюються при випаровуванні змащувально-охолоджуючих рідин та мастил необхідно передбачити вентиляційні системи, які повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». Вентиляційні системи також повинні відповідати загальним вимогам ДСТУ Б А.3.2-12:2009 «Система стандартів безпеки праці. Системи вентиляційні. Загальні вимоги».

Рівень шуму кімнати в лабораторії не повинен перевищувати 65 дБ згідно ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

При організації робочого місця необхідно приймати всі необхідні заходи для зменшення шуму, який впливає на людину на робочих місцях до значень, котрі не перевищують допустимі. Це досягається за рахунок розробки, застосування засобів і методів колективного та індивідуального захисту, використання сучасної техніки з більш меншим виділенням шуму, а також це повинно враховуватись при проектуванні підприємств, будівель та споруд різного призначення.

Оцінку впливу рівня вібрацій необхідно проводити за ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину».

Необхідно дотримуватися санітарних норм при роботі з наявністю вібрацій згідно ДСН 3.3.6.039-99. «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрацій». При роботі, яка супроводжується вібраціями необхідно робити перерву через кожні 10-15 хвилин роботи. Потрібно зменшувати вібрації за рахунок застосувань конструктивних і технологічних методів, застосовувати засоби віброізоляції та вібропоглинання, своєчасно проводити плановий та попереджувальний ремонт обладнання. Потрібно застосовувати заходи лікувально-профілактичного характеру: професійні та профілактичні огляди, вітамінізація, лікувальні гімнастика та масаж рук. Для профілактичного лікування та відпочинку працюючих повинні бути

організовані профілакторії та кабінети і кімнати, де проводять масаж рук у струмені теплого повітря або сухий обігрів та мікромасаж на спеціальному обладнанні.

При проведенні робіт за металорізальним обладнанням необхідно застосовувати систему комбінованого освітлення. Освітленість при роботі за фрезерним верстатом в зоні обробки повинна бути не менше 2 000 лк, що досягається за рахунок місцевого освітлення, яке передбачається конструкцією обладнання. Вимоги природного та штучного освітлення в приміщеннях повинні виконуватись згідно ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення».

Приміщення повинні мати природне та штучне освітлення. Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300-500 лк, якщо ці значення неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення. Штучне освітлення – освітлення будинків, приміщень, споруд та створення зовнішнього освітлення за допомогою спеціальних електроосвітлювальних установок – світильників. Система загального освітлення призначена для освітлення всього приміщення.

Правильно спроектоване та виконане освітлення забезпечує можливість нормальної діяльності, зберігає зір людини, стан його центральної нервової системи. В значній мірі від умов освітленості залежить безпека та продуктивність праці.

#### 4.4 Заходи з пожежної безпеки

Пожежі представляють собою велику загрозу життю та здоров'ю працівників та можуть призвести до величезних матеріальних збитків. Питання забезпечення пожежної безпеки будівель і споруд має велике значення та регламентується спеціальними державними постановами і рішеннями. Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі і системою

пожежного захисту згідно НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Ці правила встановлюють загальні вимоги з пожежної безпеки до будівель, обладнання, майна.

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)» у приміщенні дослідницької лабораторії, обладнаному ПК з ВДТ можлива пожежа класу – А (пожежа, що супроводжується горінням твердих матеріалів) та Е (горіння електроустановок, що перебувають під напругою до 1000 В);

Причинами пожежі можуть бути: несправність електрообладнання (коротке замикання, перевантаження); тривале перевантаження двигунів, приводів; порушення ізоляції, потрапляння іскор або стружки з високою температурою на легкозаймисті матеріали або спецодяг.

Оскільки приміщення дослідницької лабораторії, обладнане ПК з ВДТ належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнестійкості.

У разі виникнення пожежі у приміщенні для евакуації персоналу відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» передбачені виходи, по обидві сторони приміщення, з одного боку вікно (на пожежні сходи), а з іншого – вхідні двері. Згідно п. 2.29 (табл. 2) СНиП 2.09.02-85\* «Производственные здания», відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу не обмежується.

Згідно вимог ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», в приміщенні (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, офісу, тощо) обладнаному ПК з ВДТ встановлена система пожежної й охоронної сигналізації

«Сигнал-ВК6». Яка забезпечує виявлення теплових і димових ознак пожежі і місця виникнення пожежі з точністю до місця розміщення датчика.

Рекомендується для даної категорії приміщення і класу пожежі оснащувати приміщення порошковими вогнегасниками місткістю 5л в кількості 1 шт згідно «Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників», затверджені наказом МВСУ 15.01.2018 № 25 та зареєстровані в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677. При чому гранична захищувана площа складає 900 м<sup>2</sup>, що більш ніж достатньо для приміщення площею 36 м<sup>2</sup> в якому проводяться науково-дослідницькі роботи. В порошкових вогнегасниках джерелом гасіння є сухий порошок. Призначаються для гасіння твердих, рідких та газоподібних речовин, а також для матеріалів, які тліють. Рекомендуються для гасіння електроустановок з напругою до 1000 В. Зберігати потрібно у вертикальному стані в легкодоступному місці, захищеному від прямих сонячних променів і далеко від нагрівальних приладів.

#### 4.5 Безпечність при виконанні фрезерних робіт на верстаті FWD-32J

При роботі на фрезерних верстатах травми верстатнику можуть бути нанесені фрезою, стружкою, оброблюваної деталлю і пристосуванням для її закріплення. Поранення фрезою може статися головним чином під час її обертання, при відсутності пристроїв, що обгороджують фрезу, і порушенні правил експлуатації верстата. Так, іноді фрезерувальник вимірює деталь під час роботи верстата або видаляє з-під фрези стружку руками і випадковими предметами. Нещасні випадки можуть статися при закріпленні деталі або при знятті її з верстата, коли руки робочого знаходяться поблизу неогородженої фрези.

Для попередження порізів рук необхідно огороджувати фрезу, користуватися спеціальною незношених щіткою для видалення з верстата стружки, а також не виміряти деталь поблизу відкритої фрези.



На відміну від точінні при фрезеруванні будь-яких матеріалів утворюються дрібні елементи стружки різної форми. При сучасних режимах стружка має високу температуру, може травмувати очі і привести до опіку відкритих частин тіла. Необхідно використовувати огорожі, що перешкоджають попаданню стружки в бік робочого місця.

При фрезеруванні крихких металів і неметалевих матеріалів важливу роль відіграє знепилювання робочої зони, застосування пилестружкоприймачів. Використовуючи останні, значно скорочується допоміжний час, тому що при цьому відпадає необхідність очищення верстата і робочого місця від стружки і пилу.

При роботі на фрезерних верстатах необхідно дотримуватися наступних правил безпеки.

1. Оброблювану деталь підводити до фрези плавно, після того як фреза отримає робоче обертання.
2. Не збільшувати швидкість і глибину різання без дозволу майстра.
3. При установці важких деталей і ділильної головки застосовувати підйомні пристрої.
4. Застосовувати захисне огороження (екрани). У тому випадку, якщо відсутня огорожа робочої зони, працювати в захисних окулярах.
5. Перед включенням електродвигуна вимкнути (поставити в нейтральне положення) всі важелі управління.
6. При зміні інструменту, установці і знятті пристосувань, прибирання, чищення і змащення верстата обов'язково вимкнути електродвигун.
7. Перед установкою на верстат пристосувань очистити від стружки і масла базові і кріпильні поверхні для забезпечення правильної установки і міцності кріплення.
8. При фрезеруванні не вводити руки в небезпечну зону обертання фрези.
9. При зніманні фрези з шпинделя користуватися спеціальною оснасткою, не підтримувати її незахищеною рукою - застосовувати для цього рукавицю або еластичну прокладку.

10. Під час роботи верстата не відкривати і не знімати огороження і запобіжні пристрої.

11. Зупиняючи верстат, вимкнути подачу, відвести заготовку від фрези і вимкнути обертання шпинделя.

12. Дотримуватися порядок і чистоту на робочому місці. Після закінчення роботи прибрати стружку, протерти поверхні, що труться і змастити, перемістити поздовжній стіл, санчата і консоль в середнє положення [19].

#### 4.6 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

##### 4.6.1 Організація дослідження стійкості роботи промислового об'єкта

Для оцінки стану стійкості роботи об'єкта промисловості проводиться спеціальне дослідження. Воно зводиться до всебічного вивчення умов, які можуть виникнути в різних надзвичайних ситуаціях, і у визначенні їх впливу на виробничу діяльність.

Мета дослідження полягає в тому, щоб виявити вразливі місця в роботі об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій і виробити найбільш ефективні рекомендації, направлені на підвищення його стійкості.

Дослідження проводиться силами інженерно-технічного складу підприємства із залученням фахівців науково дослідницьких і проектних організацій. Організатором і керівником дослідження є керівник підприємства - начальник ЦЗ об'єкта.

Весь процес планування і проведення дослідження ділиться на три етапи: перший етап - підготовчий, другий - оцінка стійкості роботи об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій, третій - розробка заходів, що підвищують стійкість роботи об'єкта.

На першому етапі розробляються керівні документи, визначається склад учасників дослідження і організується їх підготовка. Основними документами для організації дослідження є: наказ керівника підприємства, календарний план основних заходів щодо підготовки до проведення дослідження, план проведення дослідження.

Тривалість дослідження залежить від об'єму робіт, підготовки учасників, що залучається для роботи, і може становити 2 - 3 місяці.

Для проведення дослідження створюються дослідницькі групи з основних напрямів дослідження в кількості 5 - 10 чоловік і група керівника дослідження на чолі з головним інженером для узагальнення отриманих результатів і вироблення загальних пропозицій по підвищенню стійкості роботи підприємства. У підготовчий період з керівниками дослідницьких груп проводиться спеціальне заняття, на якому керівник підприємства доводить до виконавців план роботи, ставить задачу кожній групі і визначає терміни проведення дослідження.

На другому етапі проводиться оцінка стійкості роботи об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій.

У ході дослідження оцінюються умови захисту робітників і службовців, стійкість інженерно-технічного комплексу до впливу різних вражаючих чинників, визначається характер можливих поразок, вивчається стійкість системи постачання і кооперативних зв'язків об'єкта з підприємствами - постачальниками і споживачами, виявляються вразливі місця в системі управління виробництвом і ЦЗ.

Кожна група фахівців оцінює стійкість певних елементів виробничого комплексу, проводить необхідні розрахунки, робить висновки і готує пропозиції по підвищенню стійкості.

На третьому етапі підводяться підсумки проведених досліджень. Група керівника дослідження на основі доповідей груп фахівців узагальнює отримані результати, формулює загальні пропозиції і розробляє план заходів щодо підвищення стійкості роботи об'єкта в умовах надзвичайних ситуацій.

Методика оцінки стійкості роботи об'єкта засновується на наступних основних положеннях:

- оцінка стійкості здійснюється за допомогою моделювання уразливості об'єкта характеру руйнувань, пожеж, уражень робочих і службовців розрахунковим шляхом;

- стійкість об'єкта оцінюється до впливу чинників найбільш вірогідних надзвичайних ситуацій, які спостерігаються в даному регіоні землетруси, повені, пожежі, аварії радіаційно та хімічно небезпечних підприємств і ін/;

- для розрахунку стійкості застосовуються максимальні значення вражаючих чинників для всієї території об'єкта;

- при оцінці стійкості виділяються основні елементи від яких залежить функціонування об'єкта і визначається міра їх руйнування, по мірі руйнування і межі стійкості встановлюється стійкість кожного з цих елементів і об'єкта загалом [22 ].

#### 4.7 Висновки

В ході роботи був проведений аналіз потенційних небезпек, які можуть виникнути при проведенні дослідів у лабораторії при роботі за фрезерним верстатом і ПК. Аналіз показав, що дослідницька робота супроводжується великою кількістю факторів, які створюють небезпеку та можуть призвести до негативних наслідків у разі недотримання правил і вимог техніки безпеки. Були проведені заходи щодо забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, а також пожежної безпеки з урахуванням вимог нормативних документів та стандартів, які забезпечують безпечні та комфортні умови для виконання дослідницьких робіт та експериментів при роботі за використовуваним обладнанням.

Розглянуто організацію дослідження стійкості роботи промислового об'єкта.

## ВИСНОВКИ

В магістерській роботі були виконані наступні завдання та отримані результати:

1. Виконано літературний огляд джерел з досліджень впливу автоколивального процесу при обробці деталей на металорізальних верстатах та аналізу осцилограм, що описують коливання деталі при різанні.

2. Встановлено, що на поверхні різання, яку можна досліджувати за допомогою БФО, є ділянка, яка профілює оброблену поверхню, але визначення її положення потребує дослідження.

3. Проведено фрезерування зразка при різних частотах обертання. З записаних осцилограм коливань зразків для подальших досліджень визначено 14 параметрів, що характеризують коливальний рух деталі.

4. Визначено, що на формоутворення з 14 параметрів БФО впливає 4: час профілювання, період автоколивань, розмах автоколивань та відхилення деталі від ППР в зоні профілювання

5. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шпинделя при різних частотах обертання крок хвилястості і висота на поверхні різання збільшується.

6. Вирішені питання з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Встановлені потенційні небезпеки, які можуть виникнути при проведенні дослідів у лабораторії під час роботи за фрезерним верстатом, а також при роботі за ПК.

7. З'ясовано, що робота за верстатом і ПК має велику кількість факторів, які створюють небезпеку при виконанні встановлених робіт та можуть призвести до негативних наслідків у разі недотримання правил и вимог техніки безпеки.

8. Розроблено заходи щодо забезпечення техніки безпеки, виробничої санітарії та гігієни праці, а також пожежної безпеки.

9. Запропоновано заходи, які забезпечують безпечні та комфортні умови для виконання дослідницьких робіт та при роботі за фрезерним верстатом FWD-32J.

10. Розглянуто організацію дослідження стійкості роботи промислового об'єкта.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Внуков Ю.Н. Разработка комплекса экспериментальных методик исследования виброустойчивости процесса резания концевыми фрезами с разнонаклонными зубьями / Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова, А. Е. Зубарев // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць [Текст]. – Вип.3(8). – О.:Наука і техніка, 2015. – С. 24-40.
2. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И. Г. Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения / А.П. Соколовский. – М. : Машиностроение, 1955. - 515 с.
4. Каширин А. И. Исследование вибраций при резании металлов / А. И. Каширин. – М.: Издательство АН СССР, 1944. – 132 с.
5. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
6. Свинин В. М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Свинин Валерий Михайлович. – Иркутск, 2008. – 342 с
7. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part I: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 22–30
8. Budak E. Analytical Prediction of Chatter Stability Conditions for Multi-Degree of Systems in Milling. Part II: Modeling / E. Budak, Y. Altintas // Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. – 1998. – Vol. 120. – P. 31–36
9. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения. / И.И. Ильницкий. – М.: Машгиз, 1958. – 144 с.

10. Opitz H. 1969, Investigation and Calculation of the Chatter Behavior of Lathes and Milling Machines / H. Opitz // Annals of the CIRP. – 1969. – Vol. 18. – P. 335–342
11. Tlusty J. Basic Nonlinearity in Machining Chatter / J. Tlusty, F. Ismail // Annals of the CIRP. – 1981. – Vol. 30. – P. 21–25.
12. Дядя С.И. Систематизация колебаний при концевом фрезеровании тонкостенных элементов деталей / С.И.Дядя, Е.Б.Козлова, Э.В.Кондратюк, А.Е.Зубарев, В.А.Кришталь // Вестник двигателестроения. №1, 2016. С.68-71.
13. Дядя С. И. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей [ Электронный ресурс] : монография / [Внуков Ю. Н., Дядя С.И., Козлова Е.Б. и др.] ; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье : ЗНТУ, 2017
14. Патент UA 94974 МПК (2006) G01H11/00; G01M7/02. Стенд для дослідження коливань при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей. Логомінов Віктор Олексійович, Гермашев Антон Ігоревич, Дядя Сергій Іванович, Козлова Олена Борисівна. -u201405981; заява 02.06.2014; опубл. 10.12.2014.
15. Пат. 103031 Україна, МПК (2006) G01H11/00, G01M7/02. Стенд для оцінки коливального процесу деталі при циліндричному фрезеруванні, Внуков Ю.М., Гермашев А.І., Кучугуров М.В., Дядя С.І., Козлова О.Б., заявник та власник патенту ЗНТУ - №u201506355; заявл 26.06.2015; опубл 25.11.2015, Бюл. № 22.
16. Козлова Е.Б. Подавление регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенного элемента детали концевыми цилиндрическими фрезами: дис. канд. техн. наук.: 05.03.01/Козлова Елена Борисовна. – Запорожье, 2016. – 220с.
17. Дядя С.И. Исследование формирования обработанной поверхности тонкостенного элемента детали при концевом цилиндрическом фрезеровании с автоколебаниями [Текст] /С.И. Дядя // Сучасні технології в машинобудуванні Харків: НТУ «ХП», 2017.вип.12./



18. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»(спеціалізація «Технологія машинобудування»); 133 «Галузеве машинобудування» (спеціалізація «Металорізальні верстати та системи»); 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»(спеціалізація «Авіаційні двигуни та енергетичні установки»,«Технології виробництва авіаційних двигунів та енергетичних установок») / Укл. : В.І. Шмирко – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018 –28 с.

19. Методичні вказівки до навчального практикуму №1 для студентів заочного відділення спеціальності 131 «Прикладна механіка» (освітня програма «Технології машинобудування») /Укл. С.І Дядя, Паміров В.М., Томілін В.М. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – с.20.

20. <http://www.studlife.net>

21 Розенберг А. М. Динамика фрезерования / Розенберг А. М. – М.: Советская наука. – 1945. – 360 с.

22. Магістерська робота «Дослідження закономірностей коливань тонкостінних деталей з алюмінію та чавуну при зустрічному фрезеруванні за допомогою базових фрагментів осцилограми». К.Г.Блід. - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка».-.2018. – с.73.

23. Магістерська робота «Дослідження закономірностей коливань тонкостінних деталей з силуміну та ХН78Т при зустрічному фрезеруванні за допомогою базових фрагментів осцилограми». А.С.Пазій. - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка».-. 2018. – с.73.

24. Влияние периода автоколебаний на формирование профиля обработанной поверхности при концевом цилиндрическом фрезеровании. С.І.Дядя, О.Б Козлова, А.І. Гермашев, М.В.Кучугуров. – Запоріжжя.-. 2019. – с.36.

## ДОДАТОК А

Значення коливальних характеристик деталей за 14 параметрами при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 280 об/хв

№ БФО	R <sub>1</sub> ,ММ	Δ <sub>вх</sub> ,ММ	R <sub>2</sub> ,ММ	T <sub>АК</sub> ,МС	T <sub>z</sub> ,МС	t <sub>пр3</sub> ,МС	t <sub>x,x</sub> ,МС	Δ <sub>max</sub> ,ММ	Δ <sub>внх</sub> ,ММ	A <sub>1</sub> ,ММ	T <sub>ВКЕ</sub> ,МС	δ	Δ <sub>проф</sub> ,ММ	t <sub>проф</sub> ,МС
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,0030	0,119	0,228	1,44	315	11,22	303	0,224	0,119	0,051	2,25	0,060	0,009	11,13
2	0,0023	0,106	0,178	1,44	313,8	11,37	300	0,224	0,106	0,04	2,25	0,046	0,028	11,61
3	0,0019	0,085	0,150	1,35	314	11,61	303,2	0,221	0,085	0,033	2,25	0,064	0,041	11,46
4	0,0030	0,054	0,106	1,35	315,6	12,12	300	0,216	0,054	0,023	2,25	0,060	0,048	11,52
5	0,0023	0,051	0,106	1,35	313,5	12,24	298,2	0,217	0,051	0,023	2,25	0,065	0,062	11,9
6	0,0019	0,023	0,070	1,29	315	12,51	298	0,215	0,023	0,015	2,25	0,049	0,077	11,98
7	0,0030	0,003	0,149	1,29	314,4	12,84	300,6	0,207	0,003	0,031	2,25	0,059	0,087	12,03
8	0,0023	0,092	0,196	1,29	313,2	12,15	303	0,215	0,092	0,042	2,25	0,068	0,009	11,97
9	0,0019	0,074	0,131	1,35	312,6	12,39	300	0,222	0,074	0,029	2,25	0,037	0,013	12,08
10	0,0030	0,063	0,118	1,44	315	12,87	303,2	0,221	0,063	0,026	2,25	0,043	0,024	12,39
11	0,0023	0,050	0,076	1,53	315,6	12,96	300	0,223	0,050	0,017	2,25	0,061	0,028	12,42
12	0,0019	0,042	0,064	1,53	313,8	13,2	298,2	0,220	0,042	0,014	2,25	0,062	0,038	12,84
13	0,0030	0,038	0,037	1,53	313,2	13,32	298	0,216	0,038	0,008	2,25	0,058	0,041	13,08
14	0,0023	0,036	0,043	1,44	316,2	13,65	300,6	0,211	0,036	0,009	2,25	0,043	0,043	13,2
15	0,0019	0,031	0,565	1,44	313,8	13,74	303	0,200	0,031	0,113	2,25	0,030	0,05	13,17
16	0,0030	0,027	0,549	1,53	313,2	13,86	300	0,206	0,027	0,113	2,25	0,039	0,063	13,23
17	0,0023	0,013	0,597	1,53	315	12,87	303,2	0,208	0,013	0,124	2,25	0,032	0,075	12,03
18	0,0019	0,007	0,589	1,53	314,4	14,52	300	0,211	0,007	0,124	2,25	0,033	0,083	12,66
19	0,0030	0,109	0,593	1,53	313,2	13,53	298,2	0,206	0,109	0,122	2,25	0,037	0,008	12,21
20	0,0023	0,102	0,612	1,53	313,8	13,68	303	0,212	0,102	0,13	2,25	0,034	0,015	12,57
21	0,0019	0,087	0,573	1,62	315	14,07	300	0,213	0,087	0,122	2,25	0,032	0,037	12,45
22	0,0030	0,069	0,565	1,62	314,4	14,4	303,2	0,216	0,069	0,122	2,25	0,062	0,043	12,87
23	0,0023	0,054	0,508	1,62	312,6	14,52	300	0,219	0,054	0,111	2,25	0,039	0,063	12,84
24	0,0019	0,019	0,472	1,71	315	14,67	298,2	0,220	0,019	0,104	2,25	0,064	0,073	12,78
25	0,0030	0,002	0,462	1,71	313,8	14,91	303	0,223	0,002	0,103	2,25	0,060	0,081	12,21
26	0,0023	0,069	0,431	1,53	314	13,86	300	0,220	0,069	0,095	2,25	0,065	0,008	12,48
27	0,0019	0,053	0,467	1,53	315,6	14,01	303,2	0,219	0,053	0,102	2,25	0,049	0,032	12,58
28	0,0030	0,045	0,560	1,53	313,5	14,22	300	0,220	0,045	0,123	2,25	0,059	0,037	12,78
29	0,0023	0,043	0,450	1,71	315	14,76	298,2	0,227	0,043	0,102	2,25	0,068	0,041	11,61
30	0,0019	0,014	0,461	1,83	314,4	14,76	298	0,225	0,014	0,104	2,25	0,037	0,044	11,97

## ДОДАТОК Б

Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 180 об/хв

Номер різу	Час профілювання $t_{\text{проф}}$ , мс	Відхилення від ППР в зоні профілювання $\Delta_{\text{проф}}$ , мм	Розмах автоколивань $R_2$ , мм	Період автоколивань $T_{\text{ак}}$ , мс
1	11,91	0,119	0,051	1,44
2	11,49	0,106	0,04	1,44
3	11,7	0,085	0,033	1,35
4	13,05	0,054	0,023	1,35
5	12,84	0,051	0,023	1,35
6	14,43	0,035	0,015	1,29
7	12,93	0,005	0,031	1,29
8	12,18	0,108	0,042	1,29
9	12,96	0,074	0,029	1,35
10	13,14	0,063	0,026	1,44
11	13,35	0,050	0,017	1,53
12	13,77	0,042	0,014	1,53
13	14,07	0,038	0,008	1,53
14	13,86	0,036	0,009	1,44
15	14,07	0,031	0,113	1,44
16	14,19	0,027	0,113	1,53
17	14,4	0,013	0,124	1,53
18	14,79	0,007	0,124	1,53
19	13,53	0,134	0,122	1,53
20	13,77	0,102	0,13	1,53
21	14,22	0,087	0,122	1,62
22	14,49	0,075	0,122	1,62
23	14,52	0,054	0,111	1,62
24	14,67	0,019	0,104	1,71
25	15	0,002	0,103	1,71
26	13,7	0,069	0,095	1,53
27	14,19	0,053	0,102	1,53
28	14,22	0,045	0,123	1,53
29	14,6	0,043	0,102	1,71
30	14,76	0,014	0,104	1,83

## ДОДАТОК В

Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 224 об/хв

Номер різу	Час профілювання $t_{\text{проф}}$ , мс	Відхилення від ППР в зоні профілювання $\Delta_{\text{проф}}$ , мм	Розмах автоколивань $R_2$ , мм	Період автоколивань $T_{\text{ак}}$ , мс
1	9,63	0,101	0,092	1,44
2	9,69	0,075	0,093	1,53
3	9,84	0,063	0,102	1,53
4	10,08	0,060	0,111	1,53
5	10,47	0,053	0,115	1,53
6	10,8	0,041	0,117	1,62
7	11,1	0,021	0,113	1,71
8	11,16	0,009	0,127	1,83
9	11,22	0,007	0,12	1,83
10	10,11	0,071	0,104	1,53
11	10,23	0,050	0,099	1,62
12	10,41	0,033	0,105	1,62
13	10,53	0,011	0,102	1,71
14	11,01	0,009	0,089	1,83
15	11,25	0,007	0,112	1,83
16	10,11	0,059	0,107	1,53
17	10,2	0,037	0,119	1,62
18	10,5	0,036	0,126	1,71
19	10,62	0,016	0,138	1,71
20	10,74	0,014	0,143	1,83
21	11,1	0,010	0,147	1,83
22	11,25	0,007	0,145	1,92
23	10	0,085	0,086	1,44
24	10,17	0,075	0,092	1,53
25	10,41	0,074	0,09	1,53
26	10,65	0,063	0,071	1,32
27	10,62	0,048	0,038	1,14
28	10,98	0,038	0,035	1,14
29	11,13	0,024	0,023	1,08
30	11,25	0,012	0,006	0,9

## ДОДАТОК Г

Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 280 об/хв

Номер різу	Час профілювання $t_{\text{проф}}$ , мс	Відхилення від ППР в зоні профілювання $\Delta_{\text{проф}}$ , мм	Розмах автоколивань $R_2$ , мм	Період автоколивань $T_{\text{ак}}$ , мс
1	7,92	0,182	0,154	1,86
2	8,19	0,182	0,194	1,86
3	8,25	0,184	0,194	1,86
4	8,31	0,175	0,202	1,86
5	8,52	0,155	0,125	1,62
6	8,85	0,129	0,139	1,62
7	8,91	0,096	0,143	1,74
8	9,09	0,077	0,144	1,74
9	9,3	0,069	0,168	1,74
10	9,48	0,060	0,182	1,86
11	7,95	0,131	0,205	1,86
2	8,31	0,136	0,204	1,86
13	8,64	0,126	0,203	1,86
14	8,85	0,112	0,173	1,62
15	8,91	0,046	0,178	1,74
16	9,03	0,029	0,185	1,74
17	9,42	0,058	0,210	1,86
18	7,92	0,140	0,195	1,74
19	8,16	0,113	0,170	1,74
20	8,4	0,086	0,185	1,86
21	8,52	0,071	0,176	1,74
22	8,73	0,052	0,187	1,74
23	9,03	0,032	0,195	1,74
24	7,65	0,141	0,127	1,62
25	7,95	0,138	0,138	1,62
26	8,04	0,120	0,156	1,62
27	8,31	0,096	0,138	1,62
28	8,4	0,048	0,165	1,74
29	8,61	0,041	0,175	1,74
30	8,94	0,048	0,174	1,74

## ДОДАТОК Д

Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 355 об/хв

Номер різу	Час профілювання $t_{\text{проф}}$ , мс	Відхилення від ППР в зоні профілювання $\Delta_{\text{проф}}$ , мм	Розмах автоколивань $R_2$ , мм	Період автоколивань $T_{\text{ак}}$ , мс
1	6,78	0,091	0,242	1,62
2	7,08	0,085	0,183	1,62
3	7,14	0,064	0,191	1,71
4	7,23	0,054	0,216	1,83
5	7,5	0,032	0,226	1,92
6	7,65	0,023	0,233	1,92
7	6,12	0,179	0,233	1,53
8	6,51	0,171	0,149	1,53
9	6,54	0,151	0,129	1,92
10	6,66	0,147	0,158	2,01
11	6,78	0,130	0,166	2,01
12	6,9	0,112	0,111	1,92
13	6,99	0,093	0,079	1,83
14	7,02	0,088	0,101	1,71
15	7,14	0,086	0,143	1,71
16	7,17	0,073	0,125	1,71
17	7,32	0,064	0,13	1,71
18	7,56	0,048	0,167	1,83
19	7,83	0,032	0,229	1,92
20	7,89	0,019	0,269	2,01
21	8,07	0,012	0,306	2,01
22	6,78	0,181	0,206	1,53
23	6,93	0,159	0,193	1,53
24	7,05	0,143	0,189	1,53
25	7,11	0,119	0,178	1,53
26	7,41	0,104	0,173	1,53
27	7,35	0,068	0,149	1,71
28	7,62	0,052	0,153	1,71
29	7,74	0,044	0,195	1,83
30	7,86	0,040	0,195	1,92
31	7,95	0,016	0,226	2,01

## ДОДАТОК Ж

Значення формоутворюючих коливальних характеристик деталі при попутному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 450 об/хв

Номер різу	Час профілювання $t_{\text{проф}}$ , мс	Відхилення від ППР в зоні профілювання $\Delta_{\text{проф}}$ , мм	Розмах автоколивань $R_2$ , мм	Період автоколивань $T_{\text{ак}}$ , мс
1	4,68	0,146	0,131	1,41
2	4,71	0,111	0,156	1,41
3	5,13	0,109	0,148	1,62
4	5,31	0,058	0,186	1,71
5	5,64	0,090	0,241	1,83
6	5,76	0,052	0,255	1,83
7	5,85	0,021	0,269	1,83
8	5,97	0,013	0,312	2,01
9	4,56	0,171	0,195	1,53
10	4,62	0,151	0,202	1,53
11	4,65	0,149	0,236	1,53
12	4,8	0,145	0,246	1,53
13	5,1	0,130	0,235	1,53
14	5,07	0,114	0,202	1,53
15	5,34	0,092	0,181	1,53
16	5,19	0,071	0,119	1,41
17	5,43	0,053	0,055	1,41
18	5,52	0,033	0,093	1,41
19	5,31	0,047	0,083	1,62
20	5,37	0,044	0,138	1,62
21	5,61	0,013	0,169	1,71
22	5,85	0,056	0,178	1,71
23	5,97	0,033	0,159	1,83
24	4,86	0,075	0,142	1,41
25	5,01	0,069	0,18	1,62
26	5,07	0,049	0,217	1,62
27	5,43	0,046	0,222	1,71
28	5,52	0,010	0,171	1,71
29	4,23	0,173	0,173	1,53
30	4,32	0,151	0,184	1,53



Національний університет «Запорізька політехніка»  
Кафедра «Технології машинобудування»



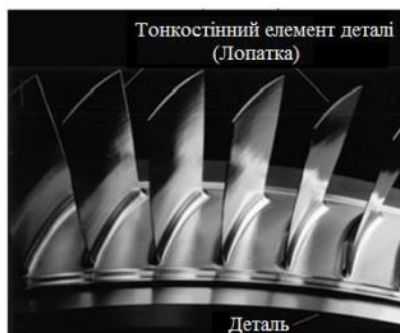
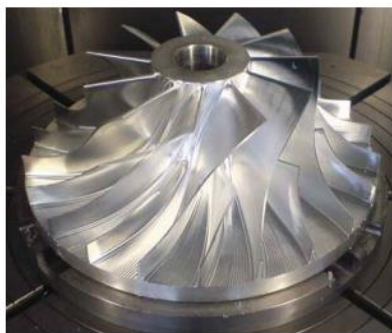
**«ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ  
ШПИНДЕЛЯ НА КОЛИВАННЯ ТОНКОСТІННОЇ  
ДЕТАЛІ ПРИ ПОПУТНОМУ КІНЦЕВОМУ  
ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ  
ПОВЕРХНІ»**

Виконав: ст. гр. М-118м Блід О.Г.

Керівник: к.т.н., доц. Дядя С.І.

1

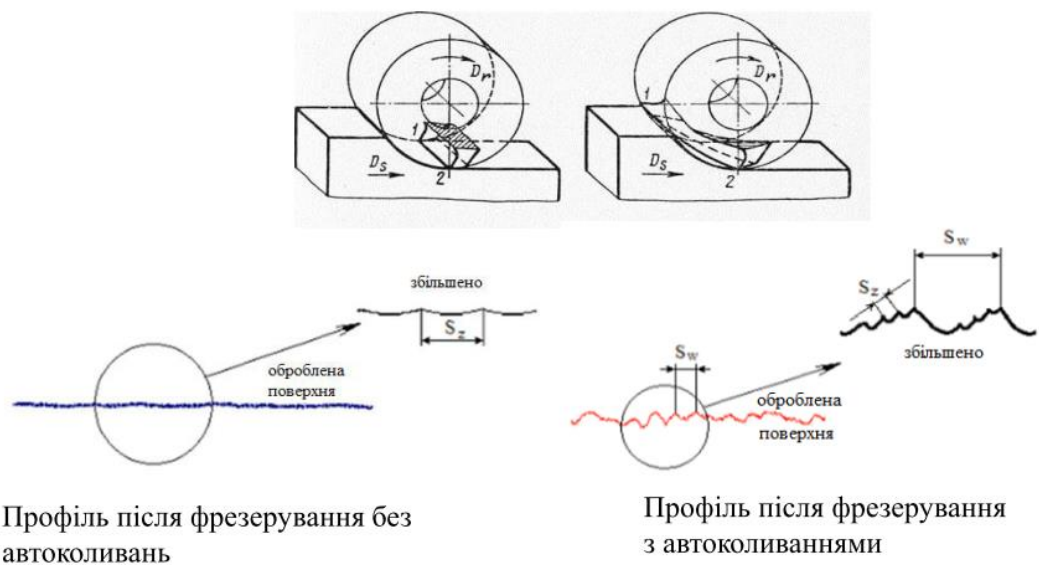
**Приклади деталей, що мають тонкостінні елементи, які  
отримують кінцевим фрезеруванням**



2



### Схема формування профілю поверхні при циліндричному фрезеруванні



3

### Мета роботи: ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ НА КОЛИВАННЯ ТОНКОСТІННОЇ ДЕТАЛІ ПРИ ПОПУТНОМУ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ТА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

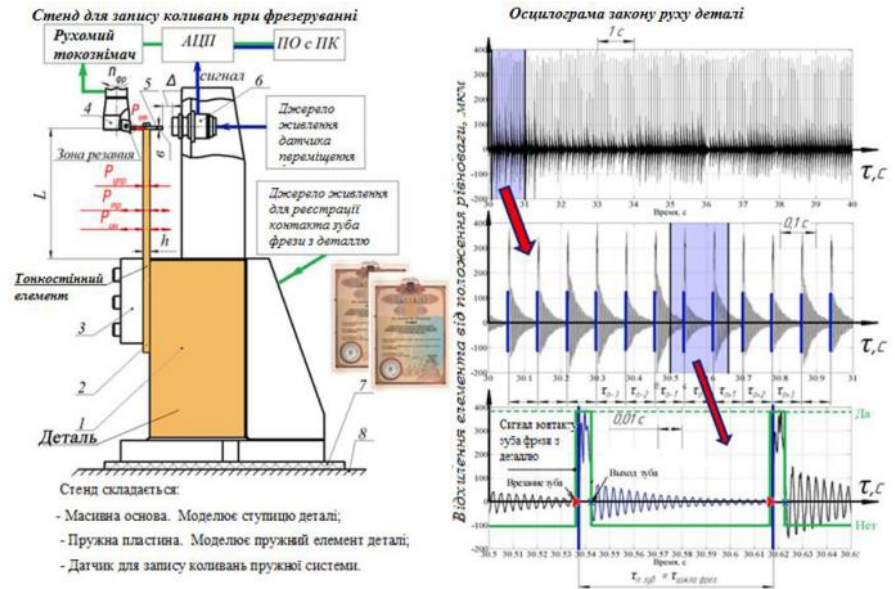
#### Завдання дослідження:

1. Провести аналіз літературних джерел щодо дослідження коливань при різанні металів та їх вплив на формування обробленої поверхні.
2. Розробити методику проведення дослідження процесу різання при фрезеруванні.
3. Розробити методику дослідження осцилограм коливань деталі.
4. Дослідити взаємозв'язок між параметрами обробленої поверхні та 14 параметрами, що описують базові фрагменти осцилограм

4

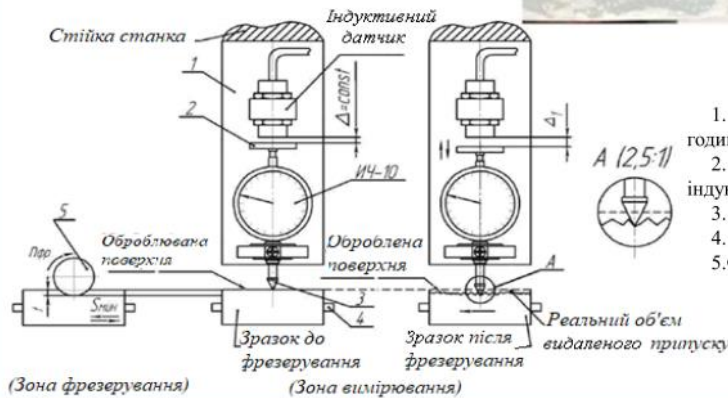
## Методики проведення досліджень

### Дослідження динамічних характеристик



5

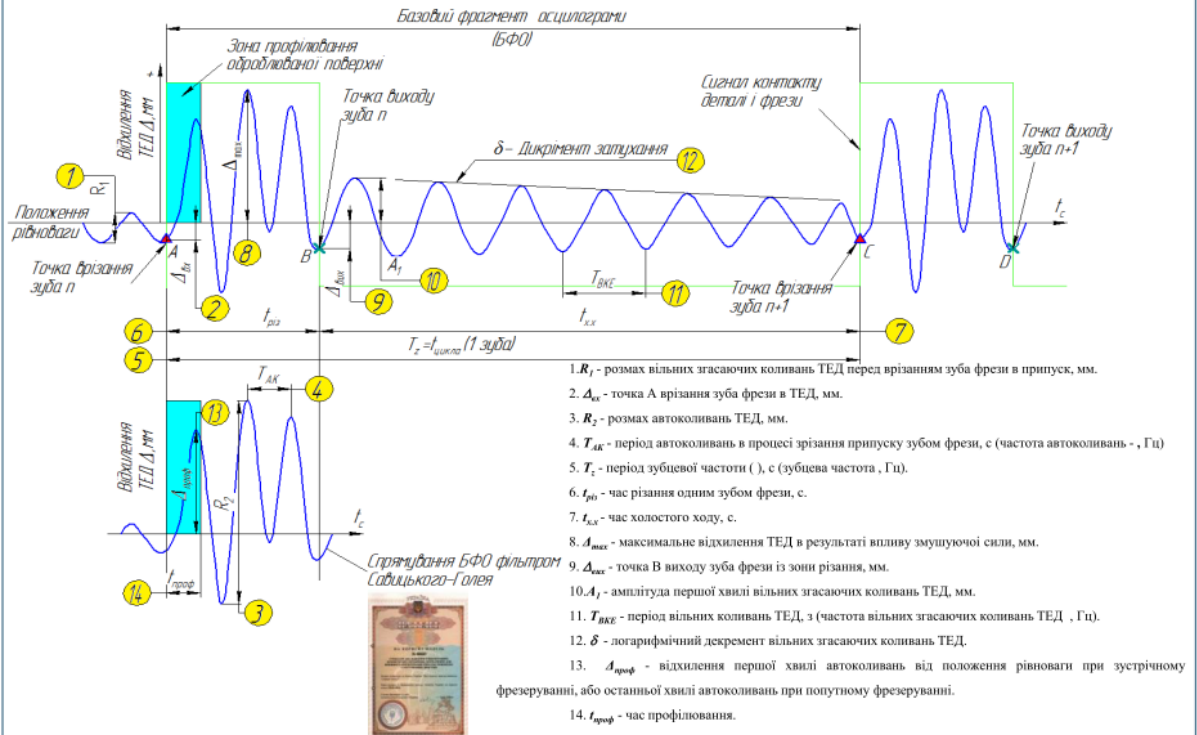
### Дослідження обробленої поверхні



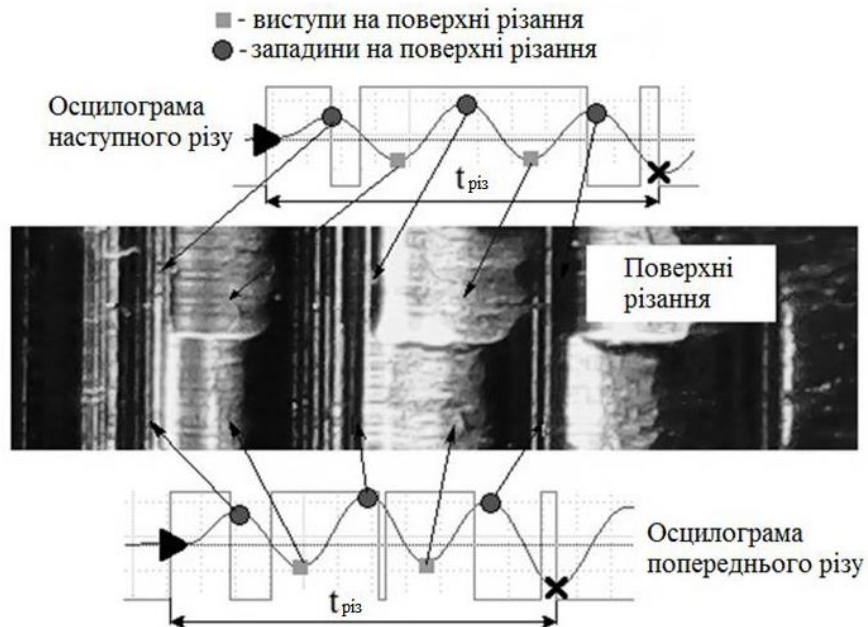
1. Основа, на якій закріплюється індикаторний годинник ИЧ-10 та індуктивний датчик переміщення;
2. П'ята, за допомогою якої змінюють відстань до індуктивного датчика;
3. Наконечник індикаторного годинника;
4. ПС тонкоштинної деталі (пластина);
5. Фреза

6

## Дослідження основних параметрів БФО (Патент України №106901)

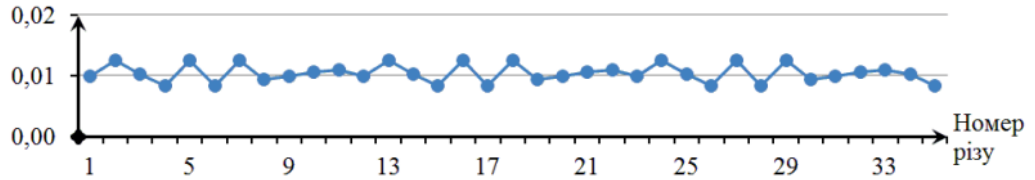


## Дослідження поверхонь різання за осцилограмами

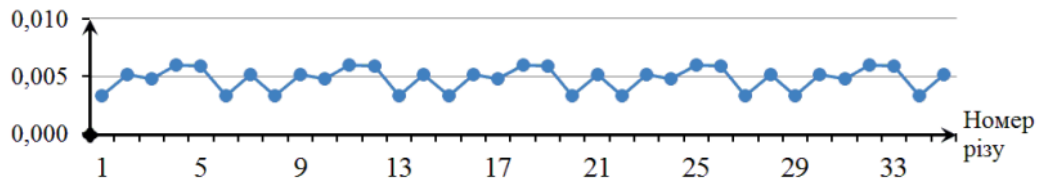


## Залежності коливальних характеристик при попутному фрезеруванні

Розмах вільних згасаючих коливань перед врізанням зуба фрези  $R1, \text{мм}$

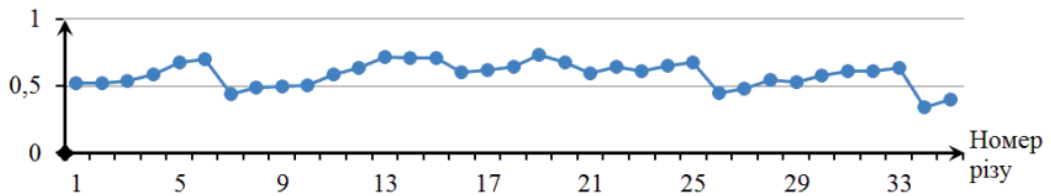


Відхилення деталі від пружної рівноваги при врізанні зуба фрези  $\Delta_{вр}, \text{мм}$

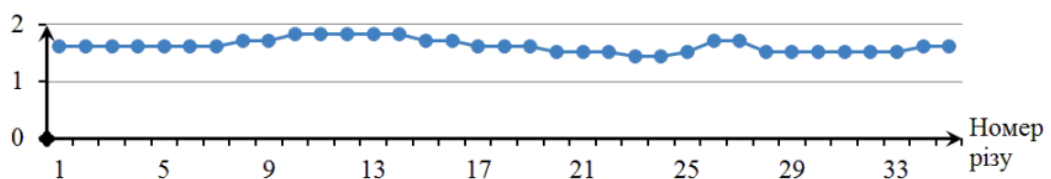


9

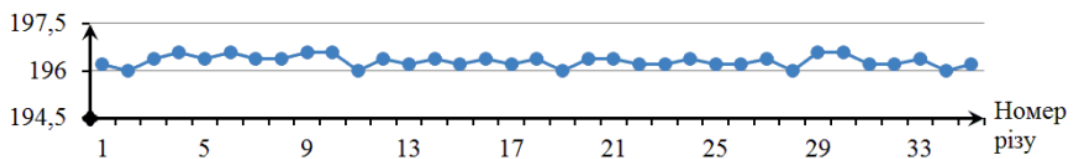
Розмах автоколивань  $R2, \text{мм}$



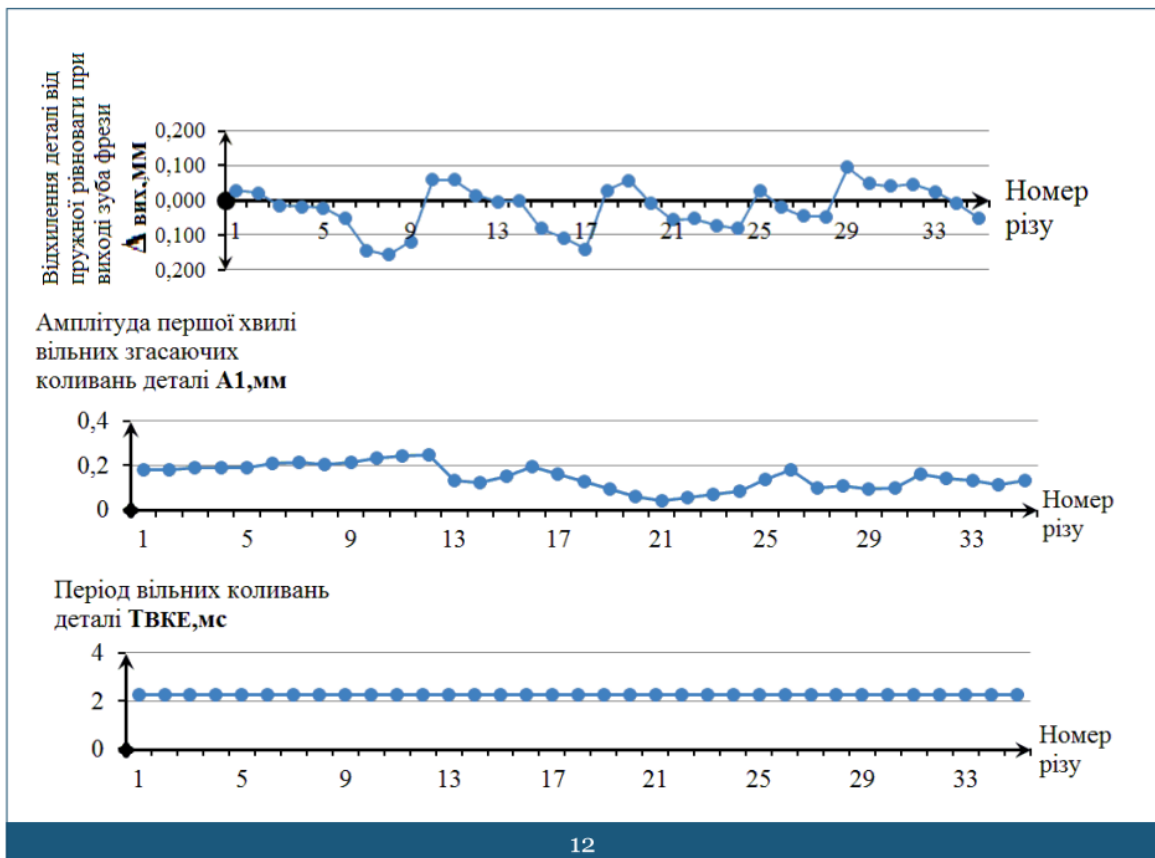
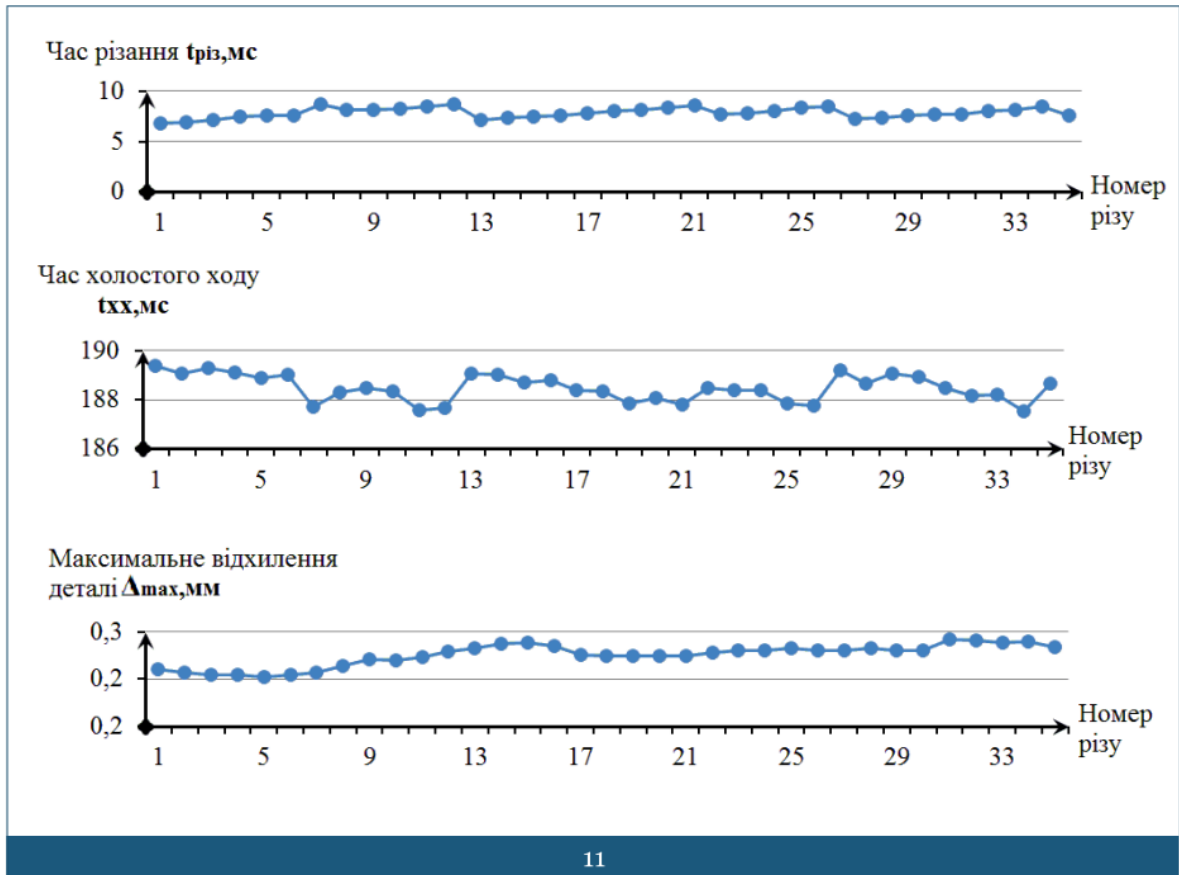
Період автоколивань  $T_{AK}, \text{мс}$

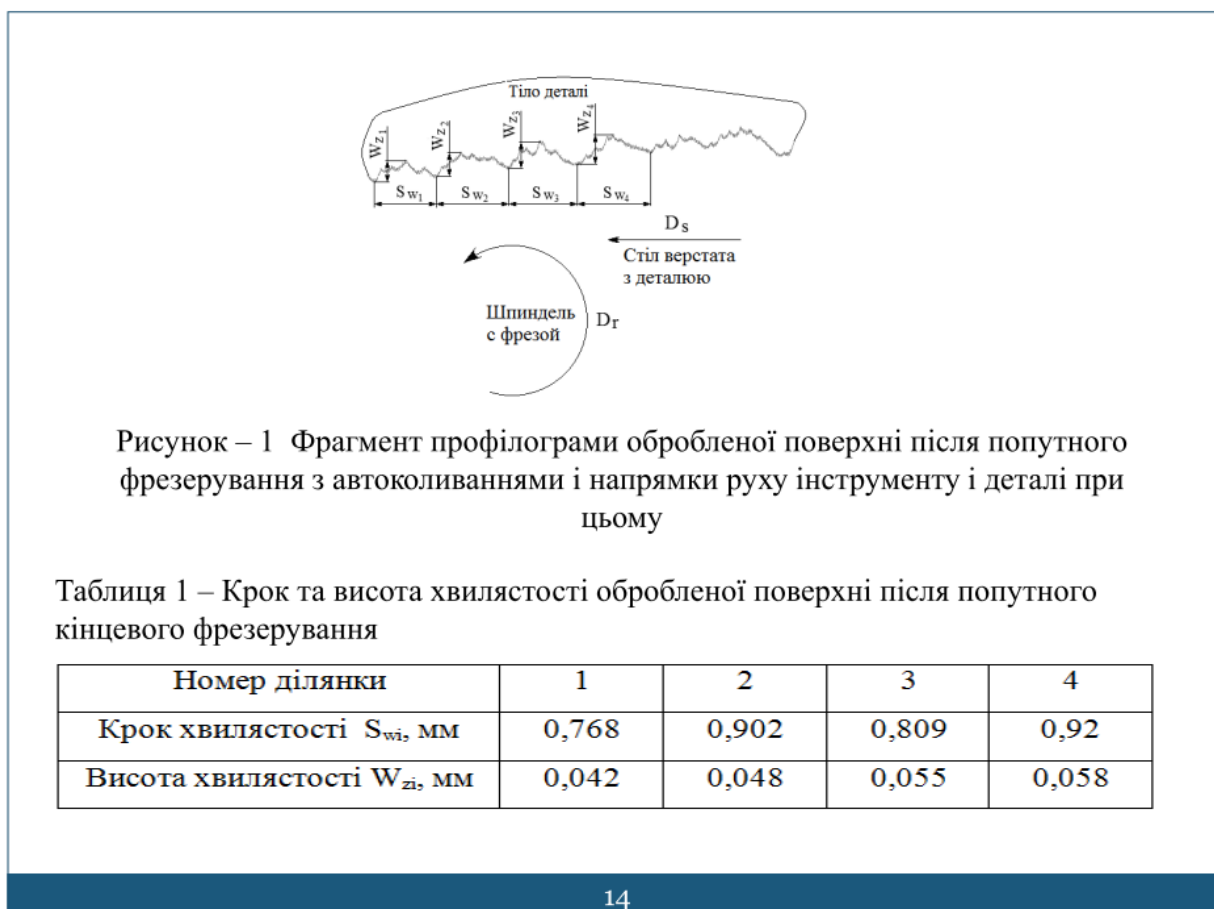
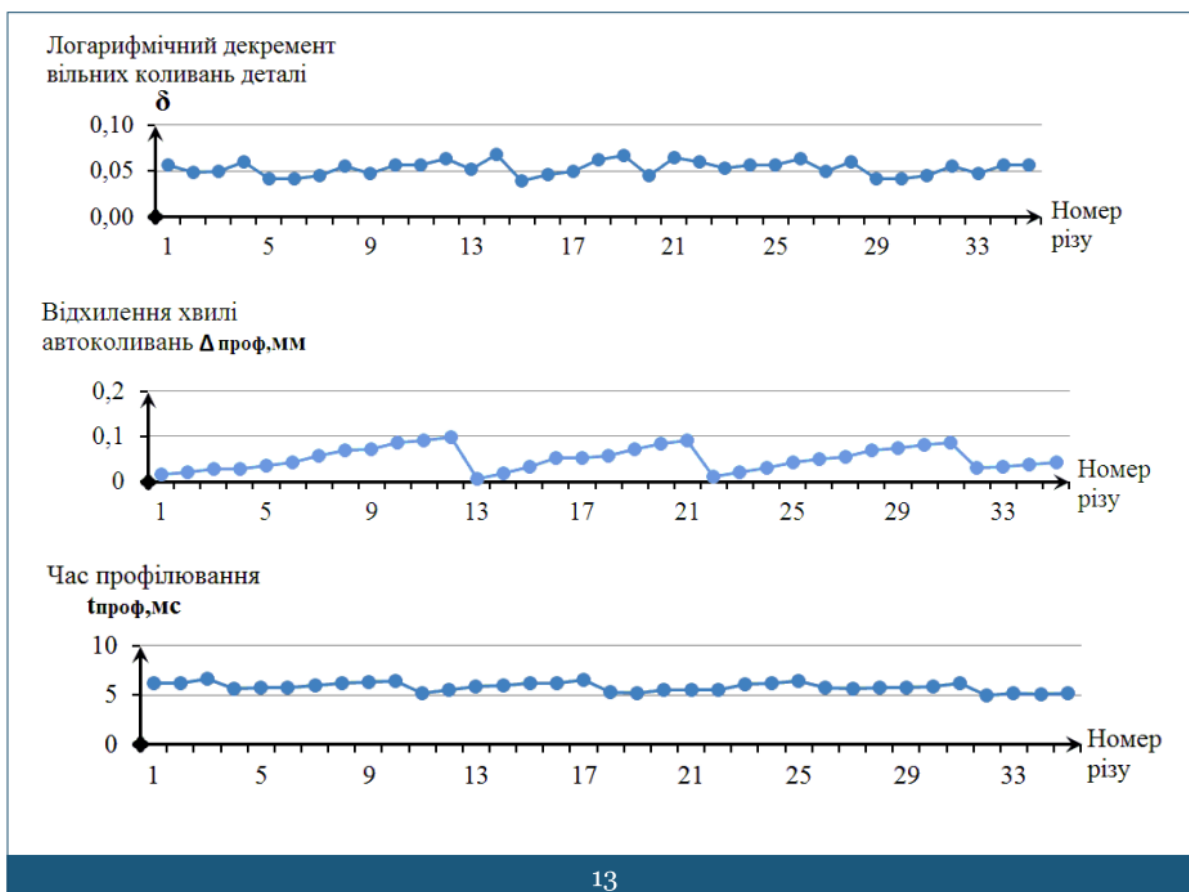


Період зубцевої частоти  $T_z, \text{мс}$



10







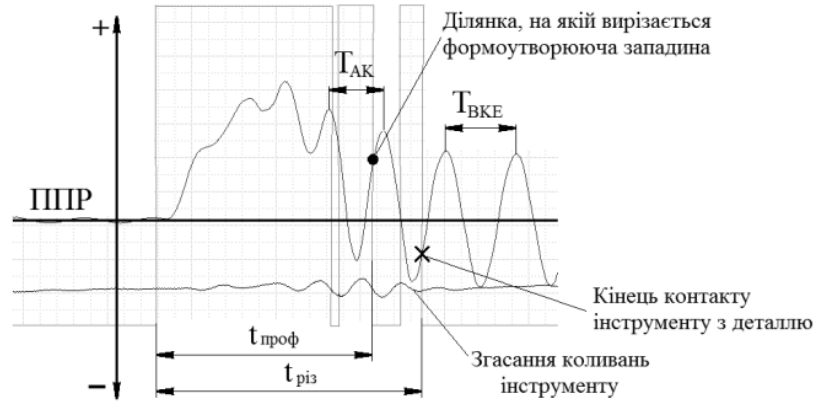


Рисунок 2 – Ділянки на БФО, що відповідають формоутворюючій западині на поверхні різання та закінченню контакту інструменту з деталлю

15

### Визначення довжини поверхні різання ( $l_{різ}$ )

$$l_{різ} = \frac{\pi \cdot D_{фр} \cdot n}{60} \cdot t_{проф}$$

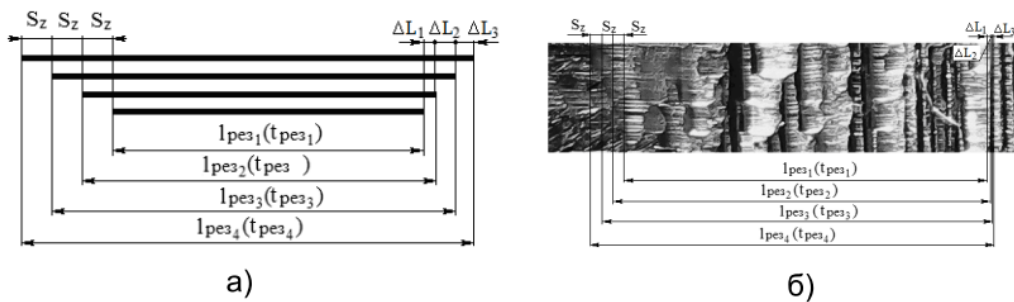


Рисунок – 3 Схема (а) та фотографія поверхонь різання (б), які пояснюють вплив часу профілювання на довжину поверхні різання та формування кроку хвилястості на обробленій поверхні

16

Схема формування хвилястості при попутному фрезеруванні

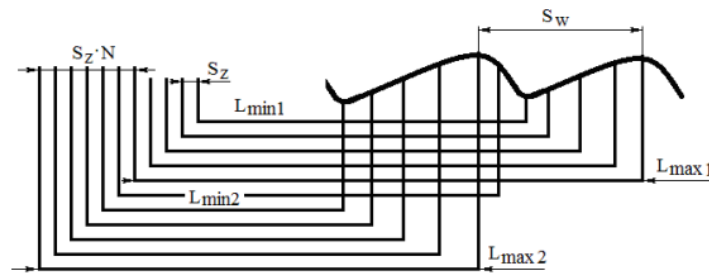


Рисунок 4 – Схема визначення кроку хвилястості на обробленій поверхні після попутного фрезерування

Відстань між вершинами дорівнює кроку хвилястості ( $S_w$ ) (рис 4) та розраховується за формулою:

$$S_w = (L_{\max 1} + S_z \cdot N) - L_{\max 2}$$

17

Таблиця 2 – Значення кроків хвилястості на профілограмі та розрахованих по зміні довжини поверхні різання

Номер ділянки	1	2	3	4
Крок хвилястості на профілограмі $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809	0,92
Крок хвилястості розрахований $S_{wi}$ , мм	0,747	0,908	0,771	0,871
Похибка, %	2,7	0,7	4,69	5,33

Значення кроків для однойменних ділянок на профілограмі та побудованих за значеннями з БФО, що наведені в табл. 1, мають близькі значення з похибкою в межах 6%. На підставі цього можна вважати, що крок хвилястості залежить від зміни довжини поверхні різання, що визначається часом профілювання.

18



Для порівняння з висотою хвилястості, що визначається по профілограмі, з урахуванням обмеження наконечника пристрою запису профілограми, висота, що визначається за БФО, розраховується за формулою:

$$W_{zi} = -17,387 \cdot \delta^2 + 2,9825 \cdot \delta - 0,071$$

Таблиця 3 – Значення висоти хвилястості, що виміряна на профілограмі, та розрахованої по формулі

Номер ділянки	1	2	3	4
Висота хвилястості, що виміряна по профілограмі $W_{zip}$ , мм	0,040	0,048	0,052	0,055
Висота хвилястості, що розрахована по формулі $W_{zip}$ , мм	0,034	0,053	0,048	0,050
Похибка, %	15,0	9,4	7,7	9,0

### Формоутворюючі коливальні характеристики при фрезеруванні з різними частотами обертання шпинделя

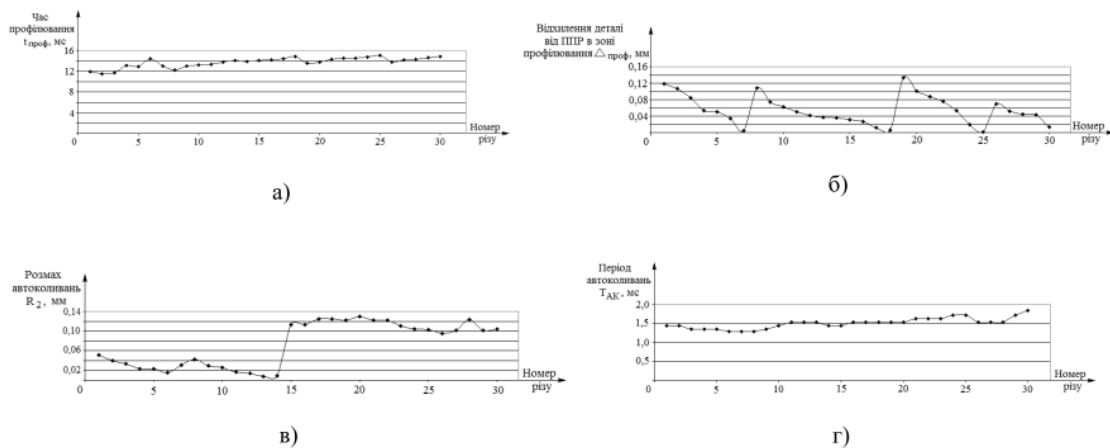
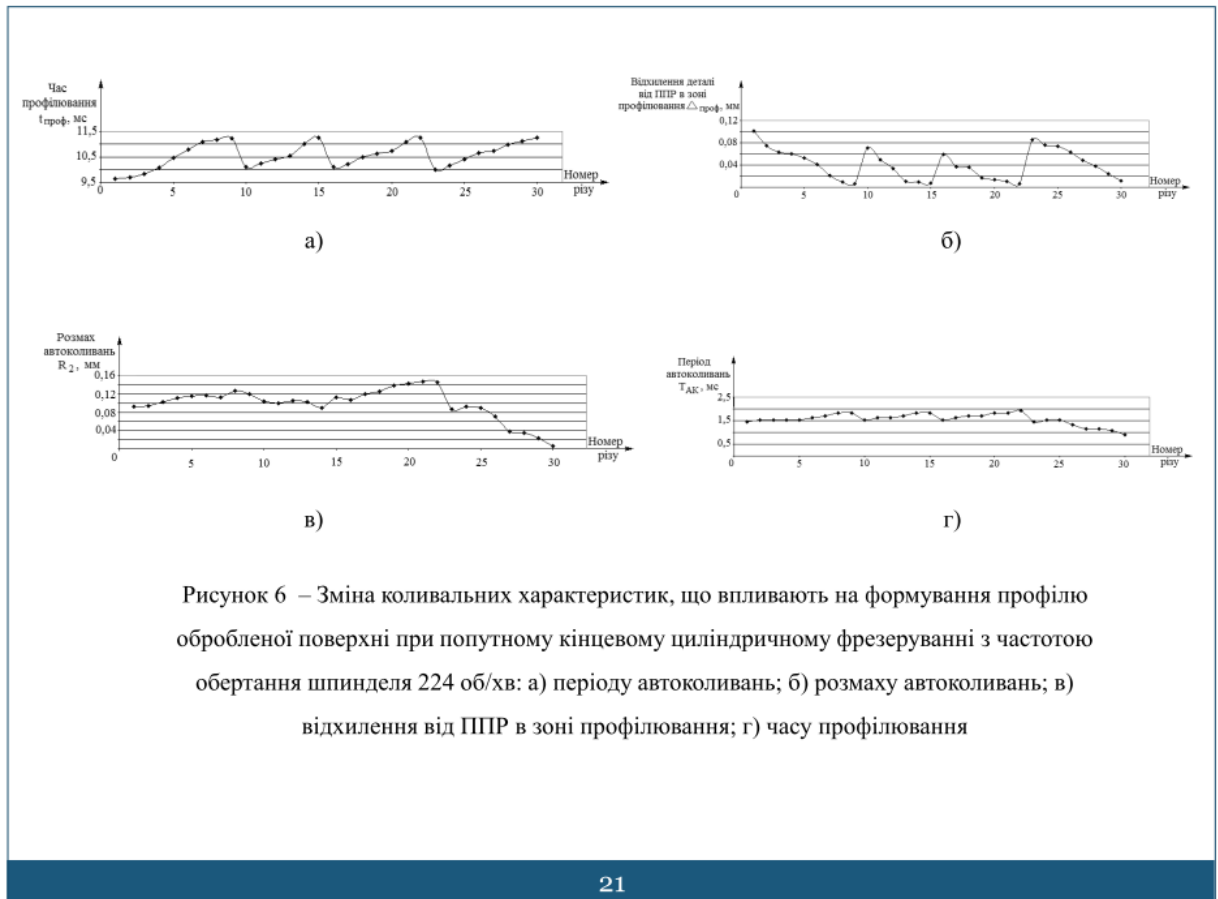
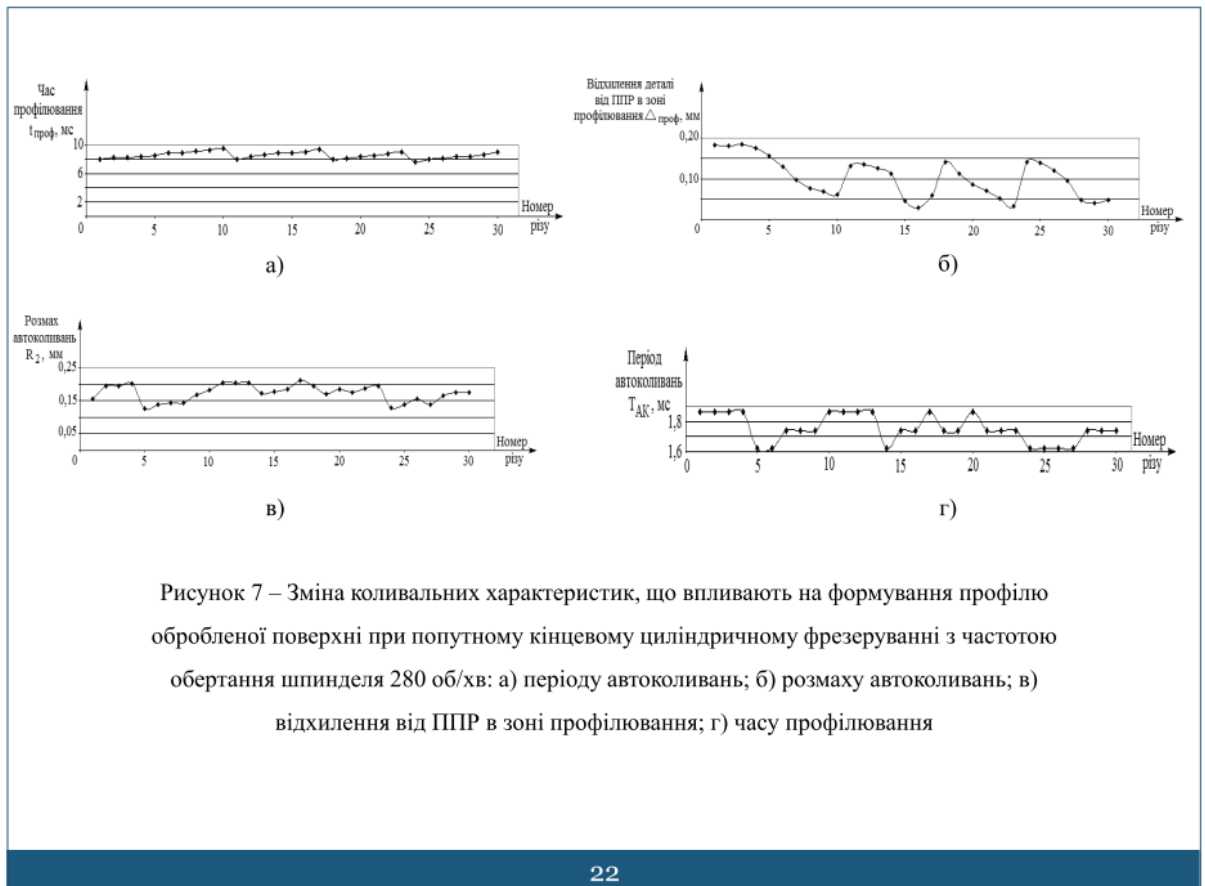


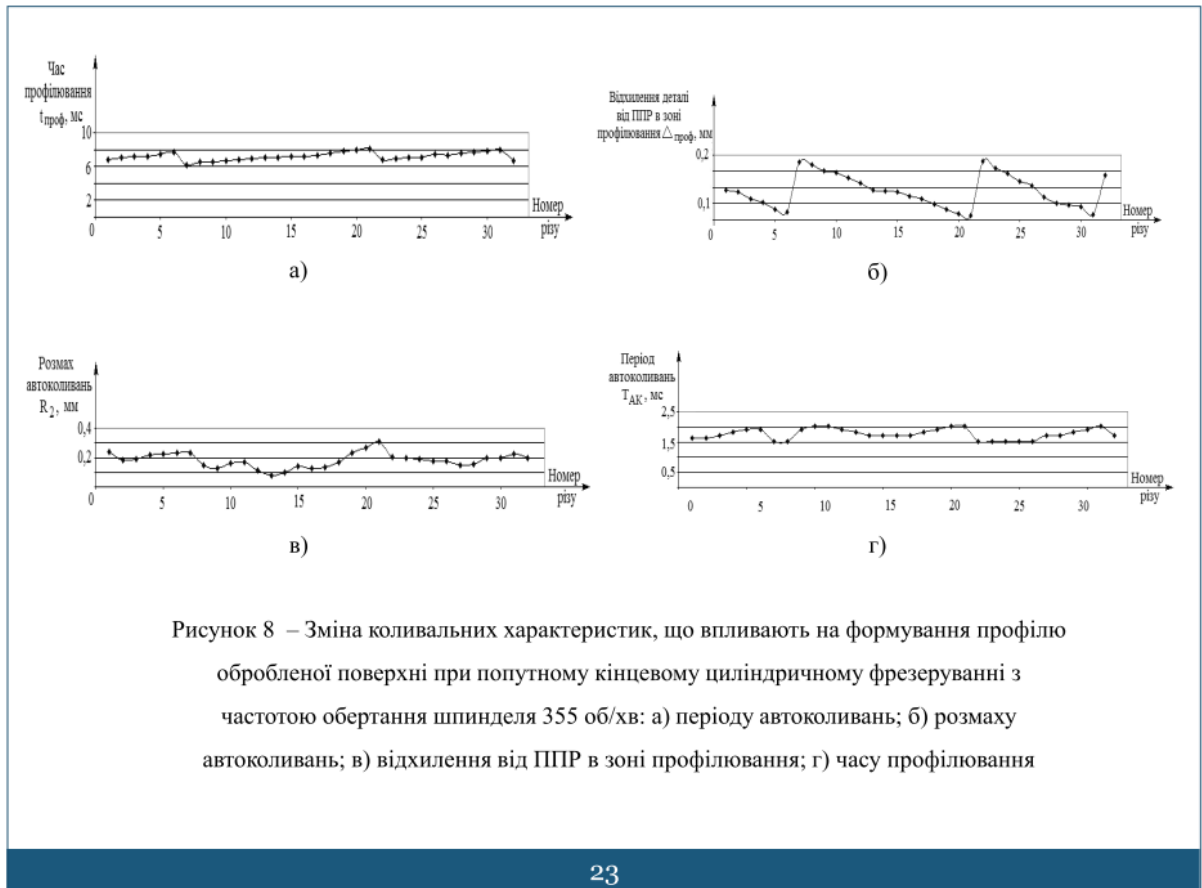
Рисунок 5 – Зміна коливальних характеристик, що впливають на формування профілю обробленої поверхні при попутному кінцевому циліндричному фрезеруванні з частотою обертання шпинделя 180 об/хв: а) часу профілювання; б) відхилення від ППР в зоні профілювання; в) розмаху автоколивань; г) періоду автоколивань



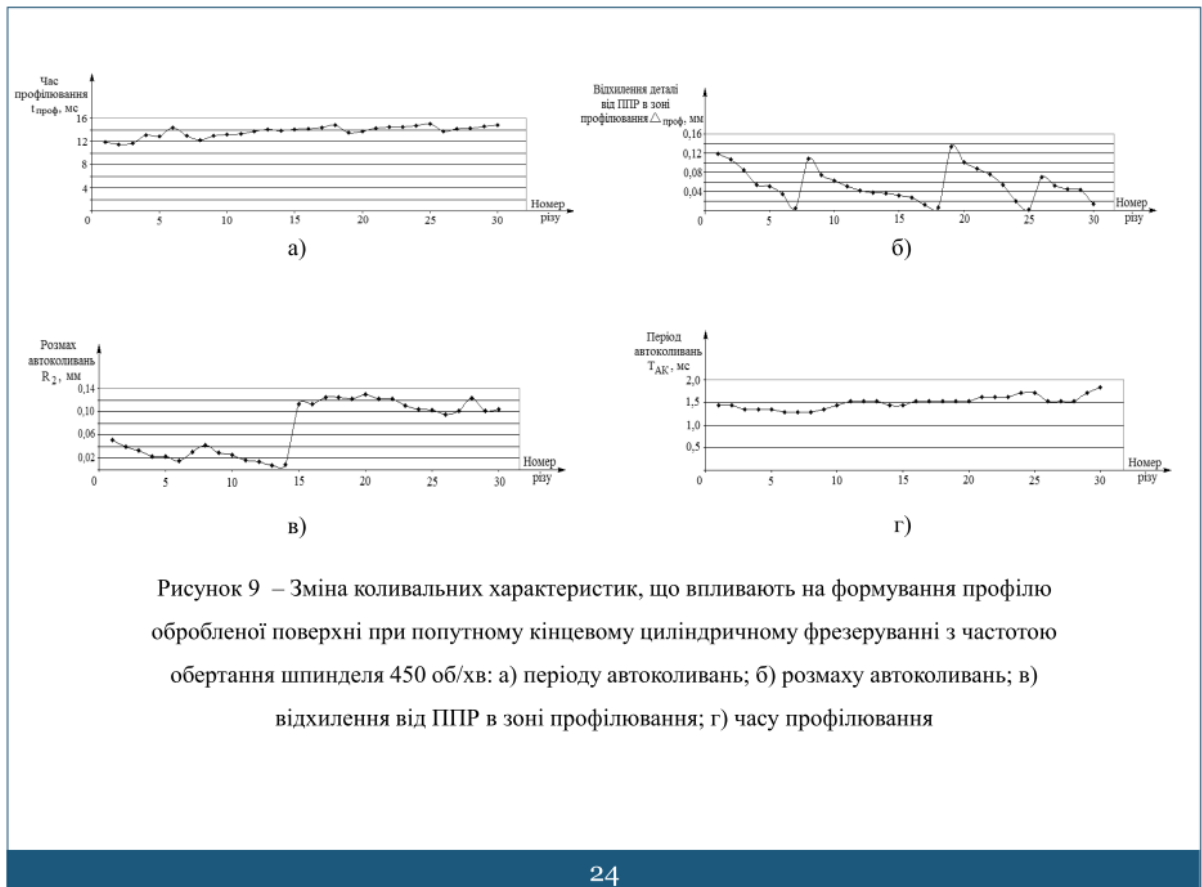
21



22



23



24

### Залежності параметрів коливань від частоти обертання шпинделя

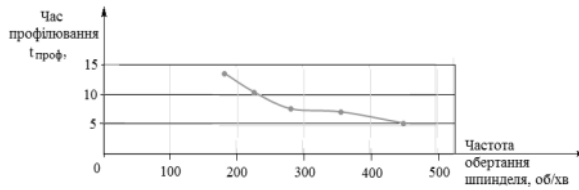


Рисунок 10 – Залежність часу профілювання від частоти обертання шпинделя

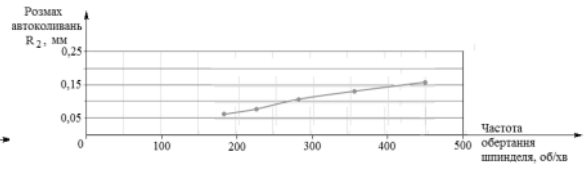


Рисунок 11 – Залежність розмаху автоколивань від частоти обертання шпинделя

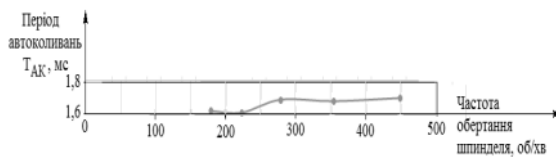


Рисунок 12 – Залежність періоду автоколивань від частоти обертання шпинделя

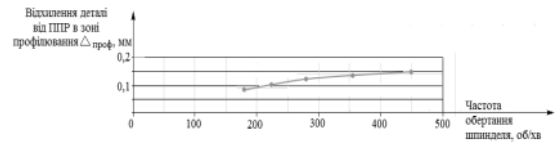
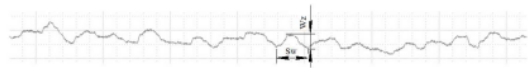


Рисунок 13 – Залежність відхилення деталі від ППР в зоні профілювання від частоти обертання шпинделя

### Профілограми оброблених поверхонь при різних частотах обертання шпинделя



а) 180 об/хв



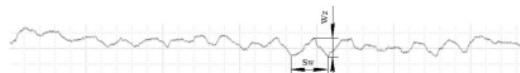
б) 224 об/хв



в) 280 об/хв



г) 355 об/хв



д) 450 об/хв

Рисунок 14 - Фрагменти профілограм оброблених поверхонь після попутного кінцевого фрезерування при різних частотах обертання шпинделя

Крок хвилястості на профілограмі розраховувався за формулою:

$$S_w = t \cdot v$$

Висота хвилястості на профілограмі розраховувалася за формулою:

$$W_z = k \cdot V$$

Таблиця 4 – Крок та висота хвилястості на поверхнях, що фрезерувались з різними частотами обертання шпинделя

Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,78	0,74	0,75
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,08	0,076	0,064
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,79	0,75	0,84
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,082	0,061	0,045
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,040	0,048	0,052
355	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,19	1,23	1,17
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,105	0,065	0,076
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,7	1,18	1,47
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,15	0,072	0,14

27

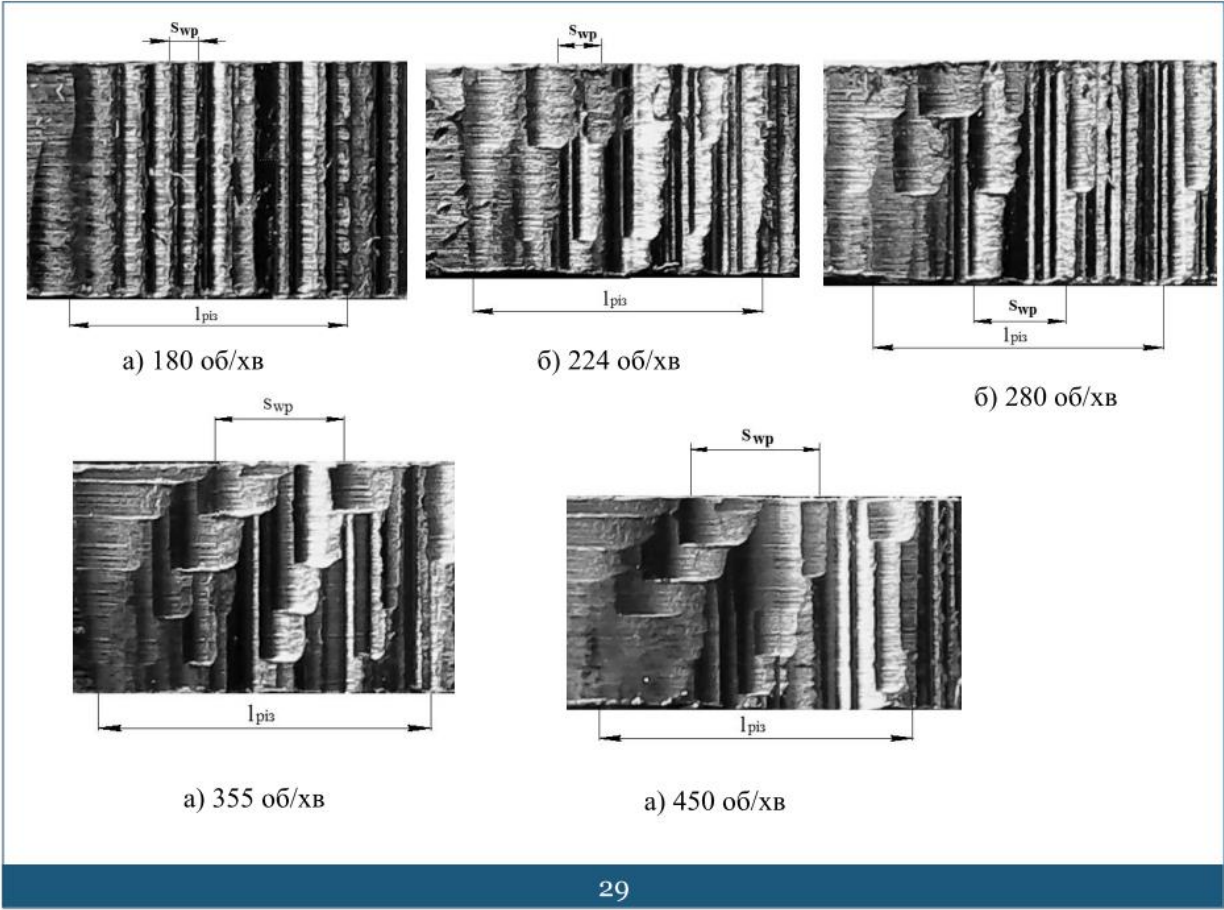
Таблиця 5 – Крок та висота хвилястості, розраховані за формулами хвилястості обробленої поверхні з розрахованим кроком

Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,77	0,69	0,7
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,084	0,07	0,065
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,71	0,7	0,76
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,08	0,064	0,049
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0,768	0,902	0,809
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,042	0,05	0,06
355	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,107	1,17	1,105
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,107	0,06	0,067
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,5	1,07	1,33
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	0,138	0,065	0,142

Таблиця 3.6 – Похибки розрахунків кроків та висот хвилястості, %

Частота, об/хв	Номер ділянки на профілограмі	1	2	3
180	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	1,2	6,7	6,6
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	4,7	7,8	1,6
224	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	10,1	6,6	9,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	2,4	4,7	8,2
280	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	0	0	0
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	11,1	4	13,3
355	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	6,7	4,9	5,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	2	7,7	11,8
450	Крок хвилястості $S_{wi}$ , мм	11,8	9,3	9,5
	Висота хвилястості $W_{zi}$ , мм	8	9,7	1,4

28



## **ВИСНОВКИ**

1. Розроблено методику досліджень автоколивань при попутному фрезеруванні
2. Виконано дослідження коливального руху деталі за чотирнадцятьма характеристиками
3. Визначено, що періодично змінюються лише чотири характеристики: час профілювання, розмах автоколивань, період автоколивань та відхилення деталі від положення рівноваги в зоні профілювання.
4. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шпинделя при незмінному періоді автоколивань  $T_{AK}$  крок хвилястості на поверхні різання збільшується. Тобто зі збільшенням частоти обертання шпинделя крок хвилястості на обробленій поверхні теж збільшується. Зі збільшенням частоти обертання шпинделя збільшується розмах автоколивань, що впливає на збільшення відхилення деталі від ППР в зоні профілювання і приводить до збільшення висоти хвилястості на обробленій поверхні.



## **ВИСНОВКИ**

1. Розроблено методику досліджень автоколивань при попутному фрезеруванні
2. Виконано дослідження коливального руху деталі за чотирнадцятьма характеристиками
3. Визначено, що періодично змінюються лише чотири характеристики: час профілювання, розмах автоколивань, період автоколивань та відхилення деталі від положення рівноваги в зоні профілювання.
4. Встановлено, що при збільшенні частоти обертання шпинделя при незмінному періоді автоколивань  $T_{AK}$  крок хвилястості на поверхні різання збільшується. Тобто зі збільшенням частоти обертання шпинделя крок хвилястості на обробленій поверхні теж збільшується. Зі збільшенням частоти обертання шпинделя збільшується розмах автоколивань, що впливає на збільшення відхилення деталі від ППР в зоні профілювання і приводить до збільшення висоти хвилястості на обробленій поверхні.



